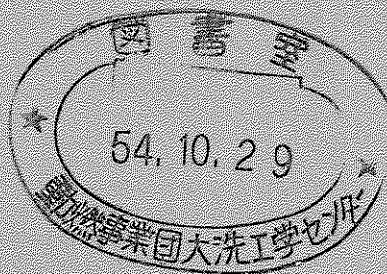


区分変更	
変更前記号	—
決行年月日	平成13年7月31日

# 大リーク・ナトリウム-水反応解析コード-SWACS/ REG3-

## (概要説明書)

—大リーク・ナトリウム-水反応解析(第3報・改訂版)—



1979年9月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
S	N952 79-19
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

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

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

Oct. 3, 1979

PNCT#N952 79-19

水-水素-水素反応解析コード - SWACS/REG3 -  
(概要説明書)

- 水-水素-水素反応解析 (オ3報、改訂版) -

正誤表

Page	Line	誤	正
34	F7	$u_p = \frac{1}{2} [u_R + u_S] + \frac{g}{2c} [H_R - H_S]$ $+ \frac{\Delta t}{2} \left[ \frac{f}{2d} u_R  u_R  + \frac{f}{2d} u_S  u_S  \right]$ $- 2g \sin \varphi$	$u_p = \frac{1}{2} [u_R + u_S] + \frac{g}{2g} [H_R - H_S]$ $- \frac{\Delta t}{2} \left[ \frac{f}{2d} u_R  u_R  + \frac{f}{2d} u_S  u_S  \right]$ $- 2g \sin \varphi$
34	F5	$H_p = \frac{c}{2g} [u_R - u_S] + \frac{1}{2} [H_R + H_S]$ $+ \frac{c \Delta t}{2g} \left[ \frac{f}{2d} u_R  u_R  - \frac{f}{2d} u_S  u_S  \right]$	$H_p = \frac{c}{2g} [u_R - u_S] + \frac{1}{2} [H_R + H_S]$ $- \frac{c \Delta t}{2g} \left[ \frac{f}{2d} u_R  u_R  - \frac{f}{2d} u_S  u_S  \right]$
43	12	$\neq 3_0$ <p style="text-align: center;">12) m</p>	$\neq 3_0$ <p style="text-align: center;">13) m</p>



配 布 限 定  
PNC TSN952 79-19  
1 9 7 9 年 9 月

# 大リーク・ナトリウム-水反応解析コード —SWACS/REG3— (概要説明書)

—大リーク・ナトリウム-水反応解析 (第3報・改訂版)—

三 宅 収<sup>\*</sup>, 進 藤 嘉 久<sup>\*</sup>, 佐 藤 稔<sup>\*</sup>

## 要 旨

動燃事業団で建設を計画中の高速増殖原型炉の蒸気発生器安全設計のため、大リーク・ナトリウム-水反応事故時の圧力流動挙動を解析する計算コード「SWACS」の開発が進行中である。本報告書は「SWACS」コード使用者のために、計算モデルおよび数値計算手法を概括するものである。

「SWACS」コードは総合化コードであり、大リーク・ナトリウム-水反応の問題現象である初期スパイク圧、初期スパイク圧の二次系への圧力波伝播、準定常圧上昇過程およびこれら現象を支配する主要因子たる水噴出率の4つの計算モジュールから構成される。さらに、これら計算モジュールの入出力を管理し、かつ必要により連立計算を実施させるためのメイン・ルーチンがある。

各計算モジュールの数学モデルおよび数値解法は以下のとおりである。

- (1) 初期スパイク圧計算； 水撃方程式を一次元球座標と一次元柱座標の結合体系について、特性曲線法で解く。
- (2) 圧力波伝播計算； 水撃方程式を一次元柱座標を結合したネット・ワーク体系について、特性曲線法で解く。
- (3) 準定常圧計算； 流体基礎方程式をノードとリンクにモデル化したネット・ワーク体系について陰解法で解く。
- (4) 水噴出率計算； 均質二相流の流体基礎方程式を一次元座標体系で差分法 (ICE法) で解く。

なお、本報告書は大リーク・ナトリウム-水反応解析 (第3報) ・ (SN952 78-05) の改訂版として、以下の内容を変更、追加したものである。

- (a) 「SWACS」コードの修正バージョン名を採用し、本報告で扱うバージョン名は

---

\* 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 蒸気発生器開発部 蒸気発生器安全性試験室

「SWACS/REG3」とした。

- (b) 付録として数値計算法の概略を付加した。
- (c) 水噴出率計算の境界の取扱いが改められた。
- (d) サブルーチンの追加，削除等によりプログラム構成が改められた。
- (e) その他説明文に補足を加えた。



NOT FOR PUBLICATION  
PNC/TN952 79-19  
Sept., 1979

Computer Code for Large Leak Sodium-Water  
Reaction Analysis — SWACS/REG 3 —

(General Outline)

— Large Leak Sodium-Water Reaction Analysis (Report No.3, Revision) —

Osam Miyake\*, Yoshihisa Shindo\*, Minoru Sato\*

Abstract

The computer code "SWACS" has been developed in order to analyze the pressure/fluid-flow phenomena during the large scale sodium-water reaction accident of the steam generator on account of the safety design of the prototype LMFBR which PNC plans to construct.

This report summarizes the mathematical models and numerical methods of "SWACS" code for users.

"SWACS" code is the integrated code which consists of four calculation modules, since the analytical aspects of the large scale sodium-water reaction phenomena are taken into consideration, i.e. ; the initial pressure spike, the propagation of pressure spike through the secondary loop, the quasi-steady pressure and the water leak rate which governs the whole phenomena directly. "SWACS" main routine controls I/O procedure of these calculation modules and, if need be, controls the parallel calculation.

The mathematical model and numerical method of each calculation module are as follows :

- (1) the initial pressure spike calculation module solves the liquid hammer equations for the combination of one-dimensional spherical/linear co-ordinates using the method of characteristics.
- (2) the pressure propagation calculation module solves the liquid hammer equations for the network model of one-dimensional pipes using the method of characteristics.
- (3) the quasi-steady pressure calculation module solves the liquid and gas flow equations for the network model of nodes and links using the implicit method.

---

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

(4) the water leak rate calculation module solves the fluid-flow equations of the two-phase (homogeneous) water flow for the one-dimensional pipe using the finite difference method (ICE method).

This report is the revision of Report NO.3 of "Large Leak Sodium-Water Reaction Analysis" series (SN952 78-05) and contents following modifications and additional explanations.

- (a) the code version name is adopted, and this report describes "SWACS/REG3" version.
- (b) the description of numerical methods are added in the appendix section.
- (c) the numerical treatment of boundary is improved in the water leak rate calculation.
- (d) the code structure is rearranged after re-assembling subroutines.
- (e) the explanations are annexed in each section.

## 目 次

1. ま え が き .....	1
2. コードの概要 .....	2
2-1 解析対象 .....	2
2-2 機 能 .....	2
2-3 コードの構成 .....	2
3. 水噴出率計算 .....	6
3-1 概 要 .....	6
3-2 解析モデル .....	6
3-3 計算上の仮定 .....	6
3-4 計 算 式 .....	7
4. 初期スパイク圧計算および圧力波伝播計算 .....	9
4-1 概 要 .....	9
4-2 解析モデル .....	9
4-3 計算上の仮定 .....	10
4-4 計 算 式 .....	10
5. 準定常圧計算 .....	12
5-1 概 要 .....	12
5-2 解析モデル .....	12
5-3 計算上の仮定 .....	12
5-4 計 算 式 .....	13
6. あ と が き .....	16
7. 参 考 文 献 .....	17



## 付 録

付録A	SWACSコードの構成	19
A-1	概 要	19
A-2	全体のコントロール	19
A-3	各計算モジュールの構成	21
A-4	プログラム・サイズ	21
付録B	数値解法の概要	27
B-1	水噴出率計算	27
B-1・1	概 要	27
B-1・2	基礎式と差分近似式の解法	27
B-1・3	境界条件	30
B-2	初期スパイク圧計算および圧力波伝播計算	32
B-2・1	概 要	32
B-2・2	基礎式より特性方程式の導出	32
B-2・3	差分近似式と解法	34
B-2・4	球座標系の特性方程式	35
B-2・5	境界条件	36
B-3	準定常圧計算	42
B-3・1	概 要	42
B-3・2	基礎式と差分近似式	42
B-3・3	差分近似式の解法	45
付録C	SWACSコードの登録番号について	48
C-1	概 要	48
C-2	主な変更点	48

## 図・表リスト

表 2 - 1	各計算モジュールの機能	3
図 2 - 1	SWACSの計算モジュール結合関係	4
図 2 - 2	計算モジュールの実行手順	5
図 3 - 1	ヘッダ側境界の差分セル	7
図 3 - 2	破断部境界の差分セル	8
図 4 - 1	流路分岐境界	11
図 4 - 2	オリフィス接合点	11
図 5 - 1	ノード・リンクモデル	13
付図 A - 1	計算モジュールの実行手順	22
付図 A - 2	SWACSメインプログラム・フローチャート	23
付図 A - 3	水噴出率計算モジュールのプログラム構成	24
付図 A - 4	初期スパイク圧, 圧力波伝播計算モジュールのプログラム構成	25
付図 A - 5	準定常圧計算モジュールのプログラム構成	26
付図 B・1 - 1	修正ICE法の一次元差分セル	28
付図 B・1 - 2	破断開放端のセルの扱い	30
付図 B・1 - 3	ヘッダ側境界のセルの扱い	31
付図 B・2 - 1	特性曲線法の差分格子 (直線座標系)	34
付図 B・2 - 2	特性曲線法の差分格子 (球座標系)	35
付図 B・2 - 3	気泡-ナトリウム境界の差分格子	36
付図 B・2 - 4	一分岐境界の差分格子	37
付図 B・2 - 5	流路分岐境界	38
付図 B・2 - 6	サージタンク接合点	39
付図 B・2 - 7	ナトリウム中ラプチャーディスク接合点	40
付図 B・2 - 8	オリフィス接合点	41

## 記 号 表

## 1. 水噴出率計算

$A_j$ : 熱の仕事量	[ kg m / kcal ]
$a$ : 音 速	[ m / sec ]
$D_{coil}$ : ヘリカルコイル径	[ m ]
$d_i$ : 伝熱管内径	[ m ]
$E$ : 全エネルギー	[ kcal / kg ]
$e$ : 管壁の粗度	[ m ]
$f_i$ : 摩擦損失係数	[ - ]
$f_s$ : 管摩擦損失係数	[ - ]
$f_T$ : 2相増倍係数	[ - ]
$g$ : 重力加速度	[ m / sec <sup>2</sup> ]
$h$ : 比エンタルピー	[ kcal / kg ]
$h_R$ : ヘッダーの比エンタルピー	[ kcal / kg ]
$I$ : 比内部エネルギー	[ kcal / kg ]
$K_R$ : ヘッダー-管入口圧損係数	[ - ]
$P$ : 圧 力	[ kg / m <sup>2</sup> a ]
$P_{ex}$ : 破断端背圧	[ kg / m <sup>2</sup> a ]
$P_R$ : ヘッダー圧力	[ kg / m <sup>2</sup> a ]
$Q$ : 入熱量	[ kcal / m <sup>3</sup> · sec ]
$q$ : 擬似粘性係数	[ kg / m <sup>2</sup> ]
$Re$ : レイノルズ数	[ - ]
$u$ : 流 速	[ m / sec ]
$\theta$ : 伝熱管の傾斜角度	[ rad ]
$\xi$ : 管曲率による圧損増倍係数	[ - ]
$\rho$ : 比 重 量	[ kg / m <sup>3</sup> ]
$\tau$ : 質量拡散係数	[ - ]
$\phi$ : 時間差分重み係数	[ - ]
$\psi$ : 時間差分重み係数	[ - ]

## 2. 初期スパイク圧計算, 圧力波伝播計算

$A$ : 流路断面積	[ m <sup>2</sup> ]
-------------	--------------------

C	: 音 速	[ m / sec ]
d	: 流路等価直径	[ m ]
F	: H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O モル転換比	[ - ]
f	: 摩擦損失係数	[ - ]
g	: 重力加速度	[ m / sec <sup>2</sup> ]
H	: 圧力ヘッド	[ m ]
HFS	: 自由液面圧力ヘッド	[ m ]
HRO	: 開放系背圧の圧力ヘッド	[ m ]
H <sub>T</sub>	: サージタンクの圧力ヘッド	[ m ]
L	: 流路長さ	[ m ]
n	: 水素ガスモル数	[ mol ]
P <sub>C</sub>	: カバーガス圧力	[ kg / m <sup>2</sup> a ]
P <sub>G</sub>	: 水素ガス気泡圧力	[ kg / m <sup>2</sup> a ]
Q <sub>C</sub>	: カバーガス体積	[ m <sup>3</sup> ]
Q <sub>G</sub>	: 水素ガス気泡体積	[ m <sup>3</sup> ]
q <sub>w</sub>	: 水噴出率	[ kg / sec ]
R <sub>0</sub>	: 一般気体定数	[ kg · m / mol · °K ]
r <sub>p</sub>	: 水素ガス気泡半径	[ m ]
T <sub>G</sub>	: 水素ガス気泡温度	[ °K ]
u	: 流 速	[ m / sec ]
ZR	: ラプチャーディスク圧損係数	[ - ]
ZT	: サージタンク入口圧損係数	[ - ]
α	: オリフィス係数	[ - ]
ζ	: 形状圧損係数	[ - ]
κ	: カバーガス比熱比	[ - ]
ξ <sub>±</sub>	: 特性曲線の勾配	[ sec / m ]
φ	: 流路傾き	[ rad ]

### 3. 準定常圧計算

A <sub>ij</sub>	: ノード断面積	[ m <sup>2</sup> ]
A <sub>k</sub>	: リンク断面積	[ m <sup>2</sup> ]
D <sub>e</sub>	: 伝熱管外径	[ m ]
d	: リンク等価直径	[ m ]

$g$	: 重力加速度	$[m / sec^2]$
$\Delta h$	: ヘッド差	$[m]$
$i$	: イニシアル・ノード添字	$[-]$
$j$	: ターミナル・ノード添字	$[-]$
$k$	: リンク添字	$[-]$
$L_k$	: リンク長さ	$[m]$
$L_p$	: コイルピッチ	$[m]$
$L_v$	: 大気放出弁リフト長さ	$[m]$
$M_H$	: ノード・水素ガス重量	$[kg]$
$M_s$	: ノード・ナトリウム重量	$[kg]$
$n$	: ポリトロープ指数	$[-]$
$P_{ij}$	: ノード・圧力	$[kg / m^2]$
$Q_i$	: 水素ガス発生量	$[kg / sec]$
$R$	: 水素気体定数	$[kg \cdot m / kg \cdot ^\circ K]$
$R/r$	: ベンドの曲率半径/内半径の比	$[-]$
$Re$	: レイノルズ数	$[-]$
$S_c$	: 大気放出弁の縮流系数	$[-]$
$S_k$	: リンクのスリップ比	$[-]$
$U_H$	: 水素ガス流速	$[m / sec]$
$U_s$	: ナトリウム流速	$[m / sec]$
$U_k$	: 混合物流速	$[m / sec]$
$W_H$	: 水素ガス重量流量	$[kg / sec]$
$W_s$	: ナトリウム重量流速	$[kg / sec]$
$W_k$	: 混合物重量流量	$[kg / sec]$
$X$	: クオリティ	$[-]$
$X_{tt}$	: Martinelli 係数	$[-]$
$\alpha$	: ボイド率	$[-]$
$\zeta$	: 形状圧損係数	$[-]$
$\zeta_B$	: ベンドの圧損係数	$[-]$
$\theta$	: ベンドの曲り角度	$[deg]$
$\lambda$	: 摩擦損失係数	$[-]$
$\mu$	: 粘性係数	$[kg \cdot sec / m^2]$
$\nu$	: 動粘性係数	$[m^2 / sec]$

$\rho_H$	: 水素ガス比重量	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
$\rho_S$	: ナトリウム比重量	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
$\rho_k$	: 混合物比重量	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
$\phi$	: 二相増倍係数	$[-]$

## 1. ま え が き

ナトリウム冷却高速炉の蒸気発生器（以下SG）において、1本ないし複数本の伝熱管が瞬時に完全両端破断するような大規模の水漏洩事故は大リーク・ナトリウム-水反応と呼ばれ、高速炉プラントの安全設計の重要な項目として、世界各国で試験研究が進められている。

我国では動燃大洗工学センターにおいて、高速増殖炉原型炉「もんじゅ」を開発対象として大リーク・ナトリウム-水反応試験装置（SWAT-1）および蒸気発生器安全性総合試験装置（SWAT-3）を用いて、数多くの試験が行なわれてきており、多くの試験結果が蓄積されている。

この試験結果を「もんじゅ」のSGの安全設計へ反映させるため、大リーク・ナトリウム-水反応時の発生圧力の解析を主目的とするSWACシリーズ計算コード<sup>2), 3), 4), 5)</sup>が開発された。さらにこれらの計算コードをシステム化して、大リーク・ナトリウム-水反応の一連の現象を解析する計算コード「SWACS」を開発した<sup>1)</sup>。「SWACS」コードは大リーク・ナトリウム-水反応を、伝熱管破損発生直後のスパイク圧状態（初期スパイク圧）、スパイク圧が2次主冷却系統に伝播する過程（圧力波伝播）、初期スパイク圧が減衰した後に生ずる準定常圧状態（準定常圧）、およびこれら圧力発生の主要因である水噴出率状態（水噴出率）に区分し、各々を計算する計算モジュールから構成されている。

この「SWACS」コードの構成、各計算モジュールの内容を紹介するためすでに概要説明書としてとりまとめ報告されている<sup>15)</sup>。

今回「SWACS」コードの取り扱い説明書を整理・完備するにあたり、計算コードの内容をユーザーに説明する目的で既報の概要説明書を見直し、その後改良された部分、数値計算手法等を補強して、改訂版としたのが本報告書である。

なお「SWACS」コードには、改造、修正に伴いversion名が付けられており、本報告書は「SWACS/REG3」versionを対象としてとりまとめた。

本報告書の内容として、本文2章では「SWACS」コードの機能ならびに構成の概略を述べる。3章から5章までは各計算モジュールについて計算の仮定、基礎式、流動関係式等について述べる。

また付録として、コードのプログラム構成、各計算モジュールで使用している数値解法、ならびに計算コードの登録番号（version名）についてまとめた。

また、本コードの入出力形式は別報告書の使用説明書<sup>14)</sup>に詳しくまとめられているので参照されたい。

## 2. コードの概要

### 2-1 解析対象

本コードでは「もんじゅ」のSGのごとく、SG中にカバーガス空間を有する型式を解析対象とする。

空間の対象は伝熱管破断が発生したSGに連結する健全なSGおよび2次主冷却系機器である配管、ポンプ、弁、中間熱交換器とする。

時間の対象は破断した伝熱管から噴出した水/蒸気とナトリウムとの反応により初期スパイク圧が発生し、この圧力が系内に伝播し、減衰した後に水素のビルドアップにより上昇する圧力が圧力解放系（放出系）により大気圧まで減衰され、ナトリウム-水反応が終了するまでの期間とする。

