

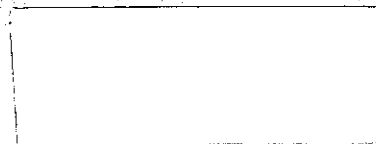
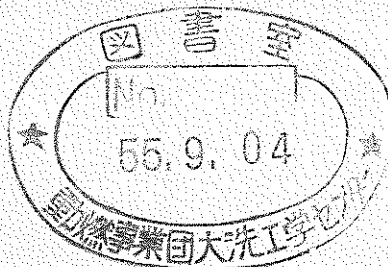
区 分 交 更	
変更資料番号	—
決裁年月日	平成 13 年 7 月 31 日

# 大リーク・ナトリウム-水反応解析コード

—SWACS/ REG 3 水噴出率計算モジュール

SWAC-11の説明と適用性の検討—

—大リーク・ナトリウム-水反応解析(第9報)—



1980年6月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
S	N 952 80-03
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)



## 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SWAC-11の説明と適用性の検討—  
—大リーク・ナトリウム-水反応解析(第9報)—

渡辺 収\*, 三宅 収\*, 進藤 嘉久\*  
佐藤 稔\*

## 要 旨

高速増殖炉の蒸気発生器の安全設計のため、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コードのREG3バージョンの内一つの計算モジュールである水噴出率計算モジュール(SWAC-11)について、その計算モデル、数値計算手法を説明するものである。

水噴出率計算モジュールは蒸気発生器内の一本、あるいは複数本の伝熱管が瞬時に完全両端破断することを想定し、その両破断口からナトリウム雰囲気中に流出する水/蒸気の噴出率の過渡変化を計算するものである。本計算モジュールではサブクール水、飽和水、過熱蒸気の伝熱管内の一次元流動を計算し、飽和二相流は均質熱力学的平衡モデルで扱われる。伝熱管内の流路は有限個の差分セルにモデル化され、各々のセルについて、質量、運動量、エネルギーの保存則を適用し、各々の保存式は、修正ICE法で解かれる。

なお、本報告書は先に報告されている「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)—」(PNC SN952 77-05)について、同報告以降のプログラムの変更部を改訂し、適用計算例を加えて書き改めたものである。



NOT FOR PUBLICATION  
PNC TSN952 80-03  
Jun., 1980

Computer Code for Large Leak Sodium-Water Reaction Analysis  
— SWACS/REG3, Water Leak Rate Calculation Module —

— Large Leak Sodium Water Reaction Analysis (Report No.9) —

Osamu Watanabe\*, Osamu Miyake\*,  
Yoshihisa Shindo\*, and Minoru Sato\*

Abstract

A computer code SWACS has been developed for the safety design of LMFBR's steam generator, in order to predict pressure/fluid flow transients during a postulated accident of large scale sodium-water reaction.

This report describes a calculational model and a numerical method of the water leak rate calculation module, SWAC-11, which is one of functions included in SWACS/REG3 version. SWAC-11 is designed to calculate transients of water/steam discharge rate into sodium on condition that one or several tubes of a steam generator would break instantaneously in a mode of double-ended guillotine rupture.

Calculations are carried out for one-dimensional flow with phase change considerations of subcooled, saturated or superheated water/steam, assuming the homogeneous, thermodynamic equilibrium condition for saturated two-phase mixtures. The finite difference technique is utilized for modeling a water/steam flow, and the conservation laws of mass, momentum and energy are applied to each computational cells. These finite difference equations are solved by the modified ICE method.

This report is a revised edition of "SWAC-11: A Computer Code for the Analysis of Water/Steam Leak from Ruptured Heat Transfer Tubes in LMFBR Steam Generator" PNC report SN952 77-05

---

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

PNC/AN952 80-03

(1977), providing descriptions of code modification and results of sample calculations.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 計算モデル .....	3
2.1 計算対象 .....	3
2.2 計算上の仮定 .....	6
3. 基礎式と数値計算法 .....	7
3.1 基礎方程式 .....	7
3.2 数値計算法 .....	7
3.2.1 基礎方程式の差分化 .....	7
3.2.2 境界条件 .....	12
3.2.3 計算の手順 .....	15
3.3 状態方程式及び流動パラメータ .....	18
3.3.1 状態方程式 .....	18
3.3.2 摩擦損失 .....	19
4. プログラムの内容 .....	21
4.1 プログラム構成 .....	21
4.2 主なサブルーチンプログラムのフローチャート .....	21
5. 入出力形式 .....	26
5.1 入力データ・カード・デッキの構成 .....	26
5.2 水噴出率計算入力データ .....	30
5.2.1 コントロール整数データ .....	30
5.2.2 コントロール実数データ .....	30
5.2.3 整数データ .....	30
5.2.4 実数データ .....	30
5.2.5 補足説明 .....	36
5.3 出力形式 .....	41
6. 例題計算 .....	44
6.1 Edwards Standard Problem No1 の計算 .....	44
6.1.1 Edwards 等の実験 .....	44
6.1.2 計算条件 .....	46
6.1.3 計算結果 .....	47
6.1.4 考 察 .....	59

6.2	原型炉級SG体系への適用計算	69
6.2.1	計算条件	69
6.2.2	計算結果及び考察	71
6.3	例題計算のまとめ	77
7.	あとがき	78
8.	参考文献	79
APPENDIX	例題計算用入力データ	80

## 記 号 表

$A_j$	: 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 ]
$\delta t (\Delta t)$	: 時間ステップ巾	[ sec ]
$\delta x (\Delta x)$	: 空間メッシュ巾	[ m ]
$\theta$	: 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	[ - ]



## 1. ま え が き

ナトリウム (Na) 冷却高速増殖炉用の蒸気発生器 (SG) では、化学的に活性な Na と水とを伝熱管壁を介して熱交換させているため、万一、このバウンダリーが破損した場合を想定し、大リーク・Na-水反応対策及び事故時における安全性評価がなされている。この安全性評価において、破損した伝熱管からの水噴出率を正確に評価することは、引き続いて生じる反応生成物（主に水素ガス）の発生に伴う急激な Na 中圧力上昇等に対する 2 次 Na バウンダリーの健全性を評価する上で重要な課題である。

このナトリウム-水反応に伴う SG 内の圧力挙動は、有液面型の SG に関し、伝熱管の破断後 0～数 10 msec に観察される初期スパイク圧と、秒オーダーの時間に観察される準定常圧に区分することができる。前者の時間領域に対応する水噴出率の過渡変化は、測定機器の応答性、また現象的にも相変化、臨界流を伴う複雑な変化であることから、実験的に直接測定することは困難とされている。この伝熱管破断直後の水噴出率の過渡変化を解析的に求めることを目的として、計算コード SWAC-11 が 1977 年に開発された。<sup>1)</sup>

その後 SWAC-11 コードは、大リーク・ナトリウム-水反応解析総合化コード SWACS の 1 モジュールとして採用されている。<sup>2)</sup>

現在 SWACS コードとして計算コードの整備、検証の作業が進められているが SWAC-11 (オリジナルの SWAC-11) に対し以下のような問題点が抽出された。

- (1) オリジナル SWAC-11 の製作段階の思想として、伝熱管破断端において、境界条件として与える仮定、制約を極力排除して計算（数値実験）をおこなうことにした。このため、破断端外に仮想セルを 3 ケ設けることになった。

これは、破断端セルにおける状態量の計算に仮定、制約を設けていないために計算スキーム上必要なセル数である。

しかし、実用計算上からセルの長さ  $\Delta x$  をある程度大きくとらねばならず、このようにすると仮想セル 3 ケの長さは物理モデルとして存在が許される値を越えてしまうという難が生じた。また、比較的大きな  $\Delta x$  で計算する場合で破断端が過熱蒸気状態下の時、過渡的に破断端セルの流速が音速をはるかに越えてしまうという難点があった。これが原因で、計算を続けると数値発散が生じ、計算ができなくなることがあったので、破断端セルの流速を音速の 2 倍までという制約をつけた。

このような制約は過渡現象計算において排除することが望ましいことはいうまでもない。

- (2) 伝熱管部の計算（修正 ICE 法<sup>4)</sup>）部分と配管部の計算（ボリューム・ジャンクション法）部分を同時に実行することは数値計算上難しく、計算時間が非常に大きくなることが予想される。
- (3) その他

- a) 水単相（高温圧縮水）の音速値として計算に使用していた値（近似式より評価）に大きな誤差が生じていた。
- b) 多時間ステップの計算後，差分式により更新される水／蒸気の比重量に誤差が蓄積し，状態式と矛盾が生じていた。

以上のような問題点に関し，以下の如く，計算コードの部分的改修，削除を実施した。

(1)について

破断端外部を1メッシュとし，破断端運動量束を管内点から外挿して求める方法を採用した。

また，破断端流速の制約は除去し，数値計算上の安定性に支障のないことを確めた。

(2)について

配管部の計算ルーチンを全て削除し，伝熱管部の計算のみを行うモジュールとして独立させ水／蒸気出入口ヘッダー部の圧力及びエンタルピーを初期条件で一定とした。なお，配管部を含めたブローダウン計算に関しては，軽水炉のLOCAの解析目的で開発され，公開されているブローダウンコード等で別に評価するものとした。

(3)について

- a) 水単相流中音速の評価計算式中の  $\partial p / \partial P)_T$  ,  $\partial v / \partial P)_h$  値は，状態式近似式を偏微分して求めており，特に  $\partial v / \partial P)_h$  が音速に対して高感度な為に誤差を生じていた。これについては，加圧水の断熱指数から評価する方法に改めた。
- b) 各時間ステップ毎に圧力，比エンタルピーより状態式を用いて比重量を求め，これを優先することとした。

これらの改修を加えたSWAC-11計算モジュールは，現在SWACS/REG3の水噴出率計算モジュールとして，管理されている。

本報告書はこのSWACS/REG3の水噴出率計算モジュールの説明書として，計算モデル，手法，プログラム内容，入出力形式および例題計算結果についてまとめたものである。

## 2. 計算モデル

### 2.1 計算対象

高速増殖原型炉級プラントの蒸気発生器（SG）概略構造の例を図 2.1-1 に示す。原型炉 SG では伝熱管は外径 31.8 mm\*、内径 24.2 mm\*、平均長さ 7.9 m\* でダウンカマー部（直管）とライザー部（ヘリカル・コイル）より成っている。本計算の対象とする伝熱管部を模式的に図 2.1.2 に図示する。以下、モデル化される範囲について説明する。

#### (1) 対象空間，対象時間領域

図 2.1-2 に示された SG 入口ヘッダ～出口ヘッダまでの伝熱管内における水／蒸気を対象にモデル化する。ただし、破断位置は入口ヘッダ～出口ヘッダ間の任意の位置とし、破断形状は両端完全ギロチン（DEG）破断とする。

時間対象領域は、伝熱管の瞬時破断を想定して時刻零とし、初期スパイク圧形成時（破断後約数 10 msec）を含み伝熱管内流が定常化するまでの水リーク率変化を評価する。ただし、ここでいう定常は SG 入口、出口ヘッダを圧力、比エンタルピー一定と見なすことのできる時間領域で、原型炉級の体系では 1～数秒である。

#### (2) 評価対象

本現象を評価するに当たり、以下の現象が計算される。

- a) 破断口からの流出率（水噴出率）変化。
- b) 管内圧力分布変化（減圧沸騰波の伝播過程等）。
- c) 管内エンタルピー分布変化。
- d) 管内流量分布変化。
- e) 管内ボイド率分布変化等。

#### (3) 境界条件

- a) SG 出入口ヘッダ内の圧力及びエンタルピー。
- b) 管破断口外部における圧力（背圧）。
- c) 盲端（流速 = 0）。

---

\* 諸元は設計により、やや異なる。

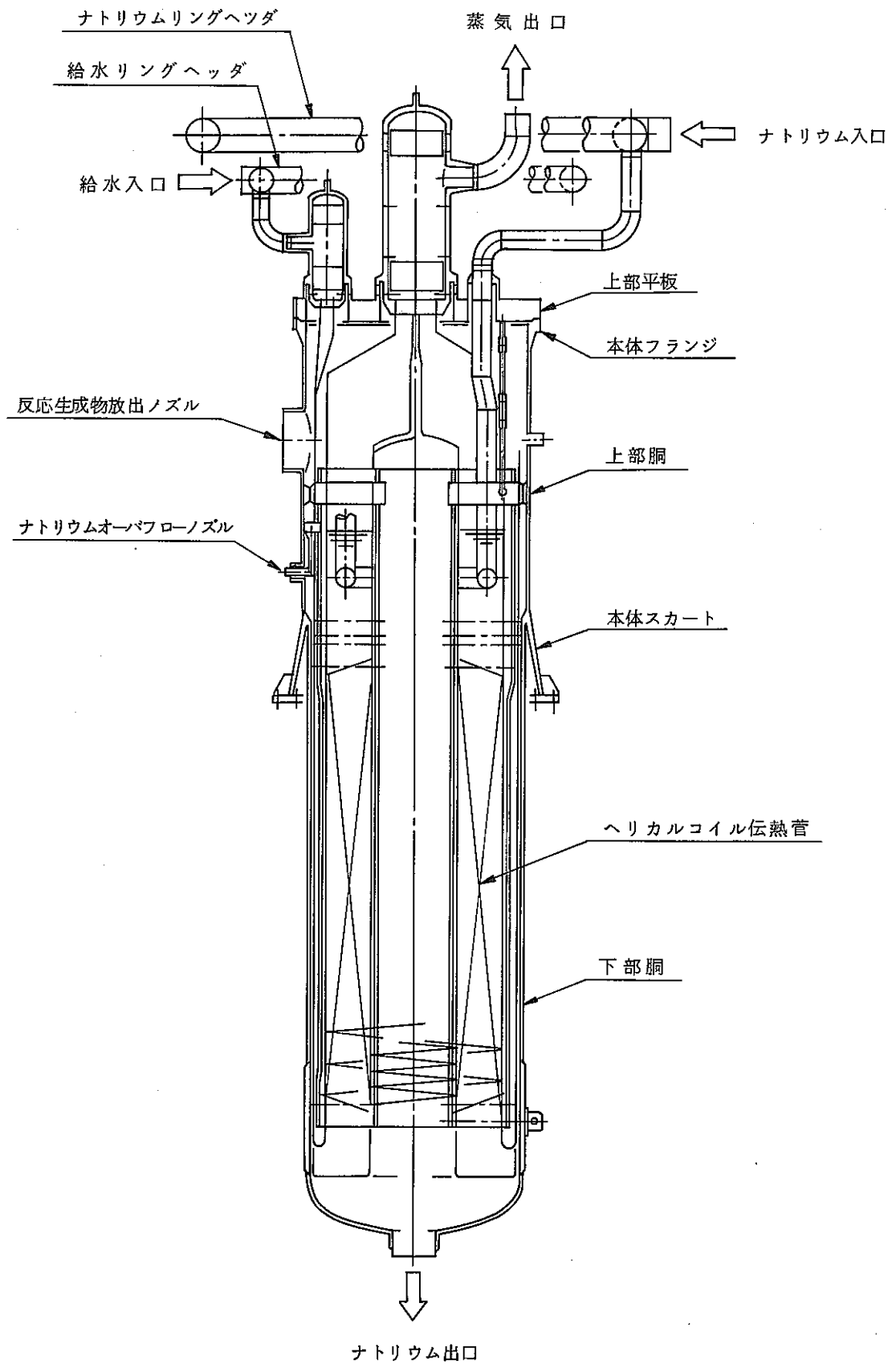


図 2.1-1 原型炉級 SG の概略構造

( 圧力, エンタルピー一定境界 )

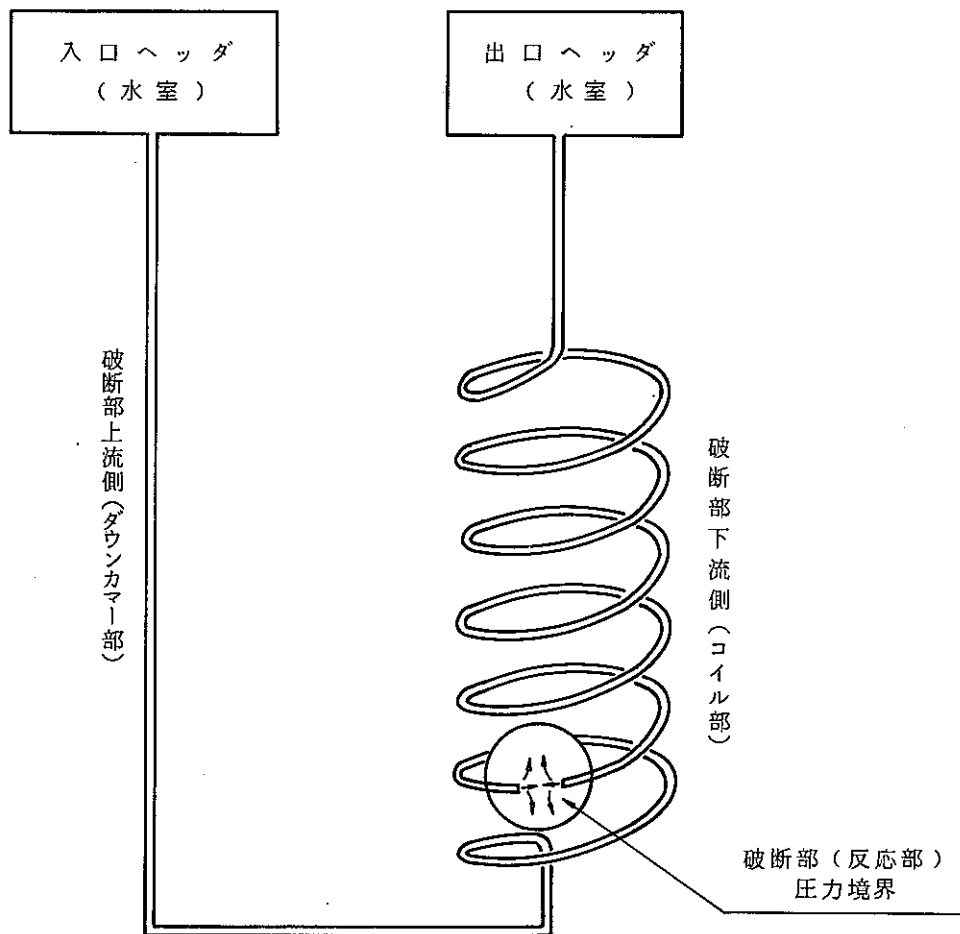


図 2.1-2 水リーク率計算モデル

## 2.2 計算上の仮定

伝熱管内の水／蒸気流動挙動を計算するにあたり以下の仮定を行う。

- a) 管内水／蒸気の流れは，軸方向 1 次元として扱う。
- b) 管内流体は，水単相，蒸気単相及び水／蒸気 2 相流として扱うが，2 相流に対しては，均質混合流と見なし，熱力学的平衡を仮定する。
- c) 管壁の弾性，塑性変形は無視する。
- d) SG 出入口ヘッダー内のエンタルピ及び圧力は，初期状態で一定とする。
- e) 管壁を介し，流入(出)する熱は，時間的，空間的变化を無視した一定値として扱う。
- f) 管破断端における運動量束は，管内部の諸量から線形近似される。
- g) 数値解法は，修正 ICE 法を用いる。尚，本方法の特徴を以下に記す。
  - i) マッハ数がゼロから無限大迄の圧縮性非定常流に対して適用できる。
  - ii) 状態式の密度変化，連続式の質量速度 ( $\rho u$ ) に関し陰的に取り扱う。(完全陰解法, Crank Nicolson 法等が任意に選べる。)
  - iii) 数値計算の安定化のために擬似粘性項及び質量拡散項が導入できる。