### 2-2 機能

大リーク・ナトリウム-水反応に付随する諸現象のうち、以下の4項目を各計算モジュールの機能に割り当てる。

- (1) 伝熱管が破断し、水または蒸気がナトリウム中に噴出する際の水系の流動計算を行ない、水噴出率の過渡変化を計算する。（水噴出率計算モジュール（SWAC-11）<sup>2)</sup>と呼ぶ。）
- (2) ナトリウム-水反応が起こった直後より数10 m sec程度の時点で観察される衝撃的な圧力上昇いわゆる初期スパイク圧を計算する。（初期スパイク圧計算モジュール（SWAC-5K/7）<sup>3)</sup>と呼ぶ。）
- (3) 初期スパイク圧が伝熱管破断が発生したSGから配管系を通り2次主冷却系機器全体に伝播する過程を計算する。（圧力波伝播計算モジュール（SWAC-5K）<sup>4)</sup>と呼ぶ。）
- (4) 初期スパイク圧が減衰した後、水素ガスがナトリウムをピストン状に押し上げ、伝熱管破断発生時のSG内の圧力が再び上昇しはじめ、放出系が作動し圧力が解放される過程の準定常圧の計算をする。（準定常圧計算モジュール（SWAC-13）<sup>5)</sup>と呼ぶ。）

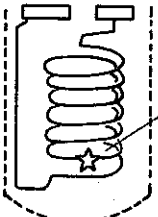
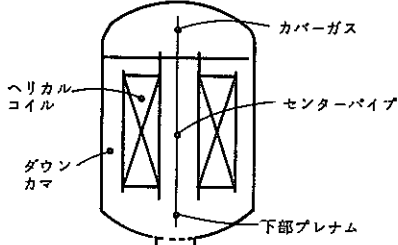
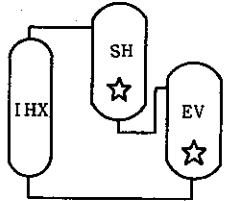
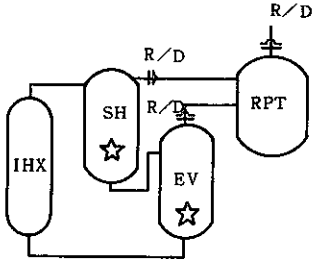
### 2-3 コードの構成

SWACSコード<sup>1)</sup>は前述したとおり、水噴出率、初期スパイク圧、圧力波伝播、および準定常圧計算モジュールより構成される。各々の計算モジュール間の入出力データの授受による結合関係を図2-1に示す。各モジュールの計算モデルの概要を表2-1に示す。また図2-2に各計算モジュールをコントロールするメインのフローシートを示す。

詳細なコード内容は次章以降に記述する。



表 2-1 各計算モジュールの機能

計算モジュール	計 算 体 系 <sup>※)</sup>	計 算 モ デ ル
<p>SWAC-11 (水噴出率計算)</p>	<p>事故 SG の破損伝熱 管内の水/蒸気流動</p>	 <p>伝熱管破損部</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・噴出水の相状 液, 二相, 蒸気</li> <li>・方程式 一次元, 質量, 運動量, エネルギー保存式, 状態式。</li> <li>・数値解法 陰的有限差分法 (修正 ICE 法)</li> </ul>
<p>SWAC-5K/7 (初期スパイク圧計算)</p>	<p>事故 SG 内の反応部 の水素ガス気泡成長 とナトリウム中の圧 力波伝播</p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・流 体 圧縮性ナトリウムおよび球状水素ガス気泡。</li> <li>・方程式 一次元, 質量, 運動量保存式。</li> <li>・数値解法 特性曲線法。</li> </ul>
<p>SWAC-5K (圧力波伝播計算)</p>	<p>二次冷却系のナトリ ウム中の圧力波伝播</p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・流 体 圧縮性ナトリウム。</li> <li>・方程式 一次元, 質量, 運動量保存式。</li> <li>・数値解法 特性曲線法。</li> </ul>
<p>SWAC-13 (準定常圧計算)</p>	<p>放出系, 二次冷却系 のナトリウムと水素 ガスの流動</p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・流 体 非圧縮性ナトリウム, 水素ガス ナトリウム水素との相状は単相または二相。</li> <li>・モデルおよび数値解法 ノード, リンク, ネットワークモデルに対し質量, 運動量保存式 陰的差分法</li> </ul>

※ 体系の図は高速原型炉「もんじゅ」を例とした参考図である。

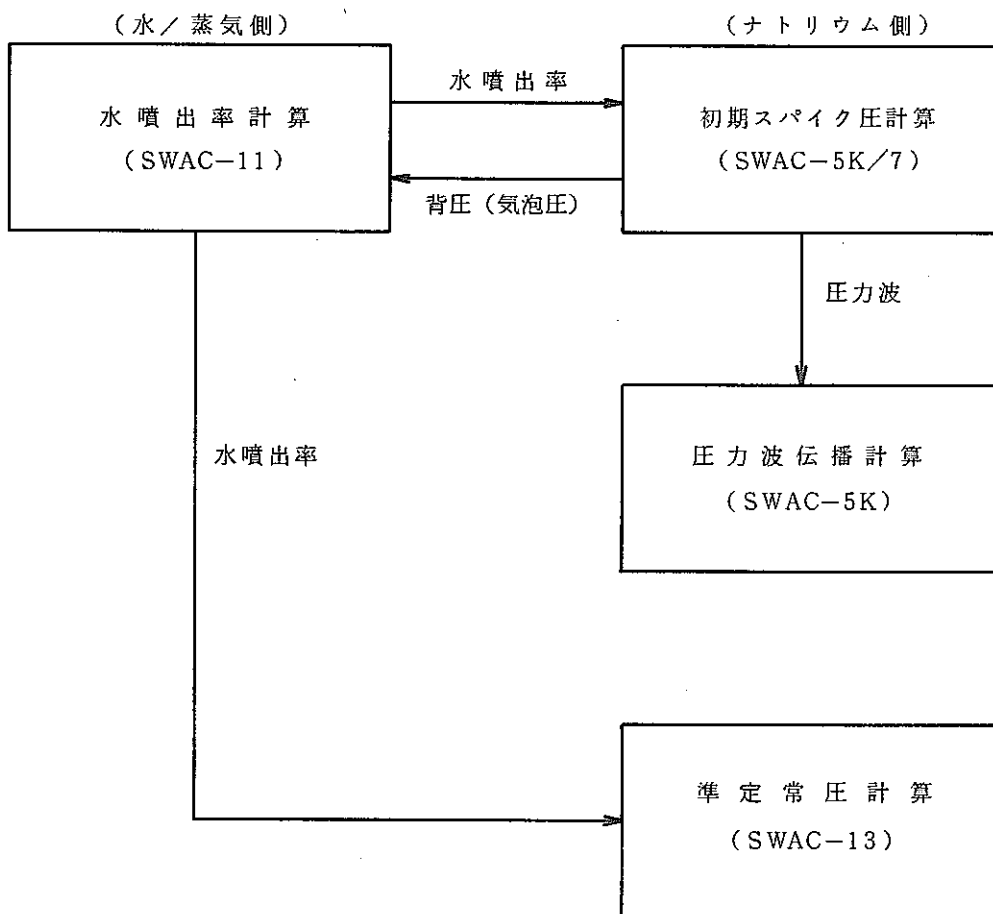


図 2 - 1 SWACS の計算モジュール結合関係

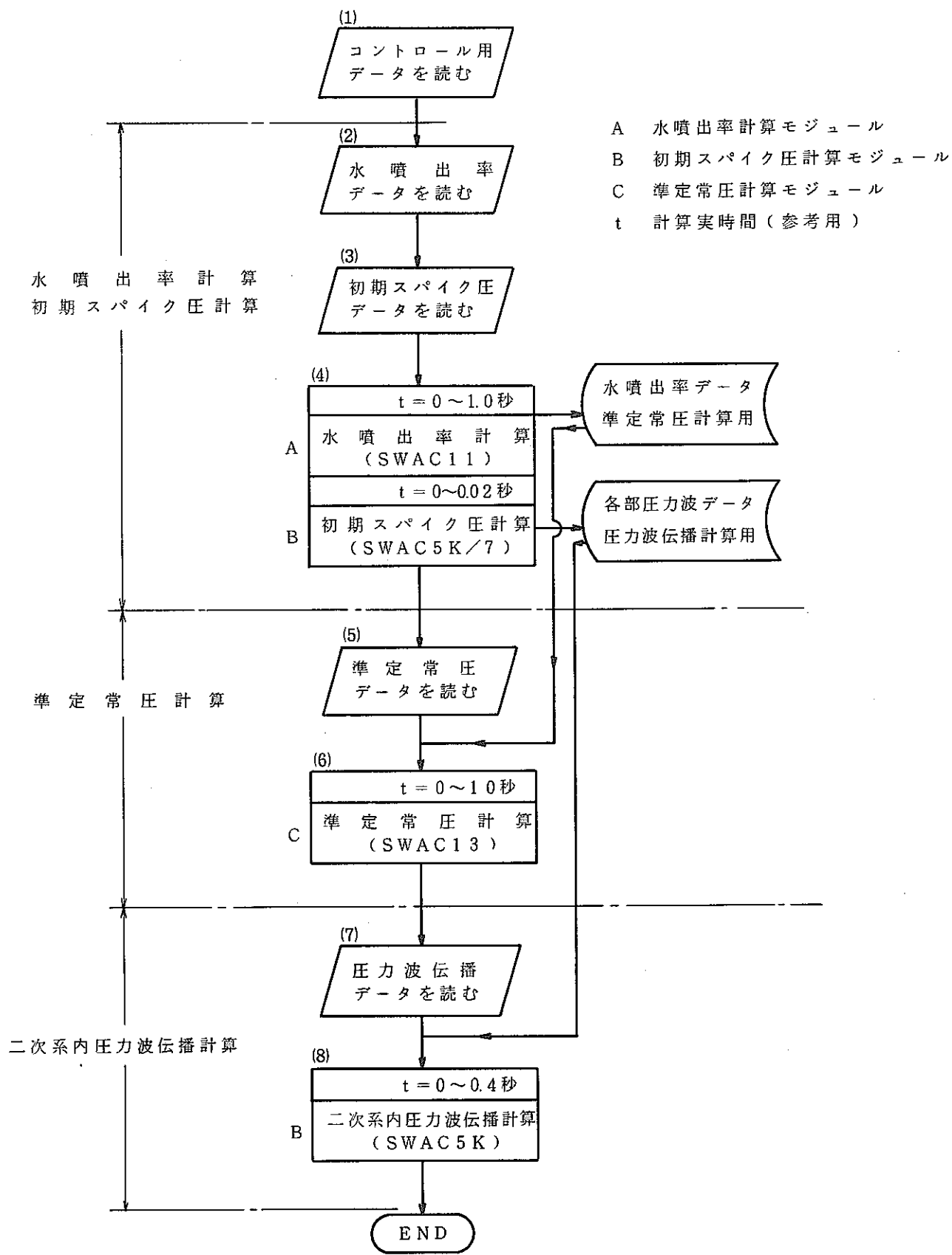


図 2 - 2 計算モジュール実行手順

### 3. 水噴出率計算

#### 3-1 概要

蒸気発生器，伝熱管破断時の管内水／蒸気の流動計算を行ない破断口からの水噴出率過渡変化を計算する。<sup>2)</sup> 本計算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行なえる。

計算手法としては，初期の激しい過渡変化をも含めて計算する必要から，質量，運動量，エネルギーの各保存式を差分法で解くこととし，発散を避けるために数値計算手法として修正ICE (Implicit Continuous-fluid Eulerian)法を採用している。<sup>11)</sup>

本計算モジュールで事故SGの伝熱管内の水／蒸気の状態（流速，圧力，エンタルピー）変化，および破断口からの水噴出率の過渡変化が計算され，水噴出率の計算結果は初期スパイク圧計算，準定常圧計算のための入力データとなる。

なお，本水噴出率計算は初期スパイク計算モジュールと連動させることにより破断口背圧の影響も計算可能である。

#### 3-2 解析モデル

水噴出率計算で扱う解析対象は事故SGの水／蒸気の入口，出口ヘッダと破断部を境界とした伝熱管内の水／蒸気の一次元流動である。伝熱管破断を解析開始時刻とし，破断規模は瞬時完全ギロチン破断とし，両端破断口よりの水噴出率を各々独立して計算する。

伝熱管内は有限の空間メッシュに分割され，管内の水／蒸気の圧力，流速ならびにエンタルピー，比重量等状態量の時間変化が計算される。

#### 3-3 計算上の仮定

- (1) 流れは一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。
- (2) サブクール水，飽和水，過熱蒸気の相変化を考慮する。
- (3) 水の圧縮性を考慮する。
- (4) 伝熱管の破断は瞬時完全ギロチン破断を模擬し，破断口の拡大は考慮しない。
- (5) 伝熱管壁でのナトリウムより水への熱移動はSG総伝熱量を総伝熱面積でわった平均値で扱う。また流体内部での熱伝導は無視する。
- (6) 流体抵抗によるエネルギー変化は無視する。
- (7) 状況に応じ，数値計算の精度あるいは安定性を高めるために擬似粘性および質量拡散項を付加する。

3-4 計算式\*

(1) 質量保存式 (連続の式)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = \tau \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3-1)$$

ただし右辺は数値計算安定化のための質量拡散項である。

(2) 運動量保存式

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2)}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} (P+q) g + \rho g \cos \theta - \frac{f}{2d} \rho u |u| \dots\dots\dots (3-2)$$

ただし q は衝撃波を扱う際の数値計算安定化のための擬似粘性項である。

(3) エネルギー保存式

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E u)}{\partial x} = \frac{\rho u}{A_j} \cos \theta - \frac{1}{A_j} \frac{\partial (P u)}{\partial x} + Q \dots\dots\dots (3-3)$$

$$E = I + \frac{u^2}{2} \cdot \frac{1}{g A_j} \dots\dots\dots (3-4)$$

(3-1), (3-2), (3-3) 式を修正 I C E 法を用いて差分し得られる行列式を水/蒸気状態式と共に解き計算を行なう。

(4) 境界条件

破断伝熱管に関し、破断部より上流側の管路では入口ヘッダと破断部が、破断部より下流側の管路では破断部と出口ヘッダが各々境界となる。ヘッダ側境界ではヘッダ内に仮想セル (空間メッシュ) を設定し、その仮想セル内の圧力は一定であるとして境界部の計算を行なう。

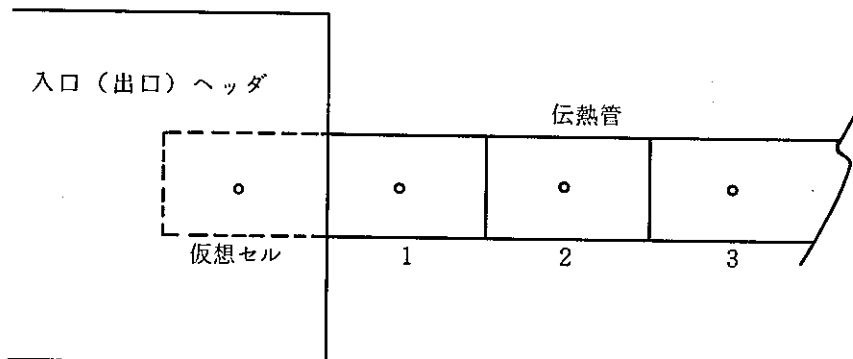


図 3-1 ヘッダ側境界の差分セル

\* 数値計算式の詳細については付録 B-1 を参照。

破断端境界でも同様に管外に一つのセルを設定し、その圧力は背圧として外部より値を与える。

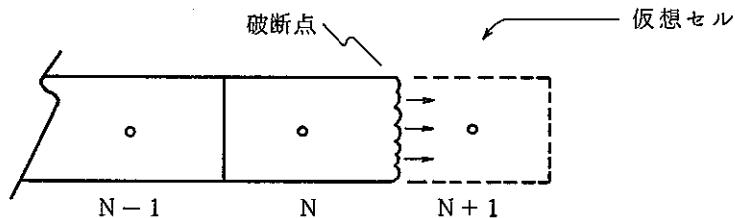


図 3-2 破断部境界の差分セル

(5) 管摩擦圧損係数の取扱い

流体の管摩擦圧損係数  $f_i$  は次式の積で表わす。

$$f_i = f_s \cdot \xi \cdot f_T \quad \dots\dots\dots (3-5)$$

①  $f_s$  の算出<sup>16)</sup>

臨界レイノルズ数  $\approx 2300$  を境として

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{層流の場合} \quad f_s = 64 / Re \quad \dots\dots\dots (3-6) \\ \text{乱流の場合} \end{array} \right.$$

$$\text{滑かな管} \quad f_s = 0.3164 \cdot Re^{-0.25} \quad \dots\dots\dots (3-7)$$

$$\text{粗い管} \quad 1 / \sqrt{f_s} = -2 \log_{10} \left[ \frac{e/di}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f_s}} \right] \quad \dots\dots (3-8)$$

ここで、 $Re$  はレイノルズ数 [-] ,  $e$  は管壁の粗度 [m] ,

$di$  は管内径 [m] である。

②  $\xi$  の算出 (管の曲率の影響)<sup>17)</sup>

ヘリカルコイル曲率による増倍係数  $\xi$  は

$$\xi \left\{ \begin{array}{l} = \left[ Re \cdot \left( \frac{di}{D_{coil}} \right)^2 \right]^{0.05} ; \quad Re \left( \frac{di}{D_{coil}} \right) \geq 0.034 \\ = 1 \quad ; \quad Re \left( \frac{di}{D_{coil}} \right) < 0.034 \end{array} \right. \quad \dots\dots\dots (3-9)$$

ここで、 $D_{coil}$  はコイル径 [m] である。

③  $f_T$  の算出 (2相の影響)<sup>18)</sup>

$$\text{単相の場合} \quad f_T = 1$$

二相の場合 Martinelli-Nelson の係数を圧力、クォリティの関数としてテーブル化して使用。

## 4. 初期スパイク圧計算および圧力波伝播計算

### 4-1 概要

大リーク・ナトリウム-水反応を生じたSG内の初期スパイク圧挙動<sup>3)</sup>ならびに、初期スパイク圧が配管を通じ2次主冷却系各機器に伝播する過程<sup>4)</sup>を計算する。

初期スパイク圧計算では、ナトリウム-水反応により生じた水素ガス気泡が球状に等温成長すると仮定し、反応点近傍は一次元球座標モデル、発生した圧力波が事故SG内のナトリウム中を伝播していく過程を一次元柱座標モデルとし、両者を結合した球-柱モデルで事故SG内の初期スパイク圧挙動を計算する。

圧力波伝播計算では、事故SGのナトリウム入口、出口ノズル部を圧力既知境界として扱い、2次主冷却系を配管モデル(柱モデル)におきかえ、圧力波の伝播していく過程を計算する。

初期スパイク圧計算、圧力波伝播計算ともにナトリウムは圧縮性流体として扱われ、数値解法は特性曲線法を用いる<sup>1)2)</sup>。本計算コードの特徴としては流路各部で流路断面積、等価直径音速が異なる場合の解析が容易で、自由液面、流路分岐、オリフィス、ラプチャーディスク等の境界条件を考慮できることである。

### 4-2 解析モデル

解析のためのモデルとして、初期スパイク圧計算の解析対象はナトリウム-水反応時の事故SG内の急激な圧力挙動である。伝熱管破断口より噴出した水/蒸気がナトリウムと反応し発生する水素ガスがナトリウム中で完全分離して球状に等温成長すると仮定する。

気泡の急激な膨張に伴い発生した圧力波は事故SG内のナトリウム中を伝播していくが、その際、反応点近傍は一次元球座標モデル、その他は一次元柱座標モデルで扱う。

ナトリウム中の境界条件としては流路分岐、断面積変化、自由液面、圧力一定、流速一定境界、オリフィス等を考慮できる。

圧力波伝播計算の解析対象は初期スパイク圧が事故SGから2次主冷却系全体に伝播していく過程である。圧力の発生源としては、任意の位置(通常事故SGのナトリウムノズル部)の圧力時間変化が上記初期スパイク圧計算あるいは実験測定により既に得られているとして、その圧力波を時間関数として入力して、境界条件として使用する。

2次主冷却系は一次元柱座標のいわゆる配管モデルにおきかえられ、初期スパイク圧計算と同様の境界条件を考慮することができる。

### 4-3 計算上の仮定

- (1) ナトリウムの流れは一次元流動として扱う。  
ただし初期スパイク圧計算では反応点近傍を一次元球座標、他は一次元柱座標とする。  
また圧力波伝播計算では全体を一次元柱座標とする。
- (2) ナトリウムの圧縮性を考慮する。
- (3) SG内の内部構造物等は流路断面積，等価直径，および形状圧損係数の指定で取り扱う。
- (4) ナトリウムの圧力が，飽和蒸気圧を越えて降下した場合でも，液柱分離，キャビテーションの発生は考えない。
- (5) 初期スパイク圧計算において，ナトリウム-水反応に関し次の仮定をおく。
  - 瞬時反応を仮定し， $H_2/H_2O$  モル転換比（水1モルより発生する水素ガスモル数）は一定とする。
  - 発生する水素ガスは理想気体として扱い，ガス気泡温度は一定とする。
  - 水素ガスはナトリウムと完全分離して，球状に等温膨張するとする。

### 4-4 計算式\*

#### (1) 一次元水撃方程式

圧縮性考慮の一次元流体の運動方程式，連続の式を次のように表わす。

○ 一次元柱座標領域

$$-\frac{1}{g} \left( \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \right) u = \frac{\partial H}{\partial x} - \sin \varphi + \left( \frac{f}{d} + \frac{\zeta}{L} \right) \frac{u |u|}{2g} \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \right) H = -\frac{C^2}{g} \frac{\partial u}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

○ 一次元球座標領域

$$-\frac{1}{g} \left( \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial r} \right) u = \frac{\partial H}{\partial r} \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial r} \right) H = -\frac{C^2}{g} \left( \frac{\partial u}{\partial r} + 2 \frac{u}{r} \right) \quad \dots\dots\dots (4-4)$$

ただし球座標は初期スパイク圧計算において反応点近傍のみで適用する。以上の(4-1)～(4-4)式は以下に述べる境界条件のもとに特性曲線法により解かれる。<sup>12)</sup>

#### (2) 水素ガス気泡圧力（初期スパイク圧計算）

ナトリウム-水反応により発生する水素ガスの圧力は次式より求める。

---

\* 数値計算式の詳細については付録B-2を参照。



$$P_G \cdot Q_G = n \cdot R_0 \cdot T_G \quad \dots \quad (4-5)$$

$$n = \frac{F}{0.018} \int_0^t q_w dt \quad \dots \quad (4-6)$$

ここで  $Q_G$  は気泡体積，  $F$  は  $H_2 / H_2O$  モル転換比，  $q_w$  は水噴出率で気泡ガス温度 ( $T_G$ ) は一定とする。ガス気泡圧力，膨張速度は (4-5) 式を (4-3)，(4-4) 式と連立させることにより求められる。

(3) 圧力波発生点 (圧力波伝播計算)

任意の点において，圧力の時間変化  $H(t)$  が既知であるとして (4-1)，(4-2) 式において境界条件として使用する。

(4) 自由液面境界

液面の変動に対し，カバーガス圧力は次式で計算する。

$$P_C = P_{C0} \left( \frac{Q_{C0}}{Q_C} \right)^\kappa \quad \dots \quad (4-7)$$

ここで， $P_{C0}$  はカバーガス初期圧 ( $kg/cm^2 a$ )， $Q_C$  はカバーガス体積 [ $m^3$ ]， $Q_{C0}$  はカバーガス初期体積 [ $m^3$ ]， $\kappa$  はカバーガスの比熱比である。

(5) 流路端 (一分岐) 境界

流路端において，流速一定 (盲端)，あるいは圧力一定を境界条件とする。

(6) 流路分岐境界

流路が分岐する接合点，あるいは流路の断面積が変化する接合点では次式を境界条件とする。

$$\sum_i A_i \cdot u_i = 0 \quad \dots \quad (4-8)$$

ここで  $A_i$  は分岐に流れ込む各流路の断面積である。

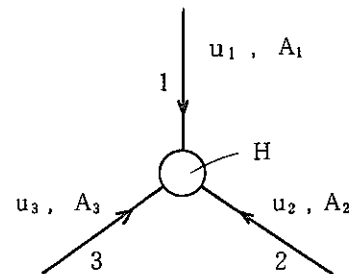


図 4-1 流路分岐境界

(7) オリフィス点

オリフィス点では次式が成立するとする。

$$u_{c3} = \sqrt{2g(H_{c1} - H_{c2})} \quad \dots \quad (4-7)$$

$$u_{c1} = \alpha \cdot u_{c3} \quad \dots \quad (4-8)$$

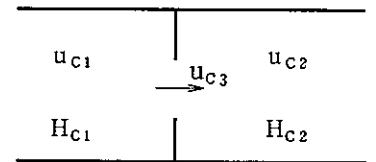


図 4-2 オリフィス接合点

ここで  $\alpha$  はオリフィス係数である。

その他，サージタンク，ナトリウム中ラプチャーディスクを境界条件として扱うことができる。

## 5. 準定常圧計算

### 5-1 概 要

初期スパイク圧が減衰した後の準定常時間領域における放出系を含めた2次主冷却系の圧力、ならびにナトリウムと水素ガスの流動の挙動を計算することを目的とする。<sup>5)</sup> 本計算モデルで解析すべき現象の時間シーケンスを下記に示す。

- (1) ナトリウム-水反応により事故SG内の内圧が上昇する。
- (2) その結果事故SG内の一部のナトリウムは2次主冷却系の他の機器へ押し出される。
- (3) 事故SGの内圧が上昇して放出系のラプチャーディスクの設定圧に達すると、ラプチャーディスクが破壊し圧力は放出系に解放される。
- (4) 2次主冷却系の他のSGでもガス圧が上昇すると、事故SGと同様にその放出系のラプチャーディスクが破壊する。
- (5) 更に反応が継続すると、放出系の収納容器内圧も上昇し収納容器付ラプチャーディスクも破壊し、圧力は最終的に大気に解放される。

以上の現象の計算を、事故SG、放出系および2次主冷却系を領域(ノード)に分割し、各ノードを流路(リンク)で結合したネットワークモデルにモデル化し、運動量保存式、質量保存式<sup>13)</sup>をたててこれを陰解法で解く。

### 5-2 解析モデル

準定常圧計算の解析対象は大リーク・ナトリウム-水反応による初期の急激な圧力上昇、つまり初期スパイク圧に引き続いて、系内の圧力が準定常的に上昇するいわゆる準定常圧時間領域で、流動としてナトリウムと水素ガスの混合二相流を扱う。

解析体系は事故SG、ナトリウム-水反応生成物放出系、ならびに2次主冷却系全体でこれを領域(ノード)に分割し更に各ノードを流路(リンク)でつないだネットワークモデルにモデル化する。このようにモデル化した体系に対し、ノードに関し質量保存則、リンクに関し運動量保存則を適用する。

### 5-3 計算上の仮定

- (1) ナトリウムと水素ガスの二相流は一次元スリップモデルを用いスリップ比は別に定義する。
- (2) ナトリウムは非圧縮性、水素ガスは圧縮性として扱う。
- (3) ナトリウム-水反応の反応速度は無限大と考え、反応の時間遅れはないものとする。
- (4) エネルギーバランスは考慮せず、各領域の水素ガス温度はインプットで与えられている

とする。

- (5) 伝熱管破断による水噴出率は時間的变化，空間分布を考慮してインプットで与えられているものとする。
- (6) 各SGおよび収納容器のラプチャディスクは設定値に達すると直ちに破壊するものとする。
- (7) カバーガスの物理的特性は水素ガスと同一とする。

5-4 計算式\*

(1) 運動量保存式

リンクについて次のように展開する。

$$\dot{W}_k = \frac{g}{\sum_j \frac{L_{kj}}{A_{kj}}} [ (P_i - P_j) + \frac{W_k^2}{2\rho_k \cdot g} \left( \frac{1}{A_i^2} - \frac{1}{A_j^2} \right) + \rho_k \Delta h - P_{fk} ] \dots\dots (5-1)$$

ここで  $P_{fk}$  は摩擦，形状等の圧力損失項である。

(2) 質量保存式

ノードについてナトリウム，水素ガス各々に次のように展開する。

$$\dot{M}_S = \sum_{\nu \in T_i} W_{S\nu} - \sum_{\nu \in I_i} W_{S\nu} \dots\dots\dots (5-2)$$

$$\dot{M}_H = \sum_{\nu \in T_i} W_{H\nu} - \sum_{\nu \in I_i} W_{H\nu} + Q_i \dots\dots\dots (5-3)$$

ここで両式の右辺第1項は流入する成分  
第2項は流出する成分で， $Q_i$ は水素ガスの発生を表わす。

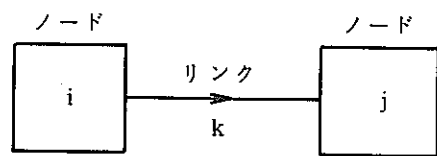


図5-1 ノード・リンクモデル

(3) ナトリウム・水素ガス二相流モデル

一次元スリップモデルとしスリップ比 (S) を次式で定義する。

$$S_k = U_{Hk} / U_k \dots\dots\dots (5-4)$$

リンクの (混合) 流量とナトリウム，水素ガス各々の流量の関係は次式で表わされる。

$$W_{Sk} = \frac{1 - \alpha_k - \alpha_k (S_k - 1) - R_{Hsk}}{1 - \alpha_k (1 - R_{Hsk})} \cdot W_k \dots\dots\dots (5-5)$$

\* 数値計算式の詳細は付録B-3を参照。

$$W_{HK} = \frac{S_k \alpha_k R_{HSk}}{1 - \alpha_k (1 - R_{HSk})} \cdot W_k \quad \dots\dots\dots (5-5)$$

ただし、 $R_{HSk} = \rho_{HK} / \rho_{SK}$ 、 $\alpha_k$ はボイド率を示す。

以上の式を整理すると $\Delta W^{n+1} = W^{n+1} - W^n$  に関しL元(L:リンク数)の連立方程式が得られ、これを解くことにより流量が更新される。

各ノードの圧力を求めるのに、水素ガス、カバーステップを含んだノードについては完全気体の状態式を用いる。ナトリウム、単相ノードについてはそのノード周辺の圧力既知ノードに関し連立方程式をたて解いて求める。

(4) 流動圧損の取扱い

i) 管摩擦損失係数<sup>16)</sup>

レイノルズ数の範囲で次のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 64 / Re && Re < 2300 \\ 1 / \sqrt{\lambda} &= -2 \log_{10} \left[ \frac{e/d}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right] && \dots\dots\dots (5-6) \\ &&& Re \geq 2300 \end{aligned} \right\}$$

ただし  $Re = \frac{u \cdot d}{\nu}$

uは流速[m/sec]、dは水力直径[m]、 $\nu$ は動粘性係数(m<sup>2</sup>/sec)、eは管壁の粗度[m]である。

ii) 伝熱管コイル部の摩擦損失係数<sup>19)</sup> (コイル1段当り)

$$\lambda_c = 4 \cdot (1.72)^2 \cdot \frac{2}{3} Re^{-0.15} \left[ 0.23 + \frac{0.11}{(L_p/D_c)^{1.08}} \right] \quad \dots\dots\dots (5-7)$$

ただし  $Re = \frac{u \cdot D_c}{\nu}$

$D_c$ は伝熱管外径[m]、 $L_p$ はコイルピッチ[m]である。

iii) 二相流圧損増倍係数<sup>20)</sup>

Lockhart - Martinelli の式を基本として用いる。

$$\left. \begin{aligned} \phi_0 &= 1 + 2 \sqrt{X_{tt}} + X_{tt} && \alpha_k \geq 0.2 \\ \phi_0 &= 1 + 2 / \sqrt{X_{tt}} + 1 / X_{tt} && \alpha_k < 0.2 \\ X_{tt} &= \left( \frac{1 - \alpha - \alpha \cdot (S-1) \cdot R_{HS}}{S \cdot \alpha \cdot R_{HS}} \right)^{0.9} \cdot \left( \frac{\rho_H}{\rho_S} \right)^{0.5} \cdot \left( \frac{\mu_S}{\mu_H} \right)^{0.1} && \dots\dots\dots (5-8) \\ \phi^2 &= (\phi_0^2)^N \end{aligned} \right\}$$

ただし N は補正係数で入力データとして与える。

VI) ベンド部の圧損係数<sup>23)</sup>

$$\left. \begin{aligned} \zeta_B &= 0.00873 \chi \lambda \theta (R/r) & \text{Re}(r/R)^2 < 91 \\ \zeta_B &= 0.00241 \chi \theta \text{Re}^{-0.17} (R/r)^{0.84} & \text{Re}(r/R)^2 \geq 91 \\ \chi &= \begin{cases} 0.95 + 17.2 (R/r)^{-1.96} & R/r < 19.7 \\ 1 & R/r \geq 19.7 \end{cases} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5-9)$$

ただし (R/r) はベンド部の曲率半径/管内半径の比,  $\theta$  はベント角 [deg],  $\lambda$  は i) に示した管摩擦損失係数である。

V) その他の圧損係数

$$P_f = \zeta \frac{\rho u_k^2}{2g} \dots\dots\dots (5-10)$$

その他の圧損要因による圧損は定数( $\zeta$ )として入力データで与え (5-10) 式で処理する。

(5) 放出系配管内の臨界流速<sup>21)</sup>

放出系配管内では Fauske の式により臨界流量を計算しこれを管内流速の上限とする。

$$U_{cri} = \sqrt{g \cdot n \cdot p^2 \cdot \frac{(X/\sqrt{\rho_H} + (1-X)/\sqrt{\rho_S})^3}{X \cdot R \cdot T \sqrt{\rho_H}}} \dots\dots\dots (5-11)$$

ここで n はポリトロプ指数,  $\rho_S, \rho_H$  はナトリウム, 水素ガスの比重量 [kg/m<sup>3</sup>], R は水素ガスの気体定数 [kg·m/kg<sup>°K</sup>], X はクォリテイである。

(6) 大気放出弁の流量<sup>22)</sup>

収納容器より水素ガスを大気中に放出する大気放出弁の流量は次式で計算する。

$$W = 0.1418 \cdot S_c \cdot D \cdot L_v \cdot \Delta p \sqrt{\frac{2}{T_{H_2}}} \dots\dots\dots (5-12)$$

ここで  $S_c$  は縮流係数, D は弁の直径 [m],  $L_v$  は弁のリフト長 [m],  $\Delta p$  は圧力差 [kg/m<sup>2</sup>],  $T_{H_2}$  は温度 [°K] である。

## 6. あ と が き

計算コード「SWACS」の適用計算<sup>9), 10)</sup>および実験検証の中間報告<sup>6), 7), 8)</sup>によれば本コードで採用した解析モデルで「もんじゅ」型SGの安全設計計算は十分であるといえる。

現在さらなる検証計算が続行中で、これらの結果は別途報告される予定である。

また「SWACS」コードの機能追加作業として、ダウンカマ部における初期スパイク計算、および圧力波伝播解析における負圧処理ルーチンの開発が続行中である。

終りにあたり、各計算モジュールの開発において、水噴出率計算モジュールは吉岡直樹氏らにより、初期スパイク圧、および圧力波伝播計算モジュールは坂野耿介氏らにより、準定常圧計算モジュールは田辺裕美氏らにより、および「SWACS」としてのシステム化は渡辺収氏らによりおこなわれたものであることを付記いたします。

## 7. 参 考 文 献

1. 長沼辰二郎, 岸田雅子, 渡辺収  
「大リーク・ナトリウム-水反応コードの総合化-SWACS総合化コードの説明」PNC SJ 206-77-27(1) (1977)
2. 渡辺収, 三宅収, 進藤嘉久, 佐藤稔  
「大リーク・ナトリウム-水反応解析コード-SWACS/REG3 水噴出率計算モジュール SWAC11の説明-(仮題)」(近刊)
3. 進藤嘉久, 坂野耿介, 井崎隆  
「大リーク・ナトリウム-水反応計算コードの開発-計算コード使用マニュアル」PNC SJ 213-76-02(1) (1976)
4. 田中義久, 坂野耿介  
「圧力波伝播計算コードの開発研究(1)」PNC SJ 213-72-02-2 (1972)
5. 田辺裕美, 広井博, 佐藤稔, 堀雅夫  
「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)-」PNC SN941 77-170 (1977)
6. M. Sato, et al  
"Computer Code for Large Leak Sodium-Water Reaction Analysis"  
, DOE/PNC PLANT COMPONENTS W/Gr FIRST JOINT STEAM GENERATOR SEMINAR  
(No. 1 JAPANESE PAPERS) PNC SA013 KWG 78-01 (1978)
7. 進藤嘉久, 山口友久, 三宅収, 佐藤稔  
「大リーク・ナトリウム-水反応時の初期スパイク圧解析(SWACSコードによるSWAT-3, Run-3実験解析)-大リーク・ナトリウム-水反応解析(第5報)-」PNC SN941 79-27 (1979)
8. 三宅収, 進藤嘉久, 佐藤稔  
「大リーク・ナトリウム-水反応時の準定常圧解析(SWACSコードによるSWAT-3, Run-3実験解析)-大リーク・ナトリウム-水反応解析(第6報)-」PNC SN941 79-24 (1979)
9. 長沼辰二郎, 岸田雅子, 渡辺収  
「大リーク・ナトリウム-水反応コードの総合化-SWACSコードのもんじゅ体系への適用」PNC SJ 206-77-27(2) (1977)
10. 進藤嘉久, 三宅収, 新留二郎, 真鍋二三夫, 田中信夫, 佐藤稔  
「大リーク・ナトリウム-水反応解析コードSWACSの原型炉級蒸気発生器体系への適用試計算について-大リーク・ナトリウム-水反応解析(第4報)-」PNC SN952 79-04 (1979)