### 3. 基礎式と数値計算法

#### 3.1 基礎方程式

前述 2.1 節に示した仮定に基づき、質量、運動量及びエネルギー保存則により基礎方程式が構成される。

質量保存の法則より、

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

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

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

$$q = -(\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3-3)$$

ここで、(3-2) 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

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho Eu)}{\partial x} = \frac{\rho u \cos \theta}{A_J} + \frac{1}{A_J} \frac{\partial(Pu)}{\partial x} + Q \quad (3-4)$$

$$E = I + \frac{u^2}{2} \frac{1}{g A_J} \quad (3-5)$$

#### 3.2 数値計算法

##### 3.2.1 基礎方程式の差分化<sup>4)</sup>

3.1 節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、ステップの比重量と質量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・ステップの質量流束の関数として示される。これらの式中から、未知の質量流束を消去して新しい比重量に関するポアソン方程式が得られる。更に、比重量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・ステップでの圧力と質量流束が得られる。最後に、エネルギー変化が計算される。

3.2.1-1 一次元差分セルの定義

図 3.2-1 に一次元の差分セルを示す。

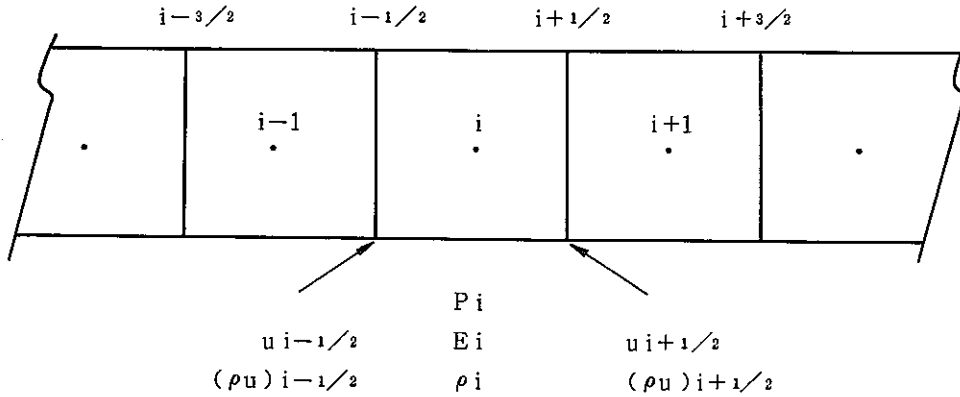


図 3.2-1 修正 I C 法の一次元差分セル

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。流量はセル端点で定義され，また  $\rho$ ， $P$ ， $E$ ， $I$  のような状態量は，セル中心で定義される。

3.2.1-2 圧力差分式の導出

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 (3-1) 式の差分近似式は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{\rho_i^{n+1} - \rho_i^n}{\delta t} &= \frac{\phi}{\delta x} \left[ (\rho u)_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} - (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} \right] + \frac{1-\phi}{\delta x} \left[ (\rho u)_{i-\frac{1}{2}}^n - (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^n \right] \\ &+ \frac{\tau}{\delta x^2} \left( \rho_{i+1}^n + \rho_{i-1}^n - 2\rho_i^n \right) \end{aligned} \quad (3-6)$$

また，運動方程式 (3-2) 式を差分近似して次式で表わす。

$$\frac{(\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^n}{\delta t} = \frac{\phi}{\delta x} (P_i^{n+1} - P_{i+1}^{n+1}) g + \frac{1-\phi}{\delta x} (P_i^n - P_{i+1}^n) g + R_{i+\frac{1}{2}}^n \quad (3-7)$$

ただし，

$$\begin{aligned} R_{i+\frac{1}{2}}^n &= \frac{1}{\delta x} \left[ (\rho u^2)_i - (\rho u^2)_{i+1} \right]^n + \frac{1}{\delta x} \left[ q_i - q_{i+1} \right]^n g \\ &+ \left[ g \rho \cos \theta \right]_{i+\frac{1}{2}}^n - \left[ \frac{f}{2d} \cdot \frac{(\rho u)_{i+\frac{1}{2}} |(\rho u)_{i+\frac{1}{2}}|}{\rho_i} \right]^n \end{aligned} \quad (3-8)$$



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、 $\phi$ 、 $\psi$  は各々質量式における質量流束、運動量式における圧力の時間に関する重み係数で  $\phi$ 、 $\psi = 0$  で完全陽的差分\*、 $\phi$ 、 $\psi = 0.5$  で Crank-Nicolson 法、 $\phi$ 、 $\psi = 1.0$  で完全陰的差分となる。

(3-7) の運動量式を質量流束に関し、次のように表わす。

$$\begin{aligned} (\rho u)_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} &= (\rho u)_{i-\frac{1}{2}}^n + \frac{\phi \delta t}{\delta x} (P_{i-1}^{n+1} - P_i^{n+1}) g \\ &\quad + \frac{(1-\phi) \delta t}{\delta x} (P_{i-1}^n - P_i^n) g + R_{i-\frac{1}{2}}^n \delta t \end{aligned} \quad (3-9)$$

$$\begin{aligned} (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} &= (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^n + \frac{\phi \delta t}{\delta x} (P_i^{n+1} - P_{i+1}^{n+1}) g \\ &\quad + \frac{(1-\phi) \delta t}{\delta x} (P_i^n - P_{i+1}^n) g + R_{i+\frac{1}{2}}^n \delta t \end{aligned} \quad (3-10)$$

次に状態変化の近似式として、断熱音速式を用いる。

$$(a^2)_i^n = \frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\rho_i^{n+1} - \rho_i^n} \cdot g \quad (3-11)$$

または、

$$\rho_i^{n+1} = \rho_i^n + \frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{(a^2)_i^n} \cdot g \quad (3-12)$$

ここで、 $(a^2)_i$  は断熱音速の 2 乗に相当する量で、セル毎に与えられる状態量である。

(3-6) 式に (3-9)、(3-10) 式を代入し、更に (3-12) 式を適用すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{P_i^{n+1}}{(a^2)_i^n} &= \frac{P_i^n}{(a^2)_i^n} + \left\{ \frac{\delta t}{\delta x} [(\rho u)_{i-\frac{1}{2}}^n - (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^n] + \frac{\delta t^2 \phi \phi}{\delta x^2} (P_{i-1}^{n+1} + P_i^{n+1} - 2P_i^{n+1}) g \right. \\ &\quad + \frac{\delta t^2 \phi (1-\phi)}{\delta x^2} (P_{i-1}^n + P_{i+1}^n - 2P_i^n) g \\ &\quad \left. + (R_{i-\frac{1}{2}}^n - R_{i+\frac{1}{2}}^n) \frac{\phi \delta t^2}{\delta x} + \frac{\tau \delta t}{\delta x^2} (\rho_{i+1}^n + \rho_{i-1}^n - 2\rho_i^n) \right\} / g \end{aligned} \quad (3-13)$$

更に (3-13) 式を未知量  $(P^{n+1})$  についてまとめると次式となる。

\*  $\phi$ 、 $\psi = 0$  は式の展開上 (後述 (3-14) 式)、本計算コードでは使用できない。

$$-P_{i-1}^{n+1} + \left(2 + \frac{1}{(a^2)_i^n} \cdot \frac{\delta x^2}{\phi \delta t^2}\right) P_i^{n+1} - P_{i+1}^{n+1} = \frac{\delta x^2}{\phi \delta t^2} \cdot G_i^n \quad (3-14)$$

ただし、 $G_i^n$ は次式で表わされる。既知量（ $n$ ステップ）で表わされる係数である。

$$\begin{aligned} G_i^n = & \frac{\delta x^2}{\phi \delta t^2} \cdot g \left\{ \frac{P_i}{(a^2)_i} \cdot g + \frac{\delta t}{\delta x} [(\rho u)_{i-\frac{1}{2}} - (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}] \right. \\ & + \frac{\phi(1-\phi)\delta t^2}{\delta x^2} \cdot g [P_{i-1} + P_{i+1} - 2P_i] + \frac{\phi \delta t^2}{\delta x} [R_{i-\frac{1}{2}} - R_{i+\frac{1}{2}}] \\ & \left. + \frac{\tau \delta t}{\delta x^2} [\rho_{i+1} + \rho_{i-1} - 2\rho_i] \right\}^n \quad (3-15) \end{aligned}$$

(3-14)式は連立方程式として解くことができる。解法は3.2.3項に示す。

### 3.2.1-3 エネルギー差分式の導出

(3-4)式のエネルギー式を差分近似化して次式で表わす。

$$\begin{aligned} \frac{(\rho E)_i^{n+1} - (\rho E)_i^n}{\delta t} = & \frac{1}{\delta x} [(\rho Eu)_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} - (\rho Eu)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}] + (\overline{pu})_{i-\frac{1}{2}} - (\overline{pu})_{i+\frac{1}{2}} / A_J \\ & + [\overline{\rho_1 u_i} \cos \theta / A_J + Q_i] \quad (3-16) \end{aligned}$$

右辺の諸量のうち、上線を付した量は圧力式を解いて得た量を用いることができる。

(3.2.3項を参照)

エネルギー束は次のように展開する。

$$\left. \begin{aligned} (\rho Eu)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} &= (\overline{\rho u})_{i+\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{E_{i+1} + E_i}{2} \right]^{n+1} \\ (\rho Eu)_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} &= (\overline{\rho u})_{i-\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{E_{i-1} + E_i}{2} \right]^{n+1} \end{aligned} \right\} \quad (3-17)$$

(3-16), (3-17)式よりエネルギー式は $E^{n+1}$ を未知量として(3-14)式と同様に次のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} -\left(\frac{1}{2}\right) \frac{\delta t}{\delta x} (\overline{\rho u})_{i-\frac{1}{2}} E_{i-1}^{n+1} + \left[ \overline{\rho_1} - \left(\frac{1}{2}\right) \frac{\delta t}{\delta x} \{(\overline{\rho u})_{i-\frac{1}{2}} - (\overline{\rho u})_{i+\frac{1}{2}}\} \right] E_i^{n+1} \\ + \left(\frac{1}{2}\right) \frac{\delta t}{\delta x} (\overline{\rho u})_{i+\frac{1}{2}} E_{i+1}^{n+1} = GH_i \quad (3-18) \end{aligned}$$

但し、

$$GH_i = (\rho E)_i^n + \frac{\delta t}{\delta x} \{ (\overline{pu})_{i-\frac{1}{2}} - (\overline{pu})_{i+\frac{1}{2}} \} / A_J$$

$$+ \{ (\overline{\rho u})_i \frac{1}{A_j} \cos \theta + Q_i \} \delta t \quad (3-19)$$

### 3.2.1-4 Flux 項の差分形式

#### (1) 質量束

SWACSコードでは質量束  $(\rho u)_{i \pm \frac{1}{2}}$  は一つの変数として記憶される。ただし、流速が必要な場合は中心差分によって展開する。

$$u_{i \pm \frac{1}{2}} = \frac{2 \cdot (\rho u)_{i \pm \frac{1}{2}}}{\rho_i + \rho_{i \pm 1}} \quad (3-20)$$

#### (2) 運動量束

オプションとして入力データで以下の内より選択することができる。

JCVT*) = -1 の場合	ZIP 差分形であり次のように展開する。	
	$(\rho u^2)_i = \rho_i \cdot u_{i-\frac{1}{2}} \cdot u_{i+\frac{1}{2}}$	
	$= (\rho u)_{i-\frac{1}{2}} \cdot (\rho u)_{i+\frac{1}{2}} \cdot \frac{4 \cdot \rho_i}{(\rho_i + \rho_{i-1}) \cdot (\rho_i + \rho_{i+1})}$	(3-21)
JCVT = 0 の場合	$(\rho u^2)_i = \frac{(\rho u)_{i-\frac{1}{2}} \cdot (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}}{\rho_i}$	(3-22)
JCVT = 1 の場合	JCVT = 0 の場合と同じであるが、破断端での扱いのみ異なる。(3.2.2(1)を参照)	

#### (3) エネルギー束

(3-17) 式に示した差分形を用いている。

### 3.2.1-5 擬似粘性項

運動量式中の擬似粘性項は(3-3)式に示した様に

$$q = -(\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3-3)$$

ここで、 $\lambda$ 、 $\mu$  は入力で与える定数である。

差分形では次のように表わす。

---

\*) JCVTは整数入力データ (#10) である。(5.1節を参照)

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial x} \Big|_{i+\frac{1}{2}} &= -(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_{i+\frac{1}{2}} \\ &\rightarrow -(\lambda + 2\mu) \frac{1}{\delta x^2} [u_{i+\frac{3}{2}} + u_{i-\frac{1}{2}} - 2u_{i+\frac{1}{2}}] \end{aligned} \quad (3-23)$$

3.2.1-6 整理

以上で導出された差分式は次の2つである。圧力差分式(3-14)式は次のように簡略化して表わす。

$$\beta_{11} \cdot P_{i-1}^{n+1} + \beta_{12} \cdot P_i^{n+1} + \beta_{13} \cdot P_{i+1}^{n+1} = G_i^n \quad (3-24)$$

ただし,  $\beta_{11} = -1$ ,  $\beta_{12} = (2 + \frac{1}{(a^2)_i^n} \cdot \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2})$ ,  $\beta_{13} = -1$

エネルギー差分式(3-18)式も同様に次のように表わすことができる。

$$\beta_{21} \cdot E_{i-1}^{n+1} + \beta_{22} \cdot E_i^{n+1} + \beta_{23} \cdot E_{i+1}^{n+1} = GH_i \quad (3-25)$$

ただし, 
$$\begin{cases} \beta_{21} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\delta t}{\delta x} \cdot (\bar{\rho u})_{i-\frac{1}{2}}, & \beta_{22} = \bar{\rho}_i - \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta t}{\delta x} [(\bar{\rho u})_{i-\frac{1}{2}} - (\bar{\rho u})_{i+\frac{1}{2}}] \\ \beta_{23} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta t}{\delta x} \cdot (\bar{\rho u})_{i+\frac{1}{2}} \end{cases}$$

3.2.2 境界条件

3.2.2-1 破断端境界

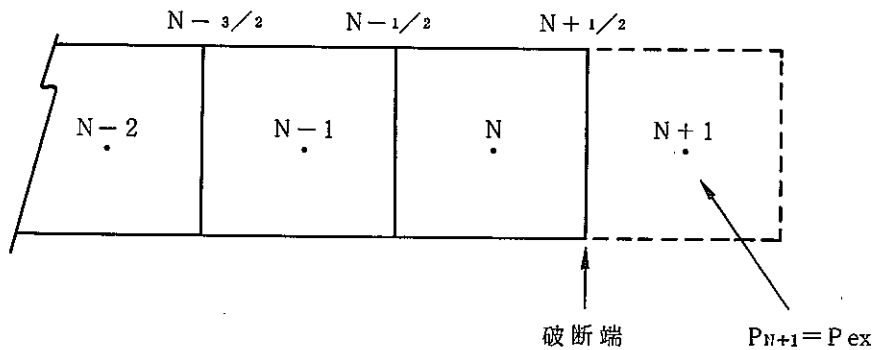


図 3.2-2 破断開放端のセルの扱い

図 3.2-2 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(Pex)は境界条件として入力を与えるので既知である。従って(3-24)式の圧力式は既知量を右辺に移して次式となる。

$$\beta_{11} \cdot P_{N-1}^{n+1} + \beta_{12} \cdot P_N^{n+1} = P_{ex} + G_N^n \quad (3-26)$$

(3-26) 式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。運動量束の取り扱いである。3.2.1-4(2)で述べた入力データによって次のように扱う。

JCVT = -1 の場合は (3-21) 式をそのまま使用する。

JCVT ≥ 0 の場合は次のように線形外挿する。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\delta x} [(\rho u^2)_N - (\rho u^2)_{N+1}] &\rightarrow \frac{2}{\delta x} [(\rho u^2)_N - (\rho u^2)_{N+\frac{1}{2}}] \\ &\rightarrow \frac{2}{\delta x} \left[ \frac{(\rho u)_{N-\frac{1}{2}} \cdot (\rho u)_{N+\frac{1}{2}}}{\rho_N} - \frac{\{(\rho u)_{N+\frac{1}{2}}\}^2}{\rho_{N+\frac{1}{2}}} \right] \end{aligned} \quad (3-27)$$

ただし、

$$\begin{cases} \rho_{N+\frac{1}{2}} \leftarrow \rho_N + (\rho_N - \rho_{N-1})/2 & \text{--- JCVT = 0 の場合} \\ \rho_{N+\frac{1}{2}} \leftarrow \rho_N & \text{--- JCVT = 1 の場合} \end{cases}$$

ここで、 $(\rho u)_{N+\frac{1}{2}}$  は破断端の質量流束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 (3-25) 式のエネルギー式は次式となる。

$$\beta_{21} \cdot E_{N-1}^{n+1} + \beta_{22} \cdot E_N^{n+1} = G_{H_N} \quad (3-28)$$

ただし、

$$\beta_{22} = \rho_N^{n+1} \frac{\delta t}{\delta x} \left[ \frac{1}{2} (\bar{\rho u})_{i-\frac{1}{2}} - (\bar{\rho u})_{i+\frac{1}{2}} \right]$$

### 3.2.2-2 ヘッダ側境界 (圧力, エンタルピー一定境界)

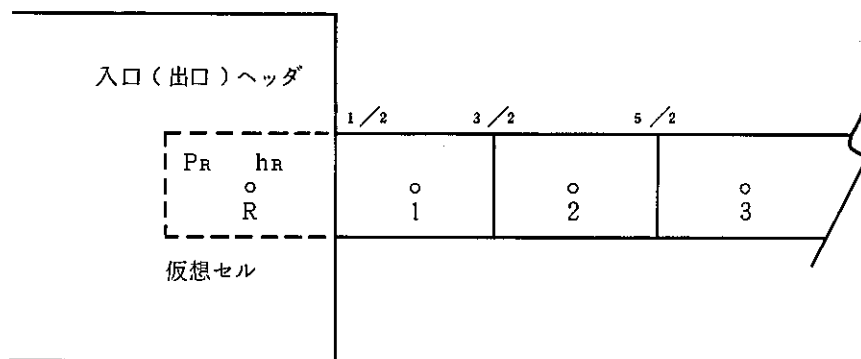


図 3.2-2 ヘッダ側境界のセルの扱い

ヘッド側の境界については、図 3.2-3 に示すように、ヘッド内状態(R)より 1 番目のセルの状態を次式で設定する。

$$\left. \begin{aligned} P_1^{n+1} &= P_R - K_R \left[ \frac{1}{2g} \cdot \rho_{\frac{1}{2}} \cdot u_{\frac{1}{2}}^2 \right]^n \\ u_{\frac{1}{2}}^n &= 2u_{\frac{3}{2}}^n - u_{\frac{5}{2}}^n \\ \rho_{\frac{1}{2}}^n &= \frac{1}{2} (\rho_R + \rho_1^n) \end{aligned} \right\} \quad (3-29)$$