- 1 1. F.H. Harllow and A.A. Amsden,  
"A Numerical Fluid Dynamisc Calculation Method for All Speeds"  
J. Comp. Phys., 8, p197 (1971)
- 1 2. V.L. Streeter and E.B. Wylie,  
"Hydraulic Transients", McGraw-Hill Inc., (1967)
- 1 3. T.A. Porsching, J.H. Murphy and J.A. Redfield  
"Stable Numerical Integration of Conservation Equations for Hydraulic  
Networks"  
Nuclear Science and Engineering 43, p218 (1971)
- 1 4. 三宅収, 進藤嘉久, 佐藤稔  
「大リーク・ナトリウム-水反応解析コード-SWACS/REG3-(使用説明書)  
大リーク・ナトリウム-水反応解析(第7報)-」PNC SN952 79-20 (1979)
- 1 5. 三宅収, 進藤嘉久, 田中信夫, 佐藤稔  
「大リーク・ナトリウム-水反応解析コード-SWACS概要説明書-大リーク・ナトリウ  
ム-水反応解析(第3報)-」PNC SN952 78-05 (1978)
- 1 6. 「機械工学便覧-改訂第6版-」日本機械学会 (1977)
- 1 7. H. Ito,  
"Friction Factor for Turbulent Flow in Curved Pipes"  
Rep. Inst. High Sp. Mech., Japan, Vol. 11 (1959/1960)
- 1 8. R.C. Martinelli and D.B. Nelson,  
"Prediction of Pressure Drop During Forced Circulation Boiling of water"  
Trans. ASME Vol. 70 (1948)
- 1 9. J.G. Yevick (Editor)  
"Fast Reactor Technology : Plant Design" p194, The M.I.T. Press.
- 2 0. R.W. Lockhart and R.C. Martinelli,  
"Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-phase, Two-Component  
Flow in Pipes"  
Chem. Eng. Prog. 45(1), (1949)
- 2 1. H.K. Fauske,  
"Contribution to the Theory of Two-phase, One-component Critical Flow"  
ANL-6633 (1962)
- 2 2. 労働省圧力容器構造規格, 第1種圧力容器構造規格第148条
- 2 3. 「管路・ダクトの流体抵抗」日本機械学会 (1979)



# 付 録

## 付録A SWACSコードの構成

### A-1 概要

本文2章で述べたようにSWACSコードはもともと別個に作成された4つのコード（水噴出率計算コード，初期スパイク圧計算コード，圧力波伝播計算コード，準定常圧計算コード）をモジュール化し結合したものである<sup>1)</sup>。

モジュール化された各計算部をコントロールするSWACSのメインプログラムの作成にあたって次のような機能が組込まれた。

- (1) どの計算を行なうかは使用者の任意であり，一連の計算モジュールを連続させて計算を行なうことも，また特定の計算モジュールを単独で実行させることも可能である。
- (2) 計算モジュール間のデータの結合は磁気テープまたはディスクのファイルを通じて行なう。従って使用者はファイルを保存することにより，単独で実行させた計算モジュール間の結合を行なうことができる。
- (3) 背圧を考慮しながら，水噴出率計算と初期スパイク圧計算の連立計算を行なう場合のデータの結合は時間ステップごとにコモンデータで受け渡しを行なう。
- (4) 水噴出率計算はリスタート計算が可能である。
- (5) 各々の計算モジュールの計算結果はリスト出力の他にプロッター用のファイル作成が可能である。

またSWACSコードの作成にあたって初期スパイク圧計算（球・柱モデルナトリウム-水反応コード：SWAC-7）の球モデル計算部は圧力波伝播計算（SWAC-5 K）の境界条件として組み込まれ，SWACSのプログラム構成としては両者はまとまった一つの計算モジュールになっている。（本文4章参照）

### A-2 全体のコントロール

付図A-1にSWACSの計算モジュールの実行手順図を，付図A-2にメインプログラムのフローチャートを示す。

図中で使用されている記号の意味は，

J I J C T	： 水噴出率計算をする（= 1）	しない（= 0）
J I S P B	： 初期スパイク圧計算をする（= 1）	しない（= 0）
J Q S T D	： 準定常圧計算をする（= 1）	しない（= 0）
J I S P B 2	： 圧力波伝播計算をする（= 1）	しない（= 0）
T E I J	： 水噴出率計算終了時刻	
T E S P	： 初期スパイク圧計算終了時刻	

TEQS : 準定常圧計算終了時刻  
TEPR : 圧力波伝播計算終了時刻

図中に現われているサブプログラムの機能は

- (1) BLOCK DATA : インプットデータのゼロイニシアライズを行なう。
- (2) READIN : インプットデータカードの読み込み
  - ① SWACSコントロールデータの読み込み
  - ② 水噴出率計算用インプットデータの読み込み
  - ③ 初期スパイク圧, 圧力波伝播計算用インプットデータの読み込み
  - ④ 準定常圧計算用インプットデータの読み込み
- (3) OUTP : アウトプットのコントロールを行なう。
  - ① 水噴出率計算の計算結果のアウトプット (伝熱管内状態量)
  - ② 水噴出率計算の計算結果のアウトプット (水噴出率)
  - ③ 初期スパイク圧計算, 圧力伝播計算の計算結果のアウトプット
  - ④ 準定常圧計算の計算結果のアウトプット
- (4) INPUT : 水噴出率計算のインプットデータセット→READIN (2)
- (5) TINPUT : 初期スパイク圧, 圧力波伝播計算のインプットデータセット→READIN (3)
- (6) QINPUT : 準定常圧計算のインプットデータセット→READIN (4)
- (7) SWC11 : 水噴出率計算のコントロール
- (8) TFLOW : 初期スパイク圧, 圧力波伝播計算のコントロール
- (9) SWAC13 : 準定常圧計算のコントロール
- (10) TDETM : 水噴出率計算と初期スパイク圧計算の連動計算を行なう場合両者の $\Delta t$ の違いよりMAINでの呼び出し間隔調整のパラメータを計算する。

### A-3 各計算モジュールの構成

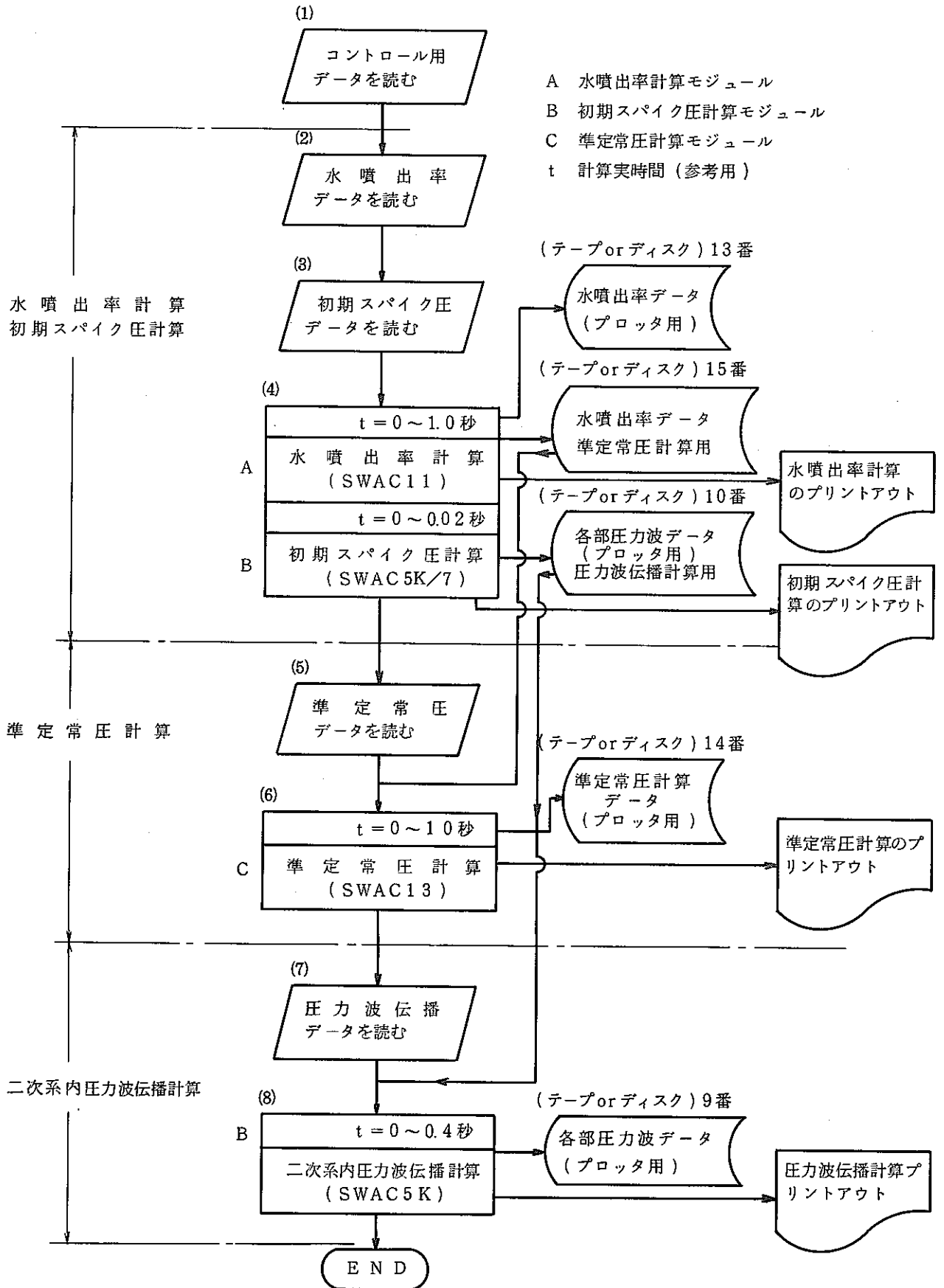
付図A-3に水噴出率計算モジュールの構成，付図A-4に初期スパイク圧計算，圧力波伝播計算モジュールの構成，付図A-5に準定常圧計算モジュールの構成を示す。

### A-4 プログラム・サイズ

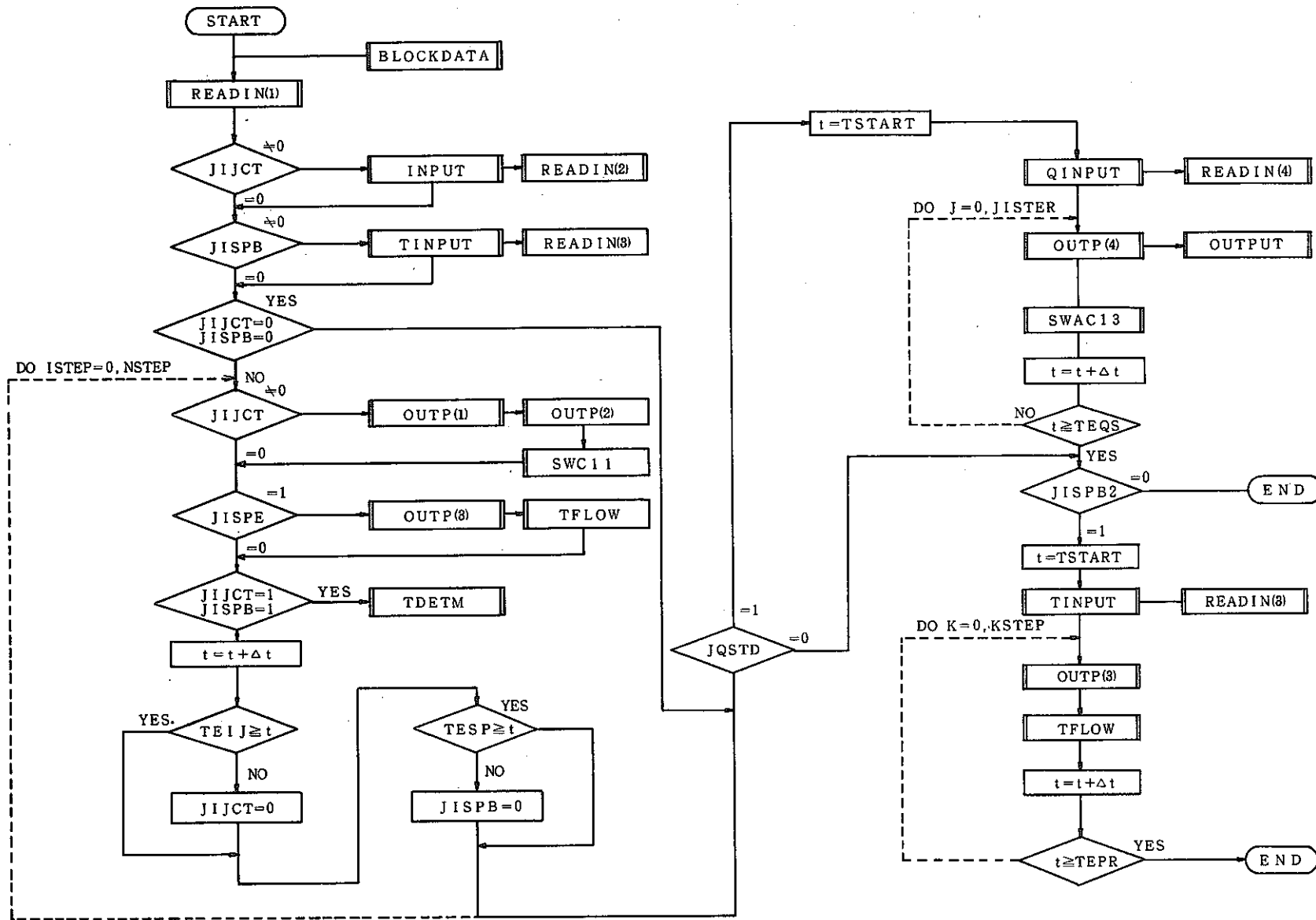
SWACSコードはFACOM230 / 58計算機用に作成されており，使用言語はFORTRAN-IVで，FACOM計算機Eレベル・コンパイラでコンパイルされる。

プログラムサイズは

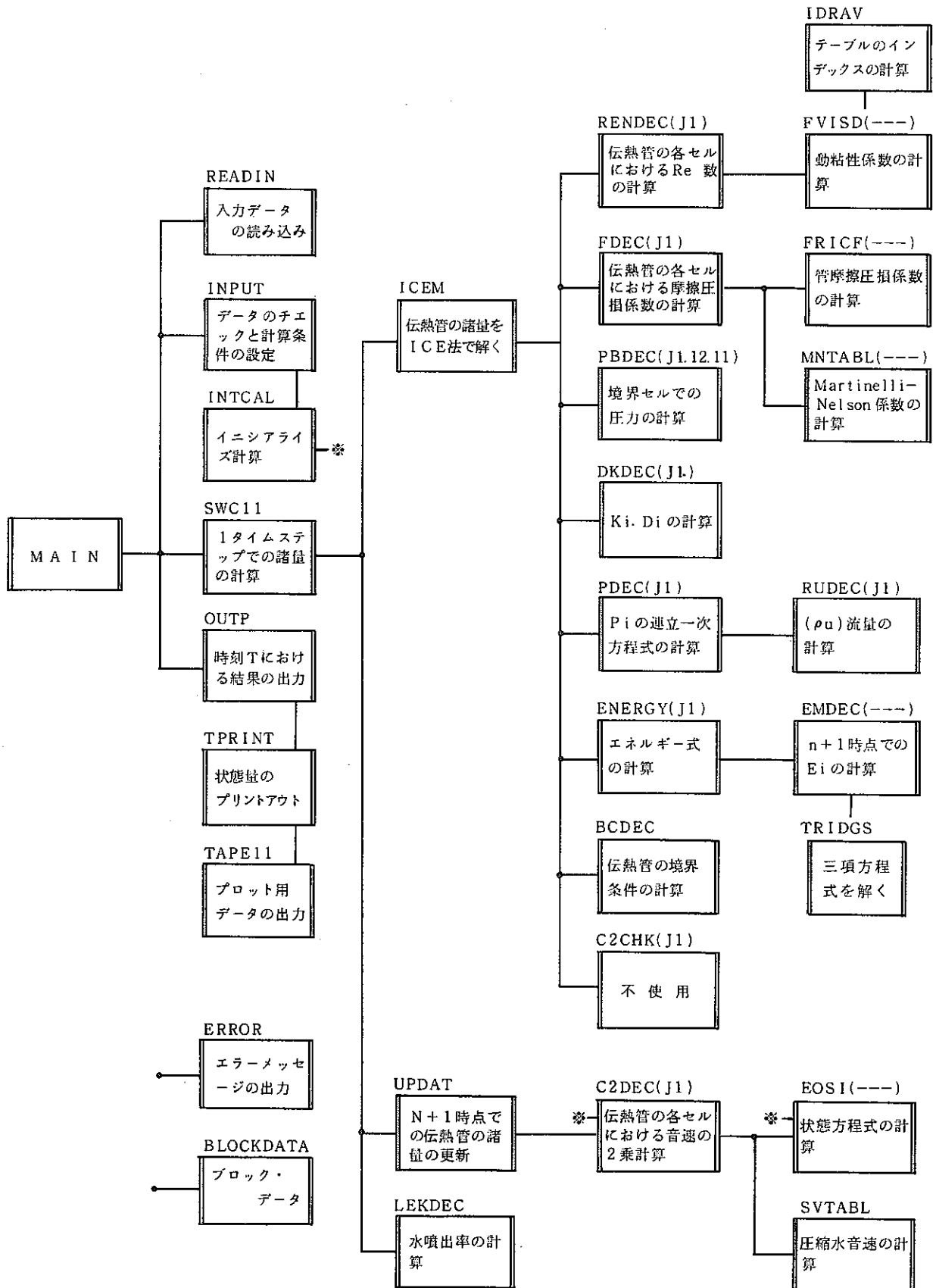
サブプログラム数	95ルーチン
カード枚数	約10,300枚
必要コア容量	約600KB