圧力式は上記の  $P_1^{n+1}$  を用いて、

$$\beta_{12} \cdot P_2^{n+1} + \beta_{13} \cdot P_3^{n+1} = P_1^{n+1} + G_2^n \quad (3-30)$$

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。

$$h_1 = \frac{1}{2} (h_R + h_2) \quad (3-31)$$

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。

$$E_1 = \frac{1}{2} E_2 + \frac{1}{2} \left[ h_R + \frac{1}{gA_J} (u_1^2 - \frac{u_2^2}{2}) + 2 \left( \frac{P_2}{2\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1} \right) \cdot \frac{1}{A_J} \right] \quad (3-32)$$

(3-32) 式を (3-25) 式に代入することにより次式を得る。

$$\beta_{22}'' \cdot E_2 + \beta_{23} \cdot E_3 = GH_2 + GHA \quad (3-33)$$

ただし、

$$\left\{ \begin{aligned} \beta_{22}'' &= \bar{\rho}_2 - \frac{3}{4} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \cdot \left[ (\bar{\rho}u)_{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3} (\bar{\rho}u)_{\frac{5}{2}} \right] \\ GHA &= \frac{1}{4} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} (\bar{\rho}u)_{\frac{3}{2}} \left[ h_R + \frac{1}{g \cdot A_J} (\bar{u}_1^2 - \frac{\bar{u}_2^2}{2}) + \frac{2}{A_J} \left( \frac{\bar{P}_2}{2\rho_2} - \frac{\bar{P}_1}{\rho_1} \right) \right] \end{aligned} \right.$$

### 3.2.2-3 盲端境界 (流速=0)

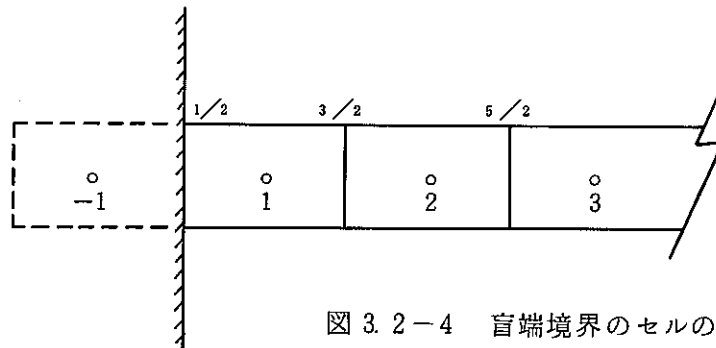


図 3.2-4 盲端境界のセルの扱い

盲端境界では図 3.2-4 に示すように端外側に -1 番目のセルを想定すると、境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} u_{\frac{1}{2}} &= 0 \\ P_{-1} &= P_1 \\ E_{-1} &= E_1 \end{aligned} \right\} \quad (3-34)$$

従って圧力式は

$$\beta_{12}''' \cdot P_1^{n+1} + \beta_{13} \cdot P_2^{n+1} = G_1^n \quad (3-35)$$

ただし、

$$\left\{ \begin{aligned} \beta_{12}''' &= 1 + \frac{1}{(a^2)_1^n} \cdot \frac{\delta x^2}{\phi \delta t^2} \\ G_1^n &= \frac{\delta x^2}{\phi \delta x^2 \cdot g} \left[ \frac{P_1}{(a^2)_1} \cdot g - \frac{\delta t}{\delta x} (\rho u)_{\frac{3}{2}} \right. \\ &\quad + \frac{\phi(1-\phi) \delta t^2}{\delta x^2} \cdot g (P_2 - P_1) - \frac{\phi \delta t^2}{\delta x} R_{\frac{3}{2}} \\ &\quad \left. + \frac{\tau \delta t}{\delta x^2} (\rho_2 - \rho_1) \right]^n \end{aligned} \right.$$

エネルギー式は同様に、

$$\beta_{22}''' \cdot E_1^{n+1} + \beta_{23} \cdot E_2^{n+1} = GH_1 \quad (3-36)$$

ただし、

$$\left\{ \begin{aligned} \beta_{22}''' &= \bar{\rho}_1 + \frac{1}{2} \frac{\delta t}{\delta x} (\bar{\rho} u)_{\frac{3}{2}} \\ GH_1 &= (\rho E)_1^n - \frac{\delta t}{\delta x} (\bar{P} u)_{\frac{3}{2}} / A_J \\ &\quad + \left\{ (\rho u)_1 \frac{1}{A_J} \cos \theta + Q_1 \right\} \delta t \end{aligned} \right.$$

### 3.2.3 計算の手順

(3-24) 式の圧力方程式は、(3-26)、(3-30)、(3-35) 式の境界端の式と共に解くことができる。







る。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i^{n+1} \leftarrow \bar{P}_i \\ E_i^{n+1} \leftarrow \bar{E}_i \\ I_i^{n+1} \leftarrow \bar{E}_i - \frac{(\bar{u}_{i-\frac{1}{2}} + \bar{u}_{i+\frac{1}{2}})^2}{8 \cdot g \cdot A_J} \\ H_i^{n+1} \leftarrow I_i^{n+1} + \frac{P_i^{n+1}}{\rho_i} \cdot \frac{1}{A_J} \\ \rho_i^{n+1} \leftarrow \text{EOS}(P_i^{n+1}, H_i^{n+1}) \\ (\rho u)_{i\pm\frac{1}{2}}^{n+1} \leftarrow (\rho u)_{i\pm\frac{1}{2}} \end{array} \right.$$

ここでEOSは状態式である。

### 3.3 状態方程式及び流動パラメータ

#### 3.3.1 状態方程式

水/蒸系の状態方程式は、エンタルピ及び圧力を入力することによって、比容積等の状態値を算出する形式になっている。近似形式は、非飽和状態の場合に中間変数  $Z = Z(P, H)$  等を使用し、4次の多項式近似を用いている。状態関数の種類は、以下の如くである。

a) サブクール水及び過熱蒸気の場合

$$\left\{ \begin{array}{l} v = v(P, H) = v'(Z) \\ T = T(P, H) \end{array} \right. \quad (3-40)$$

b) 飽和2相状態の場合

$$\left\{ \begin{array}{l} H_f = H_f(P) \\ H_g = H_g(P) \\ v_f = v(P, H_f) = v'(Z_f) \\ v_g = v(P, H_g) = v'(Z_g) \\ T_{\text{sat}} = T(P, H_f) \end{array} \right. \quad (3-41)$$

ここで、2相流中音速評価上必要な  $\frac{dv_f}{dP}$ ,  $\frac{dv_g}{dP}$ ,  $\frac{dH_f}{dP}$ ,  $\frac{dH_g}{dP}$  は、上記した関数の圧力微分式より、計算される。

また、音速については

a) 単相の場合

$$\frac{a^2}{g} = \frac{-v^2}{\left[ \left( \frac{\partial v}{\partial P} \right)_H + \frac{V}{A_J} \left( \frac{\partial v}{\partial H} \right)_P \right]} \quad (3-42)$$

ただし、液相（圧縮水）の場合は精度上の都合により、圧力と温度を入力としたテーブル形式で扱っている。

### 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

$$\frac{a^2}{g} = -v^2 / \left[ (1-X) \left( \frac{dv_f}{dP} \right) + X \left( \frac{dv_g}{dP} \right) + \frac{v_{fg}}{H_{fg}^2} \left\{ H_{fg} \frac{v}{A_J} + (H-H_g) \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{dH_f}{dP} - (H-H_f) \frac{dH_g}{dP} \right\} \right] \quad (3-43)$$

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

但し、低クオリティ 2 相流中の音速及び水単相流中の音速の不連続性に伴う数値計算上の不安定を防止する目的で、低クオリティ 2 相流中音速を以下の式で補正している。

$$(0 < X \leq XXQQ)$$

$$a = a_{TP, X=XXQQ} + \frac{a_{SPW} - a_{TP, X=XXQQ}}{XXQQ} (XXQQ - X) \quad (3-44)$$

ここで、 $a_{TP, X=XXQQ}$  はクオリティ =  $XXQQ$  <sup>\*)</sup> に対する音速、 $a_{SPW}$  は飽和水に対する音速である。

以上の外に水/蒸気の粘性係数は圧力、温度を入力としたテーブルより内挿計算により与えられる。

### 3.3.2 摩損損失

流体の摩擦圧損係数  $f_i$  は次式の積で表わす。

$$f_i = f_s \cdot \xi \cdot f_T \cdot f_v \quad (3-45)$$

#### a) 管摩擦損失係数 ( $f_s$ ) <sup>5)</sup>

臨界レイノルズ数  $\approx 2300$  を境として

$$\begin{cases} \text{層流の場合} & f_s = 64/Re \\ \text{乱流の場合} & \end{cases} \quad (3-46)$$

$$1/\sqrt{f_s} = -2 \log_{10} \left[ \frac{e/d_i}{3.71} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f_s}} \right] \quad (3-47)$$

ここで、 $Re$  はレイノルズ数 [-]、 $e$  は管壁の粗度 [m]、 $d_i$  は管内径 [m] である。

\*) 現在の version では  $XXQQ = 0.02$  を採用している。

b) 管曲率増倍係数 ( $\xi$ )<sup>6)</sup>

ヘリカルコイル曲率による増倍係数  $\xi$  は

$$\xi \begin{cases} = \left[ \text{Re} \cdot \left( \frac{d_i}{D_{\text{coil}}} \right)^2 \right]^{0.05} ; \text{Re} \left( \frac{d_i}{D_{\text{coil}}} \right) \geq 0.034 \\ = 1 & ; \text{Re} \left( \frac{d_i}{D_{\text{coil}}} \right) < 0.034 \end{cases} \quad (3-48)$$

ここで、 $D_{\text{coil}}$  はコイル径 [m] である。

c) 二相増倍係数 ( $f_T$ )<sup>7)</sup>

$$\begin{cases} \text{単相の場合} & f_T = 1 \\ \text{二相の場合} & \text{Martinelli-Nelson の係数を圧力、クオリティの関数としてテ} \\ & \text{ーブル化して使用。} \end{cases}$$

d) 換算係数 ( $f_v$ )

$f_v$  は二相増倍係数を乗ずる際、流速を液相流速に換算するための換算係数である。

$$\begin{cases} \text{単相の場合} & : f_v = 1 \\ \text{二相の場合} & : f_v = \frac{v_f}{x v_g + (1-x) v_f} = \frac{v_f}{v} \end{cases} \quad (3-49)$$

## 4. プログラムの内容

本プログラムは、現在、大リーク・ナトリウム-水反応解析コードSWACSの水噴出率計算モジュールとして使用されているので、プログラム構成はSWACSコードの水噴出率計算部分に該当する。以下に示すプログラム構成、フローチャートはSWACSコードより抜粋したものである。

### 4.1 プログラム構成

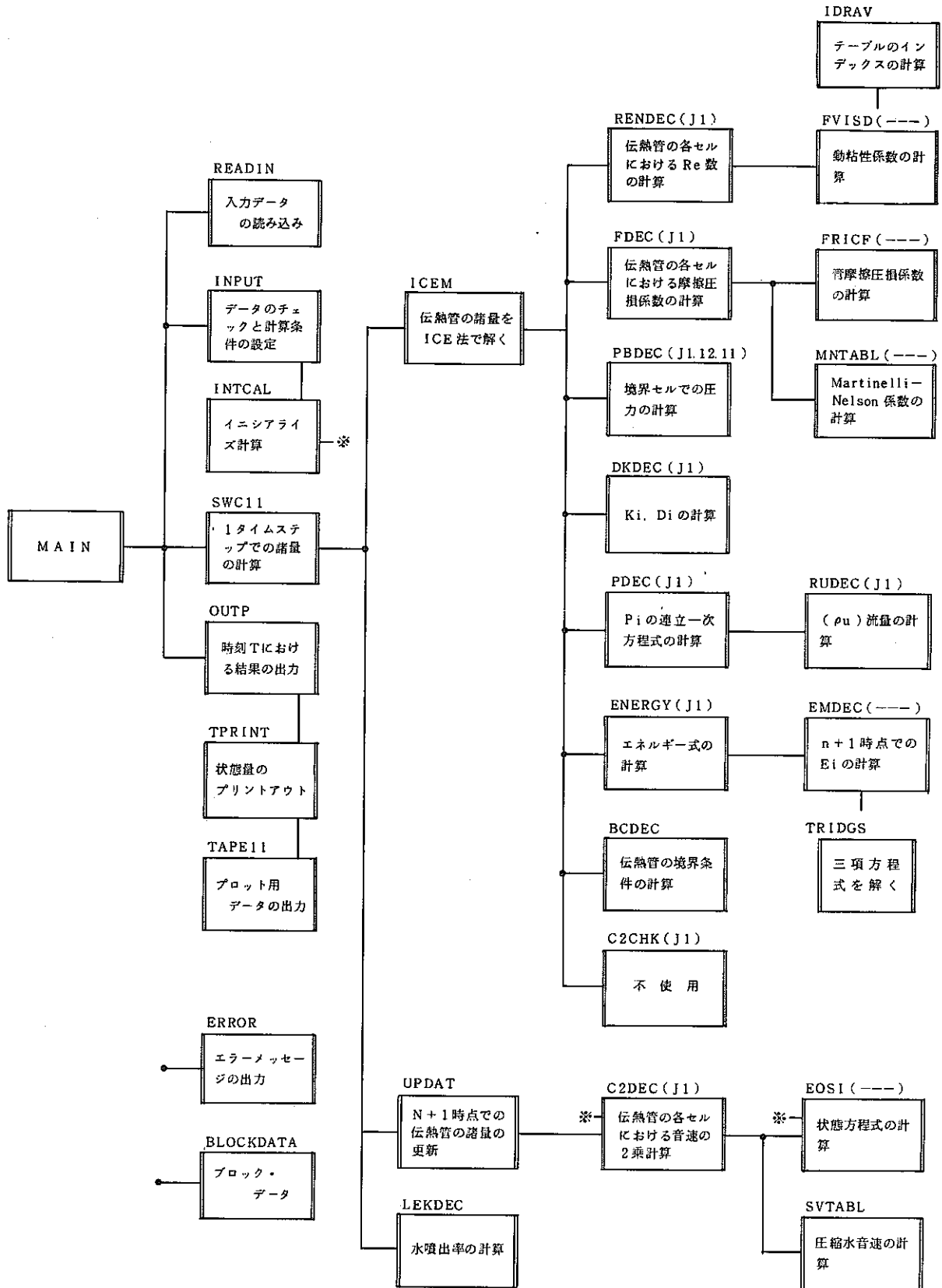
本コード(モジュール)は、JIS-FORTRANで書かれており、関係部分のステップ数は約3000,必要記憶容量は約380KBであり、31個のサブプログラムから構成されている\*)。本コードの構成を図4.1-1に示す。