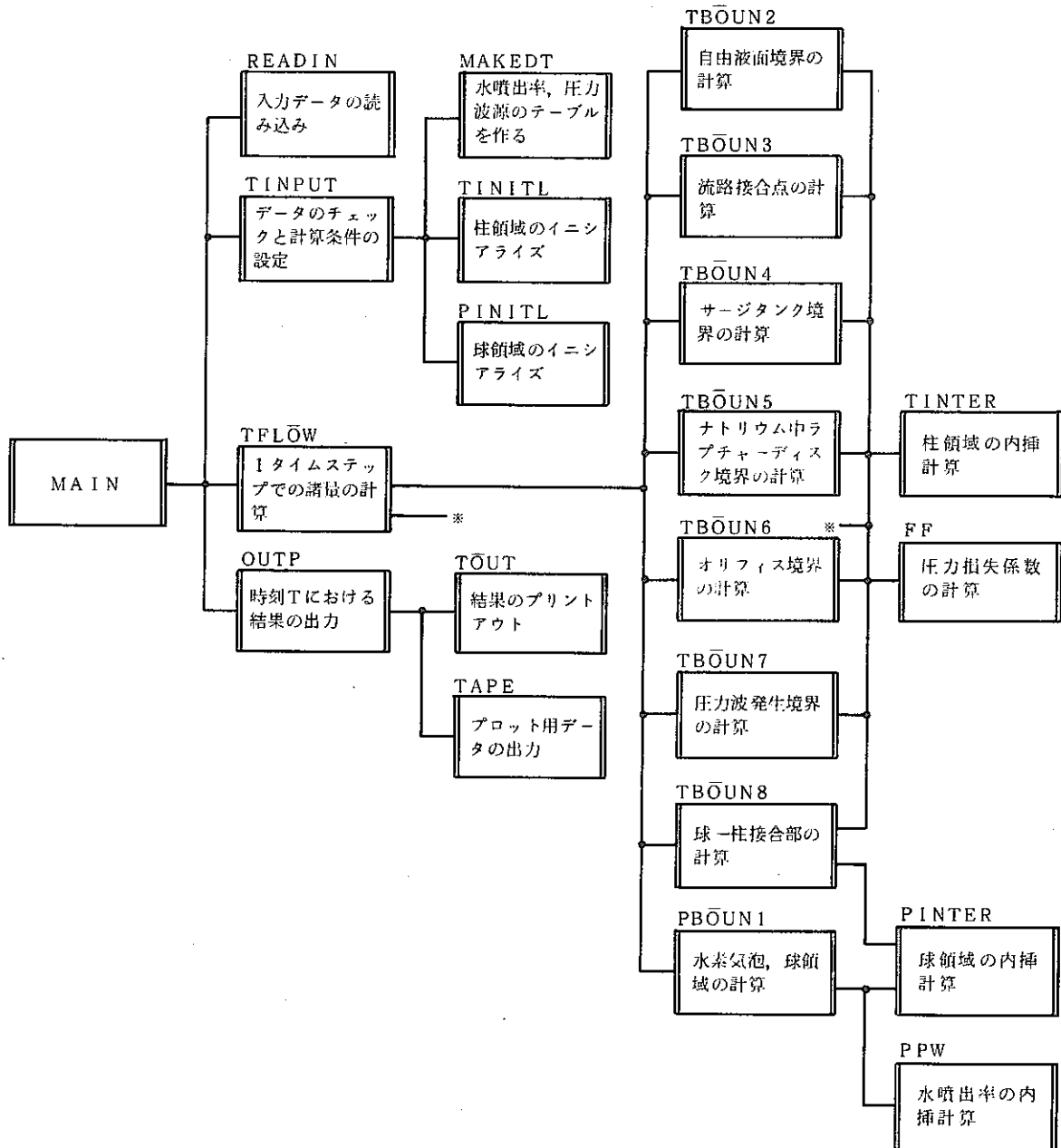
付図A-1 計算モジュールの実行手順



付図A-2 SWACSメインプログラム・フローチャート

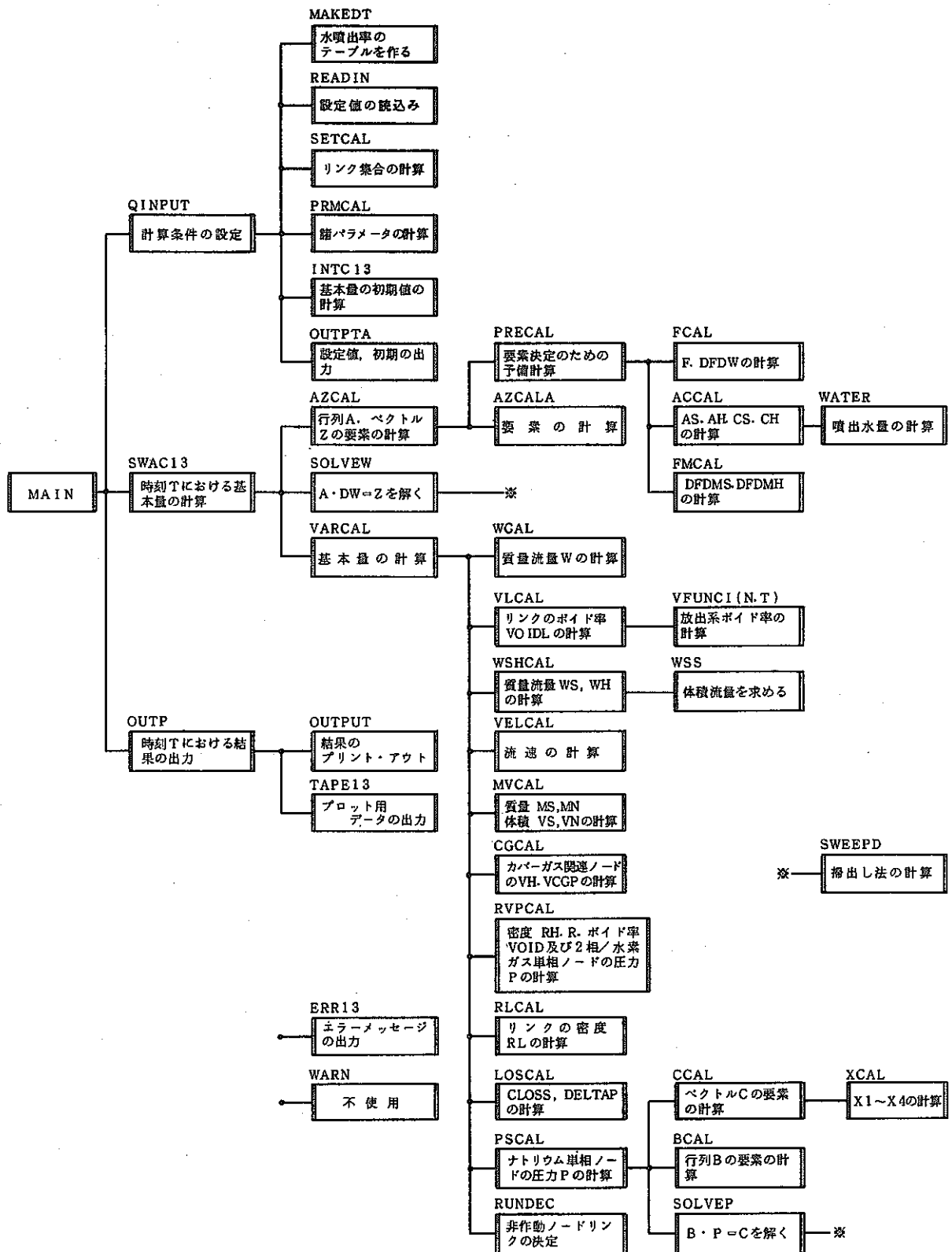


付図 A-3 水噴出率計算モジュールのプログラム構成



付図A-4 初期スパイク圧, 圧力波伝播計算モジュールのプログラム構成





付図 A - 5 準定常圧計算モジュールのプログラムの構成

## 付録B 数値解法の概要

SWACSコードの水噴出率計算，初期スパイク圧計算，圧力波伝播計算，準定常圧計算の基礎式となるものは一次元の質量，運動量ならびにエネルギーの保存式，(ただし，水噴出率計算以外ではエネルギー保存式は解かない)である。

これらの基礎式の解法として，各計算の現象，体系に適した数値解法を選択しなくてはならない。SWACSコードでは水噴出率計算に修正ICE法<sup>11)</sup>，初期スパイク圧計算，圧力波伝播計算に特性曲線法<sup>12)</sup>，準定常圧計算にノード・リンク法<sup>13)</sup>を採用している。

以下に各計算モジュールの数値解法について，差分近似式の導出とその解法，ならびに境界条件の取り扱いについて概略の説明を行う。

### B-1 水噴出率計算

#### B-1-1 概要

水噴出計算で使用されている修正ICE法 (Implicit Continuous-fluid Eulerian) は米国の Los Alamos 研究所の F.H.Harlow と A.A.Amsden により 1971年に発表された非定常圧縮性流体に関する数値解法である<sup>11)</sup>。その主な特徴は i) マッハ数がゼロより無限大まですべての非定常流体が扱える，ii) 状態式の密度変化，連続式のマス・フラックス ( $\rho u$ ) を陰的に扱う，iii) 数値計算の安定向上のための粘性項，質量拡散項の導入，iv) 時間差分の中心を任意にとれる，等である。水噴出率計算ではこの修正ICE法を水/蒸気の一次元流動に適用しており，飽和二相流は均質流として扱っている。以下に一次元の基礎方程式の修正ICE法による解法を説明する。

#### B-1-2 基礎式と差分近似式の解法

基礎式は質量，運動量，エネルギーの各保存式と水/蒸気の状態式であり，以下の (B-1-1) ~ (B-1-6) 式で表わされる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = \tau \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \dots\dots\dots (B-1-1)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2)}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} (P+q) \cdot g + \rho g \cos \theta - \frac{f}{2d} \cdot \frac{(\rho u) \cdot |(\rho u)|}{\rho} \dots\dots\dots (B-1-2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u E)}{\partial x} = \frac{1}{A_j} [\rho u \cos \theta - \frac{\partial (\rho u)}{\partial x}] + Q \dots\dots\dots (B-1-3)$$

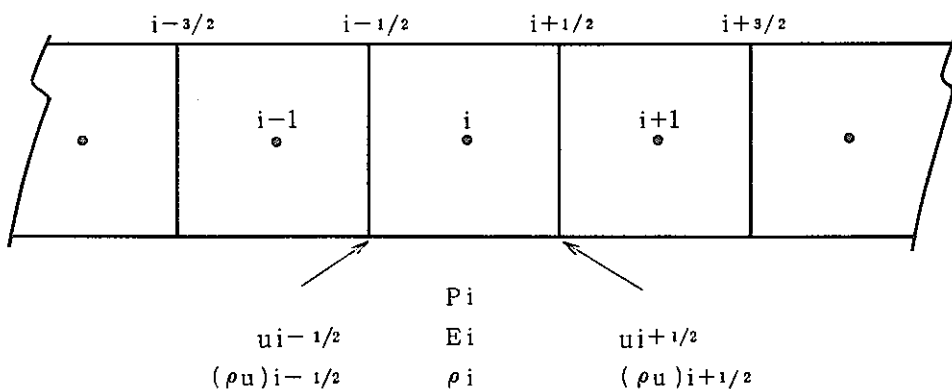
$$E = I + \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{gA_T} \dots\dots\dots (B \cdot 1 - 4)$$

$$\rho = \rho(P, h) \text{ or } \rho(P, I) \dots\dots\dots (B \cdot 1 - 5)$$

$$\left. \begin{aligned} a^2 &= g \cdot \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s \\ a &= a(P, h) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B \cdot 1 - 6)$$

(B・1-1) 式中の  $\tau$  は質量拡散係数, (B・1-2) 式中の  $q$  は粘性項とともに数値計  
 計算上の安定化のため挿入されているものである。(B・1-6) 式は断熱音速式で密度  
 変化を陰的に扱うために使用する。

修正 ICE 法で用いる一次元の差分セルを付図 B・1-1 に示す。



付図 B・1-1 修正 ICE 法の一次元差分セル

体系は、長方形のセル群に分割され、圧力、比重量、エネルギーはセル中心で、速度はセ  
 ル端点で定義される。質量式、エネルギー式はセル中心で、運動量式はセル端点で各々展  
 開することにより次の差分式を得る。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\rho_i^{n+1} - \rho_i^n}{\Delta t} &= \frac{\phi}{\Delta x} [(\rho u)_{i-1/2} - (\rho u)_{i+1/2}]^{n+1} + \frac{1-\phi}{\Delta x} [(\rho u)_{i-1/2} \\ &\quad - (\rho u)_{i+1/2}]^n + \frac{\tau}{\Delta x^2} [\rho_{i+1} + \rho_{i-1} - 2\rho_i]^n \end{aligned} \right. \quad (B \cdot 1 - 7)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{(\rho u)_{i+1/2}^{n+1} - (\rho u)_{i+1/2}^n}{\Delta t} &= \frac{\phi}{\Delta x} [P_i - P_{i+1}]^{n+1} \cdot g + \frac{1-\phi}{\Delta x} [P_i - P_{i+1}]^n \cdot g \\ &\quad + \frac{1}{\Delta x} [(\rho u^2)_i - (\rho u^2)_{i+1}]^n + \frac{1}{\Delta x} [q_i - q_{i+1}] \cdot g \\ &\quad + [(\rho \cos \theta)_{i+1/2}]^n \cdot g - \left[ \frac{f}{2d} \cdot \frac{(\rho u)_{i+1/2} \cdot (\rho u)_{i+1/2}}{\rho_i} \right]^n \end{aligned} \right. \quad (B \cdot 1 - 8)$$

$$\left[ \begin{aligned} \frac{(\rho E)_i^{n+1} - (\rho E)_i^n}{\Delta t} &= \frac{1}{\Delta x} [(\rho u E)_{i-1/2} - (\rho u E)_{i+1/2}]^{n+1} \\ &+ \frac{1}{\Delta x} [(Pu)_{i-1/2} - (Pu)_{i+1/2}]^{n+1} \cdot \frac{1}{A_j} \\ &+ \left\{ \frac{(\rho u)_i}{A_j} \cos \theta + Q \right\}^{n+1} \dots\dots\dots (B \cdot 1-9) \\ [a^2]^n &= \frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\rho_i^{n+1} - \rho_i^n} \cdot g \dots\dots\dots (B \cdot 1-10) \end{aligned} \right.$$

ここで (B・1-7), (B・1-8) 式中の  $\psi$  と  $\phi$  は時間差分の中心を与える重み係数で 0.5 を与えれば Crank-Nicolson 法, 1.0 を与えれば完全陰的後退差分法となる。

(B・1-7), (B・1-8) 式より  $(\rho u)^{n+1}$  を消去し, 更に (B・1-10) 式を使って  $(\rho)^{n+1}$  を音速で置き換え圧力に関する (B・1-11) 式を得る。エネルギー式はエネルギー・フラックス  $(\rho u E)$  を展開し整理して (B・1-12) 式を得る。

$$\beta_{11} \cdot P_{i-1}^{n+1} + \beta_{12} \cdot P_i^{n+1} + \beta_{13} \cdot P_{i+1}^{n+1} = G_i^n \dots\dots\dots (B \cdot 1-11)$$

$$\text{ただし, } \left\{ \begin{aligned} \beta_{11} &= -1, \beta_{12} = \left( 2 + \frac{1}{(a^2)_i^n} \cdot \frac{\Delta x^2}{\phi \psi \Delta t^2} \right), \beta_{13} = -1 \\ G_i^n &= \frac{\Delta x^2}{\phi \psi \Delta t^2} \cdot g \left\{ \frac{P_i}{[a^2]_i} \cdot g + \frac{\Delta t}{\Delta x} [(\rho u)_{i-1/2} - (\rho u)_{i+1/2}] \right. \\ &+ \frac{\phi(1-\phi)\Delta t^2}{\Delta x^2} \cdot g [P_{i-1} + P_{i+1} - 2P_i] + \frac{\phi \Delta t^2}{\Delta x} [R_{i-1/2} - R_{i+1/2}] \\ &+ \frac{\tau \Delta t}{\Delta x^2} [\rho_{i+1} + \rho_{i-1} - 2\rho_i]^n \\ R_{i+1/2} &= \frac{1}{\Delta x} [(\rho u^2)_i - (\rho u^2)_{i+1}]^n + \frac{1}{\Delta x} [q_i - q_{i+1}]^n \cdot g \\ &+ [g \rho \cos \theta]_{i+1/2}^n - \left[ \frac{f}{2d} \cdot \frac{(\rho u)_{i+1/2} | (\rho u)_{i+1/2} |}{\rho_i} \right]^n \end{aligned} \right.$$

$$\beta_{21} \cdot E_{i-1}^{n+1} + \beta_{22} \cdot E_i^{n+1} + \beta_{23} \cdot E_{i+1}^{n+1} = GH_i \dots\dots\dots (B \cdot 1-12)$$

$$\text{ただし, } \left\{ \begin{aligned} \beta_{21} &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot (\rho u)_{i-1/2}^{n+1}, \beta_{22} = \rho_i^{n+1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} [(\rho u)_{i-1/2} - (\rho u)_{i+1/2}]^{n+1} \\ \beta_{23} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot (\rho u)_{i+1/2}^{n+1} \end{aligned} \right.$$

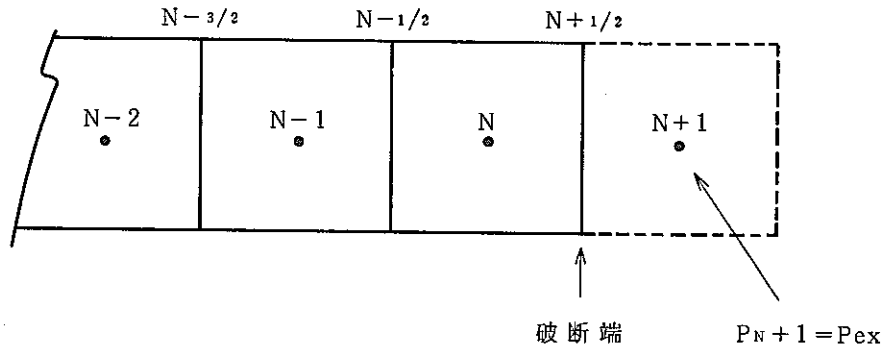
$$\left\{ \begin{aligned} GH_i &= (\rho E)_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} [(Pu)_{i-1/2} - (Pu)_{i+1/2}]^{n+1} \cdot \frac{1}{A_j} \\ &+ [(\rho u) \cos \theta / A_j + Q_i]^{n+1} \cdot \Delta t \end{aligned} \right.$$

(B・1-11), (B・1-12) 式の各々の連立方程式より次の手順で計算を行う。

- i) 計算サイクルのはじめに必要な諸係数を計算する。
- ii) (B・1-11) 式により各セルの圧力 ( $P_i^{n+1}$ ) を計算する。
- iii) (B・1-8) 式により各セル端の流量 ( $(\rho u)_{i\pm 1/2}^{n+1}$ ) を計算する。
- iv) (B・1-12) 式により各セルのエネルギー ( $E_i^{n+1}$ ) を計算する。
- v) 圧力, 流量, エネルギー以外の ( $n+1$ ) ステップの諸量を計算する。
- vi) ( $n+1$ )  $\rightarrow$  ( $n$ ) と置きかえて i) にもどる。

B-1・3 境界条件

(1) 破断端境界



付図B・1-2 破断開放端のセルの扱い

付図B・1-2に示すように, 破断端の外側(管外)にセルを1ヶ設ける。このセルの圧力は境界条件として入力で与えるので既知である。従って(B・1-11)式の圧力式は次式となる。

$$\beta_{11} \cdot P_{N-1}^{n+1} + \beta_{12} \cdot P_N^{n+1} = P_{ex} + G_N^n \dots\dots\dots (B \cdot 1 - 13)$$

(B・1-13) 式中で破断端での臨界流条件を支配する要因は係数  $G_N^n$  に含まれるモーメント・フラックスの取り扱いである。SWACSコードでは次のように線形外挿で扱っている。

$$\frac{1}{\Delta x} [(\rho u^2)_N - (\rho u^2)_{N+1}] \rightarrow \frac{2}{\Delta x} [(\rho u^2)_N - (\rho u^2)_{N+1/2}]$$

$$\rightarrow \frac{2}{\Delta X} \left[ \frac{(\rho u)_{N-1/2} \cdot (\rho u)_{N+1/2}}{\rho_N} - \frac{\{(\rho u)_{N+1/2}\}^2}{\rho_{N+1/2}} \right] \dots\dots\dots (B \cdot 1-14)$$

ただし  $\rho_{N+1/2} \rightarrow \rho_N + (\rho_N - \rho_{N-1})/2$

ここで  $(\rho u)_{N+1/2}$  は破断端のマス・フラックスで水リーク率を与える。

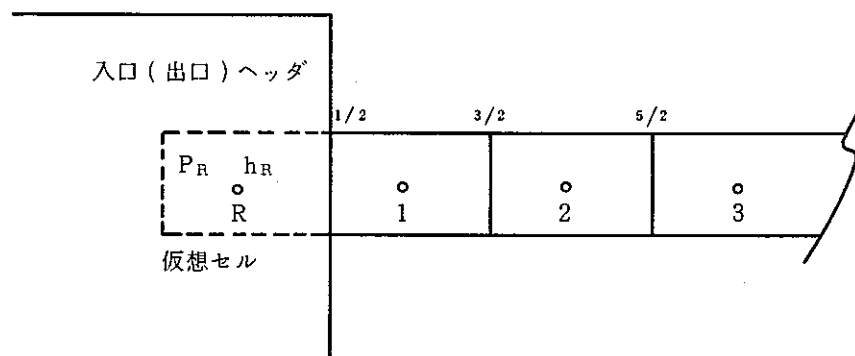
エネルギー式については破断端セル(N)と管外セル(N+1)の間で全エネルギー E が等しいと仮定する。従って (B・1-12) 式のエネルギー式は次式となる。

$$\beta_{21} \cdot E_{N-1}^{n+1} + \beta_{22}' \cdot E_N^{n+1} = GH_N \dots\dots\dots (B \cdot 1-15)$$

ただし,

$$\beta_{22}' = \rho_N^{n+1} - \frac{\Delta t}{\Delta X} \left[ \frac{1}{2} (\rho u)_{i-1/2} - (\rho u)_{i+1/2} \right]^{n+1}$$

(2) ヘッダ側境界 (圧力, エンタルピー一定境界)



付図 B・1-3 ヘッダ側境界のセルの扱い

ヘッダ側の境界については付図B・1-3に示すように、ヘッダ内状態(R)より1番目のセルの状態を次式で設定する。

$$\left. \begin{aligned} P_1^{n+1} &= P_R - K_R \left[ \frac{1}{2g} \cdot \rho_{1/2}^n \cdot u_{1/2}^2 \right]^n \\ u_{1/2}^n &= 2u_{3/2}^n - u_{5/2}^n \\ \rho_{1/2}^n &= \frac{1}{2} (\rho_R + \rho_1^n) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B \cdot 1-16)$$

圧力式は上記の  $P_1^{n+1}$  を用いて,

$$\beta_{12} \cdot P_2^{n+1} + \beta_{13} \cdot P_3^{n+1} = P_1^{n+1} + G_2^n \dots\dots\dots (B \cdot 1-17)$$

エネルギー式については1番目のセルのエンタルピーを次式でおく。

$$h_1 = \frac{1}{2} (h_R + h_2) \dots\dots\dots (B \cdot 1 - 18)$$

従って、1番目のセルの全エネルギーは次式で表わされる。

$$E_1 = \frac{1}{2} E_2 + \frac{1}{2} \left[ h_R + \frac{1}{gA_J} (u_1^2 - u_2^2) + 2 \left( \frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1} \right) \cdot \frac{1}{A_J} \right] \dots\dots\dots (B \cdot 1 - 19)$$

(B・1-19) 式を (B・1-12) 式に代入することにより次式を得る。

$$\beta_{22}'' \cdot E_2 + \beta_{23} \cdot E_3 = GH_2 + GHA \dots\dots\dots (B \cdot 1 - 20)$$

ただし、

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_{22}'' = \rho_2^{n+1} - \frac{3}{4} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \left[ (\rho u)_{3/2} - \frac{2}{3} (\rho u)_{3/2} \right]^{n+1} \\ GHA = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} (\rho u)_{3/2} \left[ h_R + \frac{1}{g \cdot A_J} (u_1^2 - u_2^2) + \frac{2}{A_J} \left( \frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1} \right) \right]^{n+1} \end{array} \right.$$

## B - 2 初期スパイク圧計算および圧力波伝播計算

### B - 2 - 1 概 要

初期スパイク圧計算および圧力波伝播計算で使用されている特性曲線法は圧縮性流体の水撃現象を解く古典的解法として広く使用されているものである<sup>12)</sup>。その主な特徴は i) 液体中の圧力波伝播特性を解くのに適する、ii) 流体の流速として、0～音速の範囲で適用性に優れる、iii) 陽解法とした場合にも安全性が優れている、等である。初期スパイク圧計算では、一次元球座標（球モデル）、一次元直線座標（柱モデル）について、また圧力波伝播計算では一次元直線座標についての水撃方程式に特性曲線法を適用しており、以下に特性曲線法の概略を示す。

### B - 2 - 2 基礎式より特性方程式の導出

基礎式は一次元の質量、運動量の各保存式であり、次の (B・2-1)、(B・2-2) 式で表わされる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{f}{2d} u |u| + g \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 2)$$

圧力ヘッド H (以下単に圧力と略す) は次式で定義される。

$$H \equiv \frac{P}{\rho} \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 3)$$

ここで  $\rho$  の変化は H の変化に比べて小さいので、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} &\approx \rho \frac{\partial H}{\partial t} \\ \frac{\partial P}{\partial x} &\approx \rho \frac{\partial H}{\partial x} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 4)$$

また  $\rho$  と P の間に次の関係がある。

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{g}{C^2} \frac{dP}{dt} \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 5)$$

ただし  $d/dt$  は Lagrange の微分で次式である。

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 6)$$

(B・2-1) ~ (B・2-5) 式を整理して次の水撃方程式が得られる。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= - \frac{C^2}{g} \frac{\partial u}{\partial x} \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 7) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} - \frac{1}{g} \frac{du}{dt} &= \frac{\partial H}{\partial x} - \sin \varphi + \frac{f}{2dg} u |u| \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 8) \end{aligned} \right.$$

(B・2-7), (B・2-8) 式は双曲型偏微分方程式であり, 次の特性曲線傾きに関する特性方程式 (常微分形) に帰着する。

i) 特性曲線傾き

$$(u^2 - c^2) \xi^2 - 2u\xi + 1 = 0 \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 9)$$

$$\therefore \left. \begin{aligned} \xi_+ &= \left( \frac{dt}{dx} \right)_+ = 1 / (u + C) \\ \xi_- &= \left( \frac{dt}{dx} \right)_- = 1 / (u - C) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 10)$$

ii) 特性方程式

$\xi_+$  に関して

$$du + \frac{g}{C} dH + \left[ -\frac{f}{2d} u |u| - g \sin \varphi \right] dt = 0 \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 11)$$

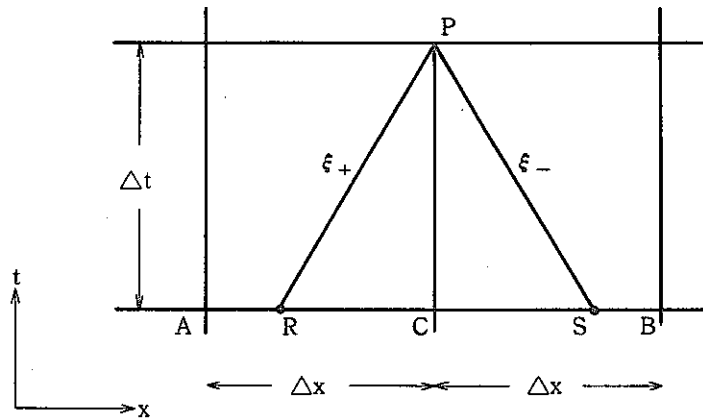
$\xi_-$  に関して



$$du - \frac{g}{C} dH + \left\{ -\frac{f}{2d} |u| |u| - g \sin \varphi \right\} dt = 0 \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 12)$$

B - 2 - 3 差分近似式と解法

(B・2-11), (B・2-12) 式の特性方程式を下図の固定格子に従い差分近似する。



付図 B・2-1 特性曲線法の差分格子 (直線座標系)

$$\begin{cases} [u_P - u_R] + \frac{g}{C} [H_P - H_R] + \left\{ -\frac{f}{2d} u_R |u_R| - g \sin \varphi \right\} \Delta t = 0 \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 13) \\ [u_P - u_S] - \frac{g}{C} [H_P - H_S] + \left\{ -\frac{f}{2d} u_S |u_S| - g \sin \varphi \right\} \Delta t = 0 \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 14) \end{cases}$$

$u_P, u_R, u_S, H_P, H_R, H_S$  は各々付図 B・2-1 の P, R, S 点に対応する流速と圧力である。

(B・2-13), (B・2-14) 式より結局次式を得る。

$$\begin{cases} u_P = \frac{1}{2} [u_R + u_S] + \frac{g}{2C} [H_R - H_S] \\ \quad + \frac{\Delta t}{2} \left\{ \frac{f}{2d} u_R |u_R| + \frac{f}{2d} u_S |u_S| - 2g \sin \varphi \right\} \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 15) \\ H_P = \frac{C}{2g} [u_R - u_S] + \frac{1}{2} [H_R + H_S] \\ \quad + \frac{C \Delta t}{2g} \left\{ -\frac{f}{2d} u_R |u_R| - \frac{f}{2d} u_S |u_S| \right\} \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 16) \end{cases}$$

(B・2-15), (B・2-16) 式の計算に必要な R, S 点の流速, 圧力は A, B, C 点より内挿して求める。

特性曲線法の解の安定条件は付図 B・2-1 より明らかなように次式である。

$$\Delta t \leq |\xi| \cdot \Delta x = \frac{\Delta x}{|u \pm C|} \approx \frac{\Delta x}{C} \dots\dots\dots (B \cdot 2-17)$$

(B・2-17) 式は Courant の条件と呼ばれる。

B-2・4 球座標系の特性方程式

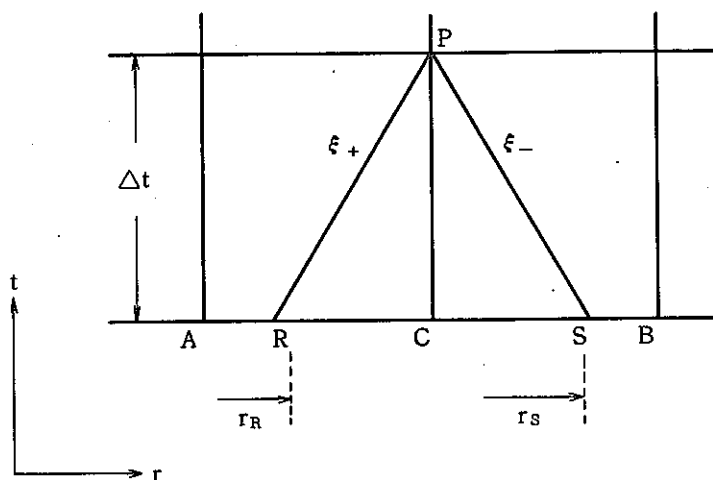
一次元の球座標系についても上述と同様に特性方程式を得ることができる。次の (B・2-18, 19) 式に水撃方程式を, (B・2-20~23) 式に特性方程式の差分式を各々球座標系について示す。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial t} = -u \frac{\partial H}{\partial r} - \frac{C^2}{g} \left( \frac{\partial u}{\partial r} + 2 \frac{u}{r} \right) \dots\dots\dots (B \cdot 2-18) \\ -\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{g} \cdot u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial H}{\partial r} \dots\dots\dots (B \cdot 2-19) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_+ = \left( \frac{\Delta t}{\Delta r} \right)_+ = 1 / (u+C) \dots\dots\dots (B \cdot 2-20) \\ \xi_- = \left( \frac{\Delta t}{\Delta r} \right)_- = 1 / (u-C) \dots\dots\dots (B \cdot 2-21) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [u_P - u_R] + \frac{g}{C} [H_P - H_R] + 2C \cdot \frac{u_R}{r_R} \cdot \Delta t = 0 \dots\dots\dots (B \cdot 2-22) \\ [u_P - u_S] - \frac{g}{C} [H_P - H_S] - 2C \cdot \frac{u_S}{r_S} \cdot \Delta t = 0 \dots\dots\dots (B \cdot 2-23) \end{array} \right.$$

(B・2-22), (B・2-23) 式より  $u_P, H_P$  は次式で与えられる。



付図 B・2-2 特性曲線法の差分格子 (球座標系)

$$\begin{cases} u_P = \frac{1}{2} [u_R + u_S] + \frac{g}{2C} [H_R - H_S] - C \left\{ \frac{u_R}{r_R} - \frac{u_S}{r_S} \right\} \Delta t \dots\dots\dots (B \cdot 2-24) \\ H_P = \frac{C}{2g} [u_R - u_S] + \frac{1}{2} [H_R + H_S] - \frac{C^2}{g} \left\{ \frac{u_R}{r_R} + \frac{u_S}{r_S} \right\} \Delta t \dots\dots\dots (B \cdot 2-25) \end{cases}$$

B-2・5 境界条件

(1) 水素ガス気泡境界

水素ガス気泡の圧力は理想気体の等温変化式で次式で表わされる。

$$H_P = \frac{P_G}{\rho_{Na}} = \frac{n \cdot R_0 \cdot T_G}{Q_G} \dots\dots\dots (B \cdot 2-26)$$

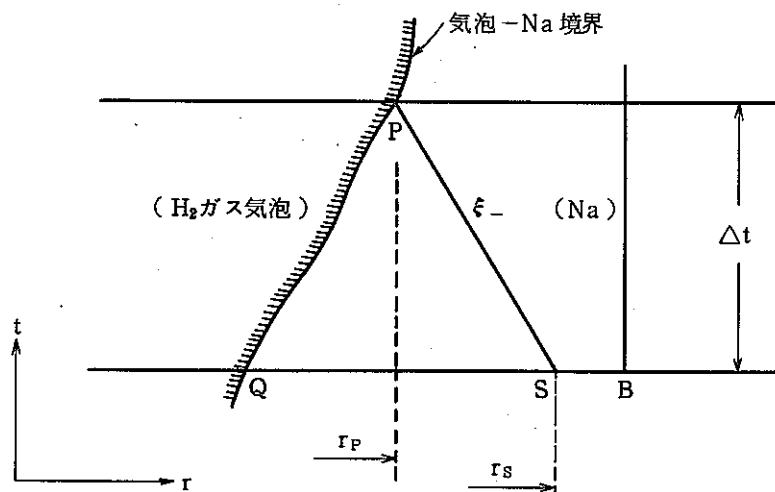
$$n = \frac{F}{0.018} \cdot \int_0^t q_w \cdot dt \dots\dots\dots (B \cdot 2-27)$$

$$Q_G = \frac{2}{3} \pi (r_{P1}^3 + r_{P2}^3) \dots\dots\dots (B \cdot 2-28)$$

ここで  $H_P$  は気泡圧(ナトリウムヘッド換算)、 $n$  は水素ガスモル数、 $Q_G$  は気泡体積である。気泡は球状に成長すると仮定し、更に上半球、下半球と区別する。 $r_{P1}$ 、 $r_{P2}$  は各々上半球、下半球の気泡半径である。

他方、ナトリウム球領域の特性方程式は (B・2-23) 式を変形して次式となる。

$$\{u_P - u_S\} - \frac{g}{C} [H_P - H_S] + \frac{2}{r} \left( \frac{uC}{u-C} \right) \cdot [r_P - r_S] = 0 \dots\dots\dots (B \cdot 2-29)$$



付図 B・2-3 気泡-ナトリウム境界の差分格子

(B・2-29) 式に更に次の関係を用いる。

$$\left. \begin{aligned} 2C \cdot \frac{u}{r} &\rightarrow C \left[ \frac{u_P}{r_P} + \frac{u_S}{r_S} \right] \\ u - C &\rightarrow \frac{1}{2} (u_P + u_S) - C \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 30)$$

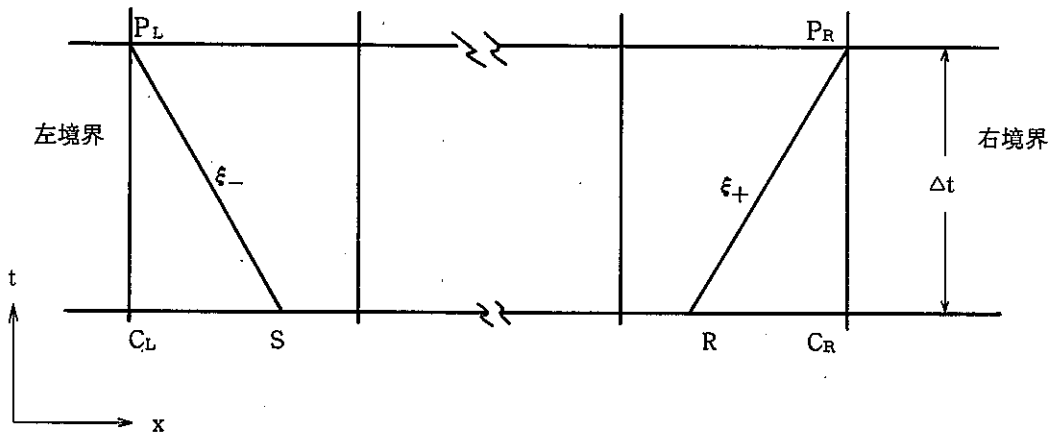
(B・2-30) 式を (B・2-29) 式に代入して、次式を得る。

$$u_P = u_S + \frac{g}{C} [H_P - H_S] + \frac{C \left[ \frac{u_P}{r_P} + \frac{u_S}{r_S} \right]}{C - \frac{1}{2} (u_P + u_S)} [r_P - r_S] \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 31)$$

気泡／ナトリウム界面の移動速度 ( $=u_P$ ) について (B・2-26) 式と (B・2-31) 式を反復法により解くことにより、諸量が更新される。

(2) 一分岐境界

一分岐境界は、圧力あるいは流速のどちらか片方が一定、または時間関数として既知である境界を指す。具体的には、容量の大きなリザーバは圧力一定境界で、盲端は流速一定 ( $=0$ ) 境界として扱う。また圧力波伝播計算では圧力波発生点は圧力時間関数が既知であるとして扱われる。



付図B・2-4 一分岐境界の差分格子

境界部の圧力、流速を計算する差分式は (B・2-13), (B・2-14) 式より導びくことができる。圧力が一定 (あるいは既知時間関数) の場合、境界の流速を与える式は  $H_{PL}$ ,  $H_{PR}$  を既知として次のように表わされる。

$$\begin{cases} u_{PL} = u_s + \frac{g}{C} (H_{PL} - H_s) - \left\{ \frac{f}{2d} u_s |u_s| - g \sin \varphi \right\} \Delta t & \dots\dots\dots (B \cdot 2-32) \\ u_{PR} = u_R - \frac{g}{C} (H_{PR} - H_R) - \left\{ \frac{f}{2d} u_R |u_R| - g \sin \varphi \right\} \Delta t & \dots\dots\dots (B \cdot 2-33) \end{cases}$$