### 4.2 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を、図4.2-1～図4.2-3に示す。

---

\*) SWACSコード全体としては約10,000ステップ,約800KBである。



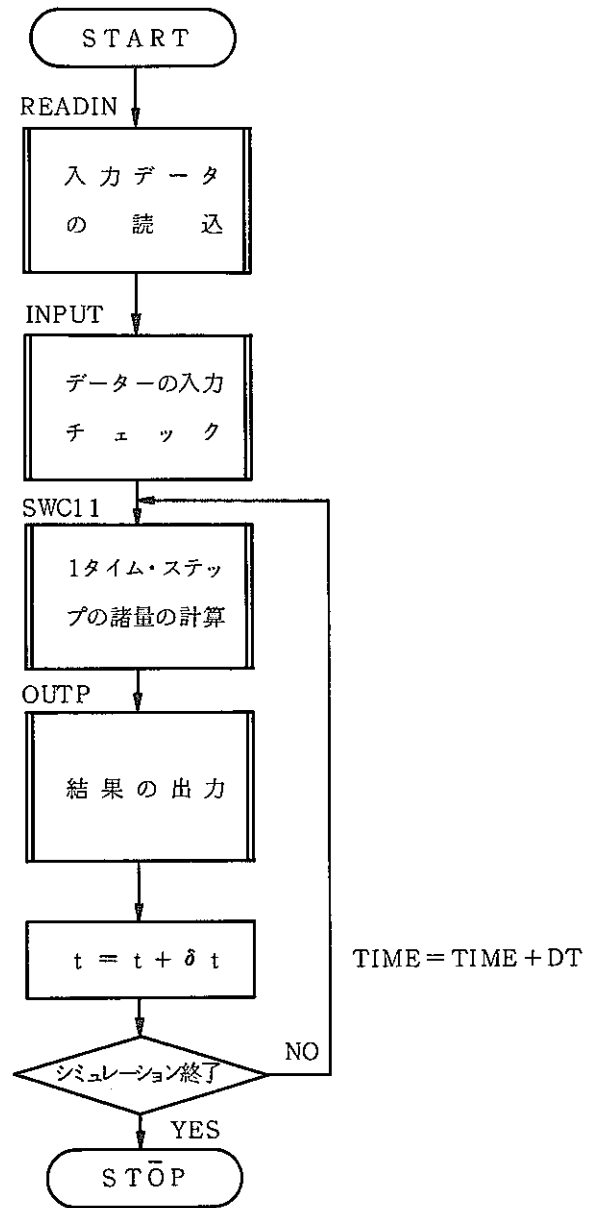


図 4.2-1 MAINのフローチャート

SWC11

蒸気発生器の  
諸量を計算する

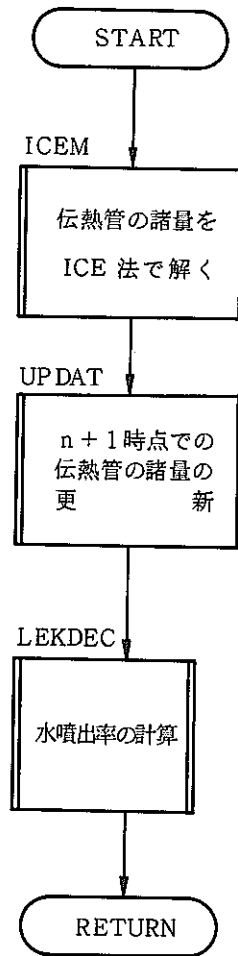


図 4.2-2 SWC11 のフローチャート



ICEM

伝熱管の諸量を  
ICE 法で解く

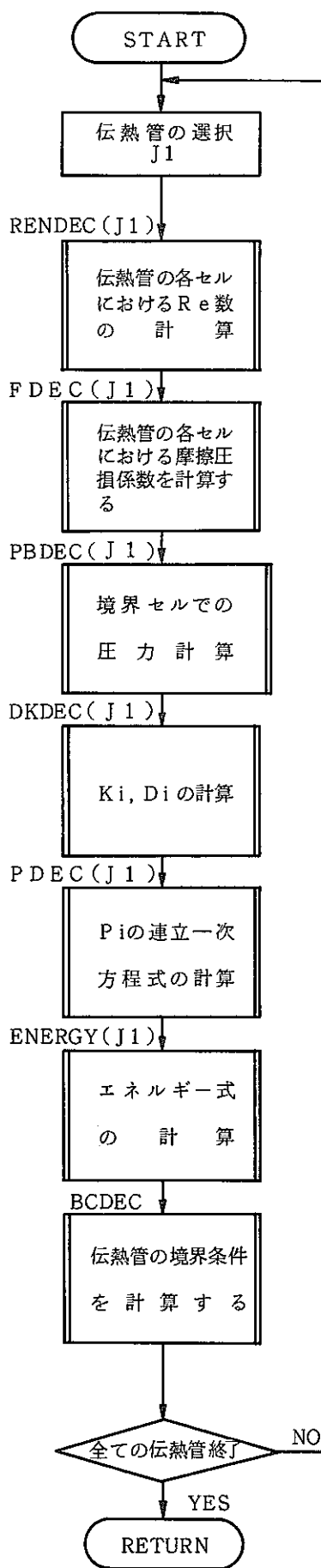


図 4.2-3 ICEM の  
フローチャート

## 5. 入出力形式

4章で説明した如く、本コードは、SWACSコードの1モジュールとして使用されているため本章では、SWACSコード内水リーク率計算関係部分の抜粋により、入出力形式を説明する。

### 5.1 入力データ・カード・デツクの構成

SWACSコードの入力データは、以下の5種類のデータ・ブロックから成る。

- (1) SWACSコントロール用データ・ブロック  
(各モジュールをコントロールするオプション関係のデータ・ブロック)
- (2) 水噴出計算用のデータ・ブロック
- (3) 初期スパイク圧計算用のデータ・ブロック
- (4) 準定常圧計算用のデータ・ブロック
- (5) 2次系内圧力波伝播計算用データ・ブロック

本報告書では上記のうち(1)、(2)について記載する。他についてはSWACSの使用説明書<sup>9)</sup>を参照されたい。

各々のデータ・ブロックは以下に示すデータにて構成される。

	FORMAT	カード枚数
I) タイトル・データ	20A4	1枚
II) 整数データ	2I6, 10I6	1枚以上
III) 整数形データ終了データ	ブランクカード	1枚
IV) 実数データ	2I6, 5E12.5	1枚以上
V) 実数形データ終了データ	ブランクカード	1枚

整数および実数データは相対番地形式で入力する形式になっており、初めの2I6のFORMATにより、1枚のカード上における最初のデータの番地番号をI6で記載し、次のI6で1枚のカードで読み込まれるデータ数を記載する。更に、10I6あるいは5E12.5のFORMATで先に記したデータ数だけ、値を記載する。これにより、読み込まれるデータは対応する番地にストアされることになる。なお、番地番号は、最初の番地番号より、データ数だけ連続して取られるので、番地に対応するデータがないものはブランクとするか、連続番号の番地で区切って1枚のカードとし、次は又、別のカードで同様に続けると良い。

特に注記されていない限り、入力を省略したデータは0、又は0.0とみなされる。また同じ番地のデータが複数回入力された場合は後で入力されたデータが有効になる。

説明文中で他のデータを引用する場合は、次の記号を用いた。

CONT-ID	--	SWRCS	コントロール	整数データ番地
CONT-RD	--		"	実数データ番地
SWAC11-ID	--	SWACS	水噴出率計算	整数データ番地
SWAC11-RD	--		"	実数データ番地

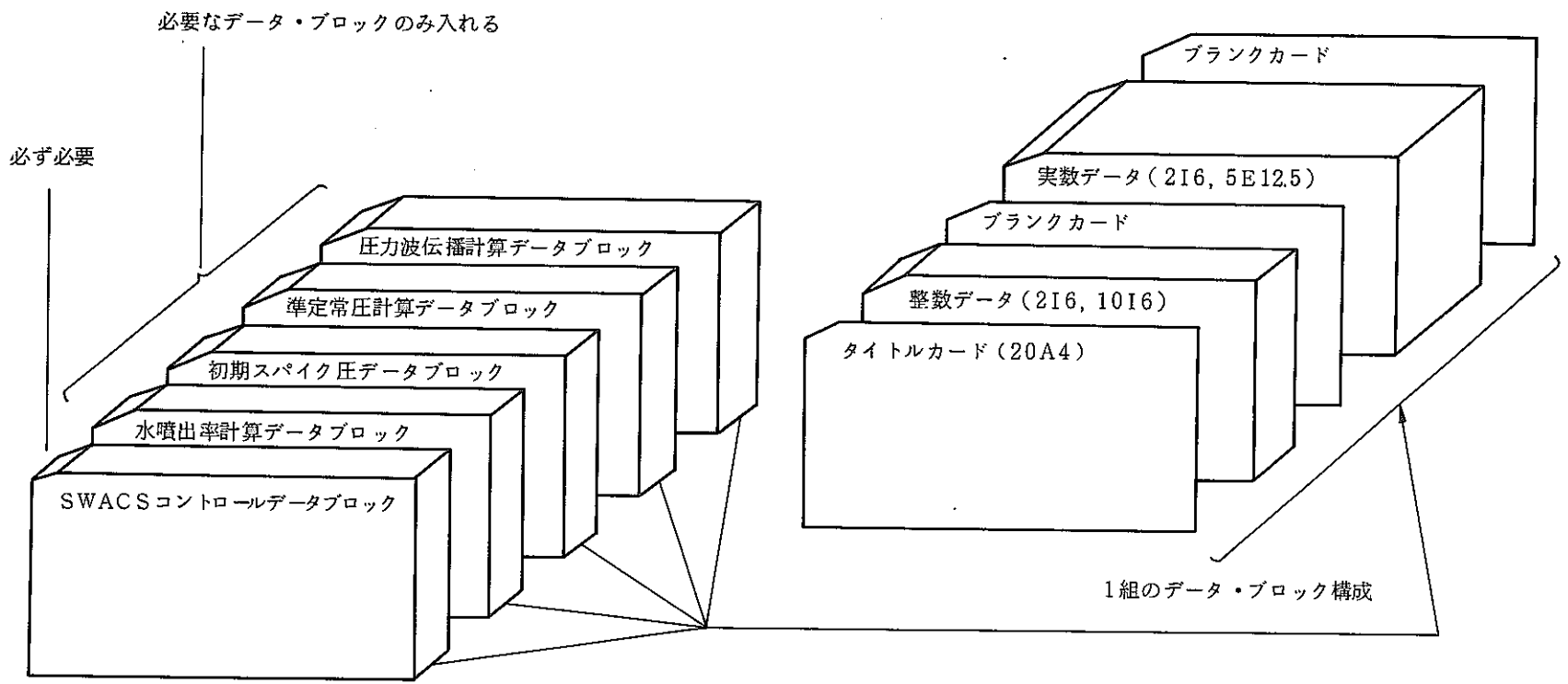
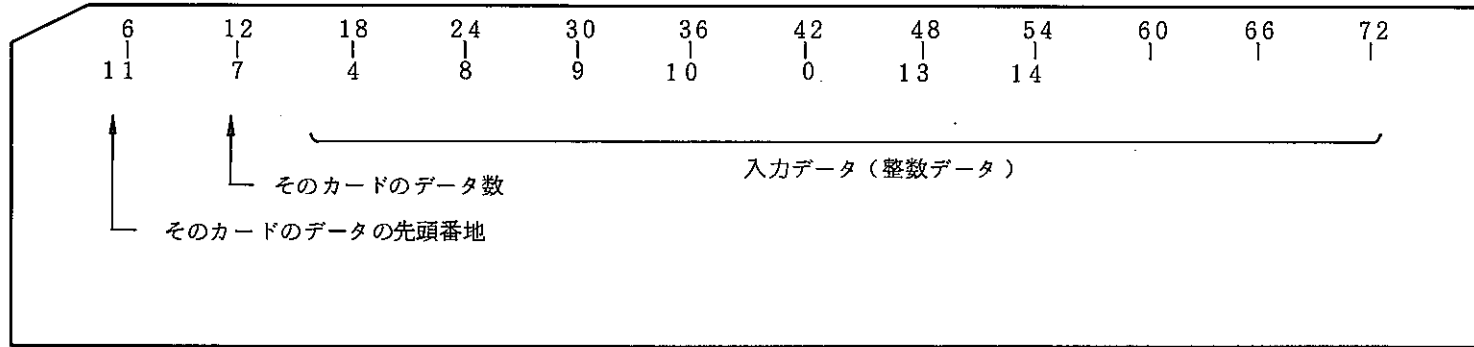


図 5.1-1 SWACSの入力データ・カード・デッキの構成

整数データ・カード ( 2I6, 10I6 )



実数データ・カード ( 2I6, 5E12.5 )