流速が一定の場合、境界の圧力を与える式は、 $u_{PL}$ 、 $u_{PR}$  を既知として次のように表わされる。

$$\begin{cases} H_{PL} = H_s + \frac{C}{g} (u_{PL} - u_s) + C \left\{ \frac{f}{2dg} u_s |u_s| - \sin \varphi \right\} \Delta t & \dots\dots\dots (B \cdot 2-34) \\ H_{PR} = H_R - \frac{C}{g} (u_{PR} - u_R) - C \left\{ \frac{f}{2dg} u_R |u_R| - \sin \varphi \right\} \Delta t & \dots\dots\dots (B \cdot 2-35) \end{cases}$$

(3) 自由液面境界

自由液面境界の扱いは、圧力一定境界の扱いに類似している。計算の手順は以下の通りである。

- i) 境界端の流速を (B・2-32) あるいは (B・2-33) 式で計算する。
- ii) 液面の変位を次式で計算する。

$$\Delta L = \frac{1}{2} (u_p + u_0) \Delta t \quad \dots\dots\dots (B \cdot 2-36)$$

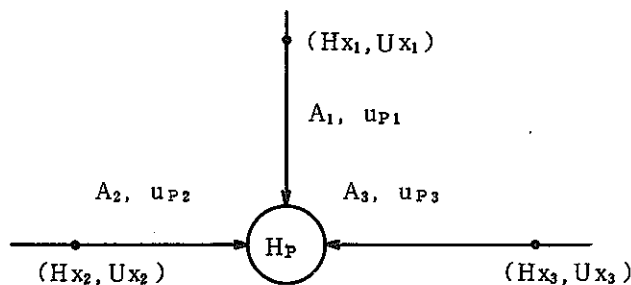
ただし  $u_0$  は更新前、 $u_p$  は更新後の境界端流速である。

- iii) 自由液面上のガス空間を断熱変化とし、圧力を計算する。

$$P_c = P_{c0} \left( \frac{HFS}{HFS - \sum \Delta L} \right)^\kappa \quad \dots\dots\dots (B \cdot 2-37)$$

ここで  $P_{c0}$  はガス空間の初期圧、 $HFS$  はガス空間初期長さ、 $\kappa$  は断熱指数である。

(4) 流路分岐境界



付図B・2-5 流路分岐境界

流速(u)は分岐に流れ込む方向を正にとると、連続の式により

$$\sum_i A_i \cdot u_{Pi} = 0 \quad \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 38)$$

(B・2-14) 式より (xi (i=1~3) は特性曲線の足の座標を示す)

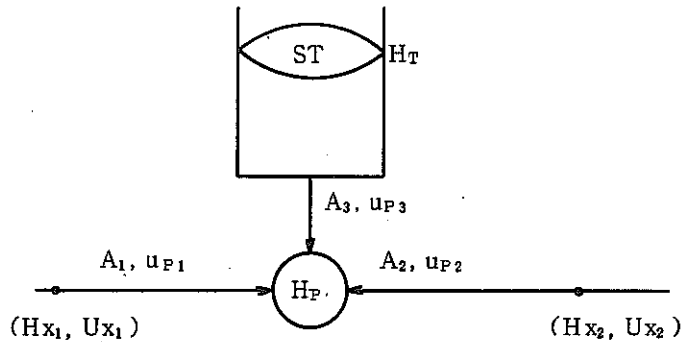
$$\left. \begin{aligned} A_1 u_{P1} &= A_1 \left\{ u_{x1} - \frac{g}{C_1} (H_P - H_{x1}) - \left[ \frac{f_1}{2d_1} u_{x1} |u_{x1}| - g \sin \varphi_1 \right] \Delta t \right\} \\ A_2 u_{P2} &= A_2 \left\{ u_{x2} - \frac{g}{C_2} (H_P - H_{x2}) - \left[ \frac{f_2}{2d_2} u_{x2} |u_{x2}| - g \sin \varphi_2 \right] \Delta t \right\} \\ A_3 u_{P3} &= A_3 \left\{ u_{x3} - \frac{g}{C_3} (H_P - H_{x3}) - \left[ \frac{f_3}{2d_3} u_{x3} |u_{x3}| - g \sin \varphi_3 \right] \Delta t \right\} \end{aligned} \right\} (B \cdot 2 - 39)$$

(B・2-38), (B・2-39) 式より,

$$H_P = \frac{\sum_i A_i \left\{ u_{xi} + \frac{g}{C_i} H_{xi} - \left[ \frac{f_i}{2d_i} u_{xi} |u_{xi}| - g \sin \varphi_i \right] \Delta t \right\}}{\sum_i \left( A_i \frac{g}{C_i} \right)} \quad \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 40)$$

$u_{P1}, u_{P2}, u_{P3}$  は各々 (B・2-39) 式より計算することができる。

(5) サージタンク接合点



付図B・2-6 サージタンク接合点

サージタンク接合点の扱いは、(4)の多分岐境界の扱いを変形したものである。(B・2-38), (B・2-39) 式に加えて、次式を使用する。

$$H_P = H_T - \frac{A_3}{ST} \cdot \frac{1}{2} (u_{P3} + u'_{P3}) - \frac{ZT}{2g} \cdot u_{P3} |u_{P3}| \quad \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 41)$$

ここで  $u'_{P3}$  は更新前,  $u_{P3}$  は更新後のサージタンク入口配管流速,  $A_3$  はサージタンク入口配管断面積,  $ST$  はサージタンク断面積,  $ZT$  はサージタンク入口配管圧損係

数,  $H_T$  はサージタンク圧である。

(B・2-38), (B・2-39), (B・2-41) 式を  $u_{P3}$  について整理すると,

$$a \cdot u_{P3}|u_{P3}| + b \cdot u_{P3} + c = 0 \quad \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 42)$$

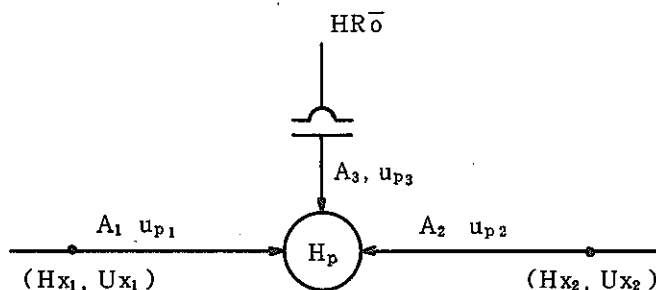
ただし,

$$\begin{cases} a = \frac{Z T}{2 g} \\ b = A_3 \left\{ \frac{\Delta t}{2 S_T} + \frac{1}{g \sum_i (A_i / C_i)} \right\} \\ c = -H_T + \left( \frac{A_3 \cdot \Delta t}{2 \cdot S_T} \right) \cdot u_{P3}' \end{cases}$$

$$+ \frac{1}{g \sum_i (A_i / C_i)} \sum_i A_i \left[ u_{x1} + \frac{g}{C_i} H_{x1} - \left( \frac{f}{2d} u_{x1} |u_{x1}| - g \sin \varphi_i \right) \Delta t \right]$$

(B・2-42) 式の 2 次方程式より  $u_{P3}$  を求め, 次に (B・2-41) 式より  $H_p$  を求めることができる。

(6) ナトリウム中ラプチャーディスク接合点



付図 B・2-7 ナトリウム中ラプチャーディスクの圧損係数

接合点の圧力がラプチャーディスクの破裂圧に達するまでは特別な計算は行わない。すなわち上図で  $u_{P3} = 0$  とおいて(4)で示した計算を行う。  $H_p$  が入力データで指定する破裂圧を越えた場合は次式を用いる。

$$H_p = H_{R0} - \frac{Z R}{2 g} u_{P3}|u_{P3}| \quad \dots\dots\dots (B \cdot 2 - 43)$$

ここで  $H_{R0}$  は開放系背圧,  $Z R$  はラプチャーディスクの圧損係数である。

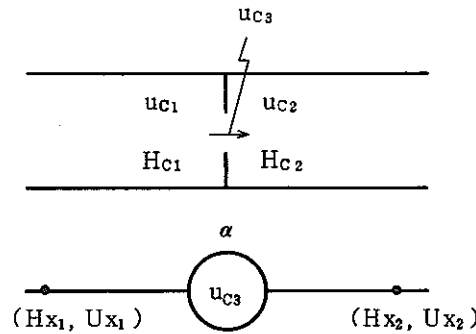
サージタンク接合点の扱いと同様の整理法により次式を得ることができる。

$$a \cdot u_{P3}|u_{P3}| + b \cdot u_{P3} + c = 0 \quad \dots\dots\dots (B \cdot 2-44)$$

ただし、

$$\begin{cases} a = \frac{ZR}{2g} \\ b = A_3 / g \sum_i (A_i / C_i) \\ c = \frac{1}{g \sum_i (A_i / C_i)} \cdot \sum_i A_i \left\{ u_{xi} + \frac{g}{C_i} H_{xi} - \left( \frac{f}{2d} u_{xi} |u_{xi}| - g \sin \phi_i \right) \Delta t \right\} - H_{R0} \end{cases}$$

(7) オリフィス接合点



付図B・2-8 オリフィス接合点

オリフィス接合点では次の関係式が成りたつと仮定する。

$$u_{c3} = \sqrt{2g(H_{c1} - H_{c2})} \quad \dots\dots\dots (B \cdot 2-45)$$

$$u_{c1} = u_{c2} = \alpha u_{c3} \quad \dots\dots\dots (B \cdot 2-46)$$

ここで $\alpha$ はオリフィス係数、添字C1, C2はオリフィス両側の状態を表わす。 $u_{c3}$ はオリフィスを通過する流速である。

(B・2-13), (B・2-14)式に示した特性方程式より、

$$\left. \begin{aligned} [u_{c1} - u_{x1}] + \frac{g}{C} [H_{c1} - H_{x1}] + \left[ \frac{f}{2d} u_{x1} |u_{x1}| \right] \Delta t = 0 \\ [u_{c2} - u_{x2}] + \frac{g}{C} [H_{c2} - H_{x1}] + \left[ \frac{f}{2d} u_{x2} |u_{x2}| \right] \Delta t = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B \cdot 2-47)$$



(B・2-45), (B・2-46), (B・2-47) 式を整理して次式を得ることができる。

$$a \cdot u_{c3}^2 + b \cdot u_{c3} + c = 0 \quad \dots\dots\dots (B \cdot 2-48)$$

ただし,

$$\begin{cases} a = \frac{1}{2g} \\ b = \alpha \\ c = -\{u_{x1} + u_{x2}\} - \frac{g}{C} \{H_{x1} - H_{x2}\} + \left\{ \frac{f}{2d} u_{x1} |u_{x1}| + \frac{f}{2d} u_{x2} |u_{x2}| \right\} \Delta t \end{cases}$$

### B-3 準定常圧計算

#### B-3・1 概要

準定常圧計算は広く流体の過渡現象の解法として使用されているノード・リンク法 (ボリューム・ジャンクション法) を用いている<sup>13)</sup>。ノード・リンク法は計算対象となる体系を領域 (ノード) と流路 (リンク) からなるネットワーク・モデルにモデル化するため計算の基礎式自体は一次元の方程式であるが, 擬似的に多次元体系の効果等も考慮できるという特徴をもつ。またプラントのシミュレーションとして不可欠なプラント機器の動作 (弁, ラプチャーディスク等) もプログラムに組み入れることが容易である。

準定常圧計算は, 蒸気発生器ならびに二次冷却系, 放出系を上述のノードリンクのネットワーク・モデルに分割し, ナトリウムと水素ガスの流動を計算するものである。

以下にノード・リンク法による差分式の数値解法について述べる。

#### B-3・2 基礎式と差分近似式

基礎式はナトリウム, 水素ガス各々の質量保存式, 非圧縮性の運動量保存式, ならびに水素ガスの状態式 (理想気体の等温変化式) であり, 次の (B・3-1) ~ (B・3-3) 式で表わされる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial s} (\rho u) \quad \dots\dots\dots (B \cdot 3-1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{g} u \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial h}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial \tau}{\partial s} = 0 \quad \dots\dots\dots (B \cdot 3-2)$$

$$P \cdot V_{H_2} = M_{H_2} \cdot R \cdot T_{H_2} \quad \dots\dots\dots (B \cdot 3-3)$$

質量保存式はノードの流入出よりナトリウム, 水素ガスの各々について次のように表わされる。(図5-1を参照)

$$\dot{M}_{S1} = \sum_{\nu \in T1} W_{S\nu} - \sum_{\nu \in I1} W_{S\nu} \dots\dots\dots (B \cdot 3-4)$$

$$\dot{M}_{H1} = \sum_{\nu \in T1} W_{H\nu} - \sum_{\nu \in I1} W_{H\nu} + Q_1 \dots\dots\dots (B \cdot 3-5)$$

また運動量保存式はリンク（流路）に沿って積分することにより次式となる。

$$\dot{W}_k = \frac{1}{\sum_j \left( \frac{L_{kj}}{A_{kj}} \right)} \left[ (P_i - P_j) g + \frac{W_k^2}{2\rho_k} \left( \frac{1}{A_i^2} - \frac{1}{A_j^2} \right) + \rho_k g \Delta h - g P_{fk} \right] \dots\dots (B \cdot 3-6)$$

(B・3-4) , (B・3-5) , (B・3-6) の3式を全ノード・リンクについて連立させて解くことにより、流量を更新し、さらに状態式より圧力を計算することができる。

(B・3-4) ~ (B・3-6) 式を次のようにおく。

$$\frac{dW_k}{dt} = F_k (P, W) \dots\dots\dots (B \cdot 3-7)$$

$$\frac{dM_{S1}}{dt} = G_1 (W) \dots\dots\dots (B \cdot 3-8)$$

$$\frac{dM_{H1}}{dt} = H_1 (W) \dots\dots\dots (B \cdot 3-9)$$

(B・3-7) ~ (B・3-9) 式はネットワークについて次の差分近似式で表わすことができる。<sup>12)</sup>

$$[ I - h \cdot dF^n ] \Delta y^{n+1} = h F^n \dots\dots\dots (B \cdot 3-10)$$

ただし、

$$I \equiv \begin{bmatrix} 1 & & \textcircled{0} \\ & \ddots & \\ \textcircled{0} & & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (B \cdot 3-11)$$

$$h \equiv ( t^{n+1} - t^n ) \dots\dots\dots (B \cdot 3-12)$$

$$dF^n \equiv \begin{array}{|c|c|c|} \hline \overbrace{\begin{matrix} \partial F_1 / \partial W_1 \dots \partial F_1 / \partial W_L \\ \vdots \\ \partial F_L / \partial W_1 \dots \partial F_L / \partial W_L \end{matrix}}^L & \overbrace{\begin{matrix} \partial F_1 / \partial M_{S1} \dots \partial F_1 / \partial M_{SN} \\ \vdots \\ \partial F_L / \partial M_{S1} \dots \partial F_L / \partial M_{SN} \end{matrix}}^N & \overbrace{\begin{matrix} \partial F_1 / \partial M_{H1} \dots \partial F_1 / \partial M_{HN} \\ \vdots \\ \partial F_L / \partial M_{H1} \dots \partial F_L / \partial M_{HN} \end{matrix}}^N \\ \hline \begin{matrix} \partial G_1 / \partial W_1 \dots \partial G_1 / \partial W_L \\ \vdots \\ \partial G_N / \partial W_1 \dots \partial G_N / \partial W_L \end{matrix} & \begin{matrix} \partial G_1 / \partial M_{S1} \dots \partial G_1 / \partial M_{SN} \\ \vdots \\ \partial G_N / \partial M_{S1} \dots \partial G_N / \partial M_{SN} \end{matrix} & \begin{matrix} \partial G_1 / \partial M_{H1} \dots \partial G_1 / \partial M_{HN} \\ \vdots \\ \partial G_N / \partial M_{H1} \dots \partial G_N / \partial M_{HN} \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} \partial H_1 / \partial W_1 \dots \partial H_1 / \partial W_L \\ \vdots \\ \partial H_N / \partial W_1 \dots \partial H_N / \partial W_L \end{matrix} & \begin{matrix} \partial H_1 / \partial M_{S1} \dots \partial H_1 / \partial M_{SN} \\ \vdots \\ \partial H_N / \partial M_{S1} \dots \partial H_N / \partial M_{SN} \end{matrix} & \begin{matrix} \partial H_1 / \partial M_{H1} \dots \partial H_1 / \partial M_{HN} \\ \vdots \\ \partial H_N / \partial M_{H1} \dots \partial H_N / \partial M_{HN} \end{matrix} \\ \hline \end{array} \dots\dots\dots (B \cdot 3-13)$$

$$\Delta y^{n+1} \equiv \begin{pmatrix} \Delta W_1^{n+1} \\ \vdots \\ \Delta W_L^{n+1} \\ \Delta M_{S1}^{n+1} \\ \vdots \\ \Delta M_{SN}^{n+1} \\ \Delta M_{H1}^{n+1} \\ \vdots \\ \Delta M_{HN}^{n+1} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (B \cdot 3 - 14)$$

$$F^n \equiv \begin{pmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_L \\ G_1 \\ \vdots \\ G_N \\ H_1 \\ \vdots \\ H_N \end{pmatrix} \dots\dots\dots (B \cdot 3 - 15)$$

ここでLは総リンク数，Nは総ノード数であり(B・3-10)式は(L+2N)個の連立方程式であるが，(L+1)番目以降の質量式はL番目までの運動量式に代入し整理することができる。すなわち，運動量式は $(\partial F_k / \partial W_1) = 0$  ( $k \neq l$ の時)であることより，一般にk番目の式は，

$$\left\{ 1 - h \frac{\partial F_k}{\partial W_k} \right\} \Delta W_k^{n+1} + \sum_m^N \left\{ -h \frac{\partial F_k}{\partial M_{Sm}} \right\} \Delta M_{Sm}^{n+1} + \sum_m^N \left\{ -h \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hm}} \right\} \Delta M_{Hm}^{n+1} = h F_k$$

(k=1~L) ..... (B・3-16)

(B・3-16)式の第2項，第3項は質量式より，次のように表わされる。

$$\sum_m^N \left\{ -h \frac{\partial F_k}{\partial M_{Sm}} \right\} \Delta M_{Sm}^{n+1}$$

$$= \sum_m^N h^2 \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{Sm}} \right)^n \left\{ \sum_{\nu \in T_m} \alpha_{S\nu} W_\nu^n - \sum_{\nu \in T_m} \alpha_{S\nu} W_\nu^n \right\} + \sum_1^L h^2 \alpha_{S1} \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{S1}} - \frac{\partial F_k}{\partial M_{S1}} \right)^n \Delta W_1^{n+1}$$

..... (B・3-17)

$$\dot{M}_{S_i} = \sum_{\nu \in T_i} W_{S\nu} - \sum_{\nu \in I_i} W_{S\nu} \dots\dots\dots (B \cdot 3 - 4)$$

$$\dot{M}_{H_i} = \sum_{\nu \in T_i} W_{H\nu} - \sum_{\nu \in I_i} W_{H\nu} + Q_i \dots\dots\dots (B \cdot 3 - 5)$$

また運動量保存式はリンク（流路）に沿って積分することにより次式となる。

$$\dot{W}_k = \frac{1}{\sum_j \left( \frac{L_{kj}}{A_{kj}} \right)} \left[ (P_i - P_j) g + \frac{W_k^2}{2\rho_k} \left( \frac{1}{A_i^2} - \frac{1}{A_j^2} \right) + \rho_k g \Delta h - g P_{fk} \right] \dots\dots (B \cdot 3 - 6)$$

(B・3-4), (B・3-5), (B・3-6) の3式を全ノード・リンクについて連立させて解くことにより, 流量を更新し, さらに状態式より圧力を計算することができる。

(B・3-4) ~ (B・3-6) 式を次のようにおく。

$$\frac{dW_k}{dt} = F_k (P, W) \dots\dots\dots (B \cdot 3 - 7)$$

$$\frac{dM_{S_i}}{dt} = G_i (W) \dots\dots\dots (B \cdot 3 - 8)$$

$$\frac{dM_{H_i}}{dt} = H_i (W) \dots\dots\dots (B \cdot 3 - 9)$$

(B・3-7) ~ (B・3-9) 式はネットワークについて次の差分近似式で表わすことができる。<sup>12)</sup>

$$[ I - h \cdot dF^n ] \Delta y^{n+1} = h F^n \dots\dots\dots (B \cdot 3 - 10)$$

ただし,

$$I \equiv \begin{bmatrix} 1 & & \textcircled{0} \\ & \ddots & \\ \textcircled{0} & & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (B \cdot 3 - 11)$$

$$h \equiv (t^{n+1} - t^n) \dots\dots\dots (B \cdot 3 - 12)$$

$$dF^n \equiv \begin{array}{|c|c|c|} \hline \overbrace{\begin{matrix} \partial F_1 / \partial W_1 \dots \partial F_1 / \partial W_L \\ \vdots \\ \partial F_L / \partial W_1 \dots \partial F_L / \partial W_L \end{matrix}}^L & \overbrace{\begin{matrix} \partial F_1 / \partial M_{S_1} \dots \partial F_1 / \partial M_{S_N} \\ \vdots \\ \partial F_L / \partial M_{S_1} \dots \partial F_L / \partial M_{S_N} \end{matrix}}^N & \overbrace{\begin{matrix} \partial F_1 / \partial M_{H_1} \dots \partial F_1 / \partial M_{H_N} \\ \vdots \\ \partial F_L / \partial M_{H_1} \dots \partial F_L / \partial M_{H_N} \end{matrix}}^N \\ \hline \begin{matrix} \partial G_1 / \partial W_1 \dots \partial G_1 / \partial W_L \\ \vdots \\ \partial G_N / \partial W_1 \dots \partial G_N / \partial W_L \end{matrix} & \begin{matrix} \partial G_1 / \partial M_{S_1} \dots \partial G_1 / \partial M_{S_N} \\ \vdots \\ \partial G_N / \partial M_{S_1} \dots \partial G_N / \partial M_{S_N} \end{matrix} & \begin{matrix} \partial G_1 / \partial M_{H_1} \dots \partial G_1 / \partial M_{H_N} \\ \vdots \\ \partial G_N / \partial M_{H_1} \dots \partial G_N / \partial M_{H_N} \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} \partial H_1 / \partial W_1 \dots \partial H_1 / \partial W_L \\ \vdots \\ \partial H_N / \partial W_1 \dots \partial H_N / \partial W_L \end{matrix} & \begin{matrix} \partial H_1 / \partial M_{S_1} \dots \partial H_1 / \partial M_{S_N} \\ \vdots \\ \partial H_N / \partial M_{S_1} \dots \partial H_N / \partial M_{S_N} \end{matrix} & \begin{matrix} \partial H_1 / \partial M_{H_1} \dots \partial H_1 / \partial M_{H_N} \\ \vdots \\ \partial H_N / \partial M_{H_1} \dots \partial H_N / \partial M_{H_N} \end{matrix} \\ \hline \end{array} \dots\dots\dots (B \cdot 3 - 13)$$

$$\Delta y^{n+1} \equiv \begin{pmatrix} \Delta W_1^{n+1} \\ \vdots \\ \Delta W_L^{n+1} \\ \Delta M_{S1}^{n+1} \\ \vdots \\ \Delta M_{SN}^{n+1} \\ \Delta M_{H1}^{n+1} \\ \vdots \\ \Delta M_{HN}^{n+1} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (B \cdot 3-14)$$

$$F^n \equiv \begin{pmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_L \\ G_1 \\ \vdots \\ G_N \\ H_1 \\ \vdots \\ H_N \end{pmatrix} \dots\dots\dots (B \cdot 3-15)$$

ここでLは総リンク数，Nは総ノード数であり(B・3-10)式は(L+2N)個の連立方程式であるが，(L+1)番目以降の質量式はL番目までの運動量式に代入し整理することができる。すなわち，運動量式は $(\partial F_k / \partial W_1) = 0$  ( $k \neq L$ の時)であることより，一般にk番目の式は，

$$\left[1 - h \frac{\partial F_k}{\partial W_k}\right] \Delta W_k^{n+1} + \sum_m^N \left[-h \frac{\partial F_k}{\partial M_{Sm}}\right] \Delta M_{Sm}^{n+1} + \sum_m^N \left[-h \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hm}}\right] \Delta M_{Hm}^{n+1} = h F_k$$

(k=1~L) ..... (B・3-16)

(B・3-16)式の第2項，第3項は質量式より，次のように表わされる。

$$\sum_m^N \left[-h \frac{\partial F_k}{\partial M_{Sm}}\right]^n \Delta M_{Sm}^{n+1}$$

$$= \sum_m^N h^2 \left(\frac{\partial F_k}{\partial M_{Sm}}\right)^n \left[ \sum_{\nu \in I_m} \alpha_{S\nu} W_\nu^n - \sum_{\nu \in T_m} \alpha_{S\nu} W_\nu^n \right] + \sum_1^L h^2 \alpha_{S1} \left(\frac{\partial F_k}{\partial M_{S11}} - \frac{\partial F_k}{\partial M_{S1J}}\right)^n \Delta W_1^{n+1}$$

..... (B・3-17)

$$\sum_n^N \left( -h \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hm}} \right)^n \Delta M_{Hm}^{n+1} \\ = \sum_n^N h^2 \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hm}} \right)^n \left[ \sum_{\nu \in I_m} \alpha_{H\nu} W_\nu^n - \sum_{\nu \in T_m} \alpha_{H\nu} W_\nu^n \right] + \sum_1^L h^2 \alpha_{H1} \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{H1i}} - \frac{\partial F_k}{\partial M_{H1j}} \right)^n \Delta W_1^{n+1} \quad \text{..... (B・3-18)}$$

ただし、1i はリンク 1 のイニシアルノード、1j はリンク 1 のターミナルノードを表わす。また  $\alpha_s, \alpha_H$  は各々次式である。(5-4 項 (5-5), (5-6) 式の右辺の係数を表わす。)

$$\alpha_s \equiv \left\{ \frac{1 - \alpha - \alpha(S-1) \cdot \text{RHS}}{1 - \alpha(1 - \text{RHS})} \right\} \quad \text{..... (B・3-19)}$$

$$\alpha_H \equiv \left\{ \frac{S \cdot \alpha \cdot \text{RHS}}{1 - \alpha(1 - \text{RHS})} \right\} \quad \text{..... (B・3-20)}$$

$$\text{RHS} \equiv \rho_H / \rho_s \quad \text{..... (B・3-21)}$$

ここで S はスリップ比であり、リンク毎に定数として入力データで与える。(B・3-17) (B・3-18) 式を (B・3-16) 式に代入することにより、結局解くべき式は次式となる。

$$\left[ 1 - h \left( \frac{\partial F_k}{\partial W_k} \right)^n + h^2 \alpha_{Sk} \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{Ski}} - \frac{\partial F_k}{\partial M_{Skj}} \right)^n + h^2 \alpha_{Hk} \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hki}} - \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hkj}} \right)^n \right] \cdot \Delta W_k^{n+1} \\ + \sum_1^L h^2 \left[ \alpha_{S1} \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{S1i}} - \frac{\partial F_k}{\partial M_{S1j}} \right)^n + \alpha_{H1} \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{H1i}} - \frac{\partial F_k}{\partial M_{H1j}} \right)^n \right] \cdot \Delta W_1^{n+1} \quad (1 \neq k) \\ = h F_k^n - h^2 \sum_m^N \left[ \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{Sm}} \right)^n \left( \sum_{\nu \in I_m} \alpha_{S\nu} W_\nu^n - \sum_{\nu \in T_m} \alpha_{S\nu} W_\nu^n \right) + \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hm}} \right)^n \left( \sum_{\nu \in I_m} \alpha_{H\nu} W_\nu^n - \sum_{\nu \in T_m} \alpha_{H\nu} W_\nu^n \right) \right] \quad (k=1 \sim L) \quad \text{..... (B・3-22)}$$

### B-3・3 差分近似式の解法

(B・3-22) 式は  $\Delta W_k$  に関する L 元の連立方程式であり整理すると

$$A \cdot \Delta W_k^{n+1} = Z \quad \text{..... (B・3-23)}$$

ここで A は (L × L) の正方行列、Z は L 元のベクトルである。

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。

(以下リンク k のイニシアルノードを i, ターミナルノードを j と略記する。)

#### (1) 行列要素 $a_{k\nu}$

i)  $\nu = k$  のとき

$$a_{k\nu} = 1 - h \frac{\partial F_k}{\partial W_k} + h^2 \frac{\partial F_k}{\partial M_{S1}} \alpha_{Sk} - h^2 \frac{\partial F_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{Sk}$$

$$+ h^2 \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hi}} \alpha_{Hk} - h^2 \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{Hk} \dots\dots\dots (B \cdot 3-24)$$

ii)  $\nu \in I_i, \nu \in T_j$  のとき

$$a_{k\nu} = h^2 \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{Si}} \alpha_{S\nu} + \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hi}} \alpha_{H\nu} \right) \dots\dots\dots (B \cdot 3-25)$$

iii)  $\nu \in T_i, \nu \in I_j$  のとき

$$a_{k\nu} = -h^2 \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{Si}} \alpha_{S\nu} + \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hi}} \alpha_{H\nu} \right) \dots\dots\dots (B \cdot 3-26)$$

iv)  $\nu \in I_j, \nu \in T_i$  のとき

$$a_{k\nu} = h^2 \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{S\nu} + \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{H\nu} \right) \dots\dots\dots (B \cdot 3-27)$$

v)  $\nu \in T_j, \nu \in I_i$  のとき

$$a_{k\nu} = -h^2 \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{S\nu} + \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{H\nu} \right) \dots\dots\dots (B \cdot 3-28)$$

vi)  $\nu \in I_i, \nu \in T_j$  のとき

$$a_{k\nu} = h^2 \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{Si}} \alpha_{S\nu} + \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hi}} \alpha_{H\nu} - \frac{\partial F_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{S\nu} - \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{H\nu} \right) \dots\dots\dots (B \cdot 3-29)$$

vii)  $\nu \in T_i, \nu \in I_j$  のとき

$$a_{k\nu} = h^2 \left( -\frac{\partial F_k}{\partial M_{Si}} \alpha_{S\nu} - \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hi}} \alpha_{H\nu} + \frac{\partial F_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{S\nu} + \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{H\nu} \right) \dots\dots\dots (B \cdot 3-30)$$

viii) その他

$$a_{k\nu} = 0 \dots\dots\dots (B \cdot 3-31)$$

(2) ベクトル要素  $Z_k$

$$Z_k = hF_k + h^2 \left( \frac{\partial F_k}{\partial M_{Si}} r_{Si} + \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hi}} r_{Hi} + \frac{\partial F_k}{\partial M_{Sj}} r_{Sj} + \frac{\partial F_k}{\partial M_{Hj}} r_{Hj} \right) \dots\dots\dots (B \cdot 3-32)$$

$$r_{Si} = \sum_{\nu \in T_i} \alpha_{S\nu} W_\nu - \sum_{\nu \in I_i} \alpha_{S\nu} W_\nu \dots\dots\dots (B \cdot 3-33)$$

$$r_{Hi} = \sum_{\nu \in T_i} \alpha_{H\nu} W_\nu - \sum_{\nu \in I_i} \alpha_{H\nu} W_\nu + Q_i$$

(B・3-23) 式は掃き出し法により解くことができ、得られた流量の増分  $\Delta W_k$  より各ノードの諸量を以下に示す順に更新することができる。

$$W_k^{n+1} = W_k^n + \Delta W_k^{n+1} \quad \dots\dots\dots (B \cdot 3-34)$$

$$M_{Si}^{n+1} = M_{Si}^n + h \left( \sum_{\nu \in Ti} \alpha_{S\nu} W_\nu^{n+1} - \sum_{\nu \in Ii} \alpha_{S\nu} W_\nu^{n+1} \right) \quad \dots\dots\dots (B \cdot 3-35)$$

$$M_{Hi}^{n+1} = M_{Hi}^n + h \left( \sum_{\nu \in Ti} \alpha_{H\nu} M_\nu^{n+1} - \sum_{\nu \in Ii} \alpha_{H\nu} W_\nu^{n+1} + Q_i \right) \quad \dots\dots\dots (B \cdot 3-36)$$

$$\rho_{Hi} = \frac{M_{Hi}}{V_i - (M_{Si} / \rho_S)} \quad \dots\dots\dots (B \cdot 3-37)$$

ここで  $V_i$  はノードの容積である。

次に各ノードの圧力については次のように決定する。

1) Na・水素ガス 2 相ノード

水素ガスをあ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。

$$P_i = \rho_{Hi} R T_{Hi} \quad \dots\dots\dots (B \cdot 3-38)$$

ここで、 $T_{Hi}$  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

本コードでは 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上記の方法では圧力は求まらない。また 2 相ノードでもボイド率が低い場合には、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る。

あるノードの Na の量が一定だとすると

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

$$\left. \begin{aligned} \text{従って } \sum_{\nu \in Ti} W_{S\nu} &= \sum_{\nu \in Ii} W_{S\nu} \\ \sum_{\nu \in Ti} \dot{W}_{S\nu} &= \sum_{\nu \in Ii} \dot{W}_{S\nu} \quad (W_{S\nu} = W_\nu) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B \cdot 3-39)$$

これに (B・3-6) を代入すると

$$\sum_{\nu \in Ti} \frac{1}{K_\nu} (P_i - P_j + \Delta P_{r\nu}) = \sum_{\nu \in Ii} \frac{1}{K_\nu} (P_i - P_j + \Delta P_{r\nu}) \quad \dots\dots (B \cdot 3-40)$$

となる。ここで  $\Delta P_{r\nu}$  は (B・3-6) 式右辺第 2, 3, 4 項の和である。j, l は各リンク  $\nu$  のそれぞれターミナルノード及びイニシャルノードである。従って  $\Delta P_{r\nu}$  の値を求める事によって単相ノードの圧力  $P_i$  は連立一次方程式の解として求められる。



## 付録C SWACSコードの登録番号について

### C-1 概要

SWACSコードは大リーク・ナトリウム-水反応解析の総合化コードとして最初に報告<sup>1)</sup>されて以来ほぼ2年経過しており、その間「もんじゅ」体系に対する適用計算<sup>9), 10)</sup>, ならびにSWAT-3実験装置体系に対する検証計算<sup>6), 7), 8)</sup>等を通じ、コード自体にも機能的な修正、誤りの修正等の改良が加えられてきた。

そのため、各計算モジュールについて基本的な仮定、計算式の変更はないものの、上述したような各報告において使用している計算コードそのものが細部で異なったものであるという不都合が生じてきた。例えば、水噴出率計算モジュール(SWAC-11)については、入力形式が変更されたため、古いデータカードは現在使用することができない。

以上のような事情から、SWACSコードの使用者が古い報告書を参照する場合の混乱を軽減するため、現在までの各報告を逆のぼって、SWACSコードに登録番号を付加することにした。

登録番号は「REG」と略記し、最初の報告<sup>1), 9)</sup>で使用したversionをREG1、本報告で扱う最新のversionをREG3と名付け、間に整理の都合上REG2を設けた。

REG1からREG3までの計算コードの主な変更点を以下に示す。

### C-2 主な変更内容

#### C-2-1 SWACS/REG1

SWACSコードとして最初に報告されたものである<sup>1), 9)</sup>。

#### C-2-2 SWACS/REG2

SWACS/REG1について、以下に示すような改良、変更が加えられた。

##### 1) 機能上の改良

- ・水噴出率計算モジュール、準定常圧計算モジュールにプロッター出力機能を加えた。
- ・初期スパイク圧計算において球モデル部の音速を単独に入力できるようにした。
- ・初期スパイク圧計算において、気泡成長が球モデル半径に達した場合のプログラム停止ルーチンを改良した。
- ・圧力波伝播計算において、圧力波源のテーブルを初期スパイク圧計算結果のデータ・ファイルより入力する場合、圧力波源となる接合点を2点扱えるように改良した。
- ・準定常圧計算において、リンクの等価直径と断面積を別々に入力できるようにした。
- ・準定常圧計算において、計算ステップ巾( $\Delta t$ )の大きさを計算の途中で変更できる

ようにした。

- ・準定常圧計算において、計算結果のアウトプットリストを改良し流速も出力されるようにした。

## 2) 計算式等の変更

- ・準定常圧計算において、圧損の計算上の二相増倍係数の扱いを変更した。また Martinielli 係数、二相増倍係数の計算式の誤りを訂正した。

## C-2・3 SWACS/REG3

本報告で扱う version である。SWACS/REG2より、主として水噴出率計算モジュールに大巾な整備が加えられた。なお、初期スパイク圧、ならびに圧力波伝播計算は REG2とREG3の間に変更点はない。

### 1) 機能上の改良

水噴出率計算モジュールに関し以下のように改良・整備した。

- ・ボリューム・ジャンクション・モデル計算部を取除いた。
- ・入力形式を変更・整備した。
- ・出力形式（アウトプットリスト）を整備した。
- ・取扱える最大メッシュ数を 100 メッシュより 300 メッシュに増設した。
- ・盲端境界条件を扱えるようにした。

### 2) 計算式等の変更

水噴出率計算モジュールに関し以下の変更を行った。

- ・破断端境界に設けられる仮想メッシュの数を 3 ケより 1 ケに減らした。
- ・数値計算上の変数としてマス・フラックス ( $\rho u$ ) を新たに設け差分式の再整理を行った。
- ・液单相域の音速値の誤差が大きいため、テーブルとして扱うよう変更した。
- ・圧損計算における、二相増倍係数の扱いの誤りを訂正した。

準定常圧計算モジュールに関して以下の変更を行った。

- ・乱流域の管摩擦損失係数の計算式を Blasius の式、Nikuradse の式より Colebrook の式に改めた。
- ・ベンドにおける圧損計算式の誤りを訂正した。