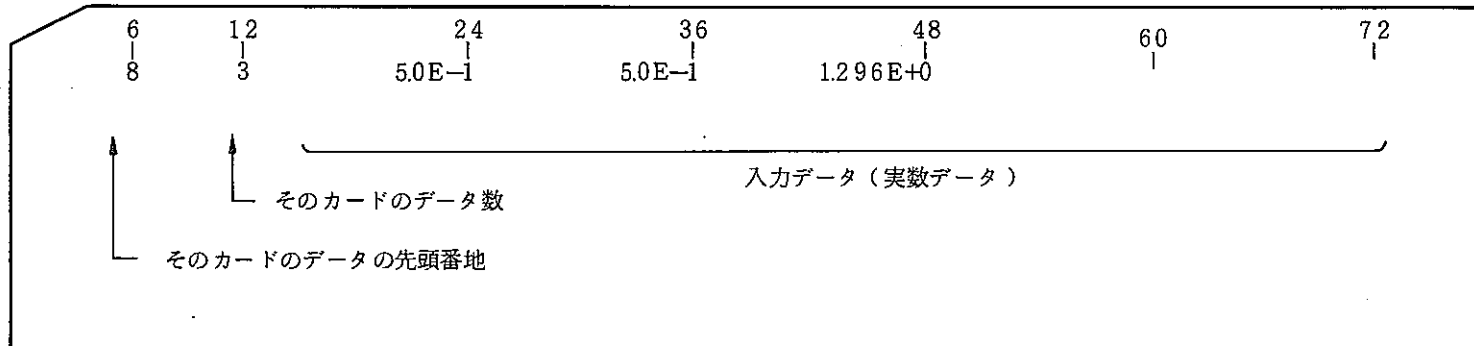


図 5.1-2 入力データ・カードの形式例

## 5.2 水噴出率計算入力データ

### 5.2.1 コントロール整数データ

表 5.2 - 1 にコントロール整数データの番地，記号とその内容について示す。\*)

### 5.2.2 コントロール実数データ

表 5.2 - 2 にコントロール実数データの番地，記号とその内容ならびに単位について示す。\*)

### 5.2.3 整数データ

表 5.2 - 3 に水噴出率計算整数データの番地，記号とその内容について示す。

### 5.2.4 実数データ

表 5.2 - 4 に水噴出率計算実数データの番地，記号とその内容ならびに単位について示す。

---

\*) 表 5.2.1，表 5.2.2 は SWACS コードのコントロールデータのうち水噴出率計算に関する部分のみ抜粋したものである。

表 5.2 - 1 コントロール整数データ (CONT-ID)

番地	記号	内 容
1	J I J C T	= 1 水噴出率計算を行う。 = 2 " をリスタート計算する。 = 0 " を行わない。
6	NSTEP	水噴出率計算ステップ数。 { 計算はCONT-ID6で指定するステップ数とCONT-RD2で指定する計算終了時刻の早い方で打ち切られる。 }
11	IOUT(i, 1) (i=1, 5)	水噴出率計算結果 (伝熱管内状態量) 出力コントロール※1) (リスタート・データの出力コントロールを兼ねる) ※2)
16	IOUT(i, 2) (i=1, 5)	水噴出率計算結果 (水噴出率) 出力コントロール※1) (水噴出率データ・ファイルの出力コントロールを兼ねる) ※3)
		※1) $\left[ \begin{array}{l} i = 1 \text{ 初期プリント ステップ間隔} \\ i = 2 \text{ 中期 " " } \\ i = 3 \text{ 後期 " " } \\ i = 4 \text{ 中期への切換ステップ} \\ i = 5 \text{ 後期への " } \end{array} \right]$
		<p>0 step                      IOUT(4, N) step                      IOUT(5, N) step</p> <p>└─ IOUT(1, N)毎にプリント ─┘ └─ IOUT(2, N)毎にプリント ─┘ └─ IOUT(3, N)毎にプリント ─┘</p>
		※2) リスタート・データの出力の有無はNTREST (CONT-ID37) で指定。
		※3) 水噴出率データ・ファイル (初期スパイク圧, 準定常圧計算用) の出力の有無はNTWAT (CONT-ID38) で指定。
37	NTREST	= 1 水噴出率計算のリスタート用データ・ファイルを作成する。 = 0 " " 作成しない。
38	NTWAT	= 1 水噴出率データ・ファイル (初期スパイク圧, 準定常圧計算用) を作成する。 = 0 " " 作成しない。
40	IPBACK	= 1 水噴出率計算で背圧を考慮しない。 = 0 " 考慮する。 (水噴出計算と初期スパイク圧計算を連動計算する)

番地	記号	内 容
41	ITER	水噴出率計算のリスタート計算時 ( J I J C T = 2 の時 ) 前回作成したリスタート用データ・ファイルの何番目のデータよりスタートするか。 ( 0 を入力すると最後のデータが入力される )
51	ISEL11	= 1 水噴出率計算のプロッタ用ファイルを作成する。 = 0 " " 作成しない。
55	ISKI11	≥ 1 水噴出率計算のプロッタ用ファイルの間引きステップ間隔 <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding-left: 10px; padding-right: 10px;">                     間引き間隔 = 1 で全ステップを記憶する。                      = N で, N ステップ毎に記憶し, ファイルの大きさは 1 / N になる。                 </div>
58	IPRINT	= 1 各プロッタ用データの最大値, 最小値をプリント・アウトする。 = 0 " " しない。

表 5.2-2 コントロール実数データ (CONT-RD)

番地	記号	内 容	単 位
1	TSTART	シミュレーション開始時刻 ( = 0.0 )	sec
2	TEIJ	水噴出率計算終了時刻	sec

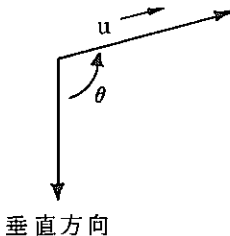


表 5.2 - 3 水噴出率計算整数データ (SWAC11-ID)

番地	記号	内 容
1	MBRKUB	破断上流側流路分割数 $\leq 300$
2	MBRKDB	破断下流側流路分割数 $\leq 300$
3	NTUBE	伝熱管本数
4	ITUBE	伝熱管形状の指定 = 0 曲管 = 1 直管
5	NBRK	伝熱管破断本数 $\leq NTUBE$
6	NY	初期伝熱管内状態量入力点数 $\leq 10$
7	IHBND	ヘッダ側境界条件のオプション = 0 圧力, エンタルピー一定条件 = 1 盲端  〔盲端境界条件の場合は, 上流側の伝熱管のみの計算を行う。〕 ( 5.2.5 - 1 参照 )
8	IBBND	破断端境界条件のオプション = 0 条件なし = 1 破断端セルの CMUL ( SWAC11-RD26 ) 倍で制限
9	IFCAL	摩擦損失係数の処理のオプション = 0 プログラム内の式で処理 = 1 入力値 ( SWAC11-RD28 ) 一定値とする。
10	JCVT	対流束項の処理のオプション  = $\begin{cases} -1 \\ 0 \\ 1 \end{cases}$ ( 3.2.1-4 参照 )
11	IDEBUG	= 0 デバッグ処理を行わない。 = 1 " を行う。  〔以下の SWAC11-ID12~19 は IDEBUG=1 の時のみ有効である。〕
12	MNOI	デバッグを行う上流側最小セル番号
13	MNOF	" " 最大セル番号
14	MNDI	" 下流側最小セル番号
15	MNDF	" " 最大セル番号
16	NW1I	デバッグを開始するステップ数 ( 各サブルーチンのプリント・アウト )

番地	記号	内 容
17	NW1F	デバッグを終了するステップ数 (各サブルーチンのプリント・アウト)
18	NWTPRI	“ 開始する “ (標準出力リストの “ )
19	NWTPRF	“ 終了する “
31	ITRMAX	REG3では不使用
32	ITRC	REG3では不使用
33	NSW	標準出力リストの各セルの状態量のプリント・アウトの際のセルの間引き 間隔 (defaultで1)
71	JTER	リスタート計算を行う場合, 前回の計算で作成した水噴出率データ・フ ァイル上の点数
72	NNREST	リスタート計算を行う場合, 前回の計算で作成したプロッタ用データ・フ ァイル上の点数  <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">                     JTER, NNRESTのデータは前回作成したファイルに継続書き 込みを行うための指定データである。                 </div>

表 5.2-4 水噴出率計算実数データ (SWAC11-RD)

番地	記号	内 容	単 位
1	RLU	上流側伝熱管長さ	m
2	RLD	下流側伝熱管長さ	m
3	DHEX	伝熱管の内径	m
4	DOHEX	” 外径	m
5	ROUGH	” 内面粗度	m
6	DCOIL	ヘリカルコイル径 (ITUBE (SWAC11-ID4)=0 の場合に有効)	m
7	THETA	伝熱管傾き <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">                     右図のようにとる。                      水平管では                      THETA=1.5708                 </div> 	rad
11	TDTC1	時間ステップ巾 ( $\Delta t$ ) 切換時刻	sec
12	TDTC2	”	sec
13	TDTC3	”	sec
14	DT	初回時間ステップ巾 ( $\Delta t$ )	sec
15	DT1	時間ステップ巾 (DT ~TDTC1)	sec
16	DT2	” (TDTC1~TDTC2)	sec
17	DT3	” (TDTC2~TDTC3)	sec
18	DT4	” (TDTC3~ )	sec
21	LAMDA	体積粘性係数	kg·sec/m <sup>2</sup>
22	MIU	粘性係数	kg·sec/m <sup>2</sup>
23	TAU	質量拡散係数	m <sup>2</sup> /sec
24	PSI	陰解法, 陽解法の重み係数 $0 < PSI \leq 1.0$	-
25	FAI	” $0 < FAI \leq 1.0$	-
26	CMUL	IBBND (SWAC11-ID8) = 1 の場合 破断端の流速を破断端セル音速×CMULで制限する。	-
27	AMB	不使用	-
28	FFR	IFCAL (SWAC11-ID9) = 1 の場合の摩擦損失係数	-
31	PP(1)	上流側ヘッド圧力 (境界条件)	kg/cm <sup>2</sup> ·a

番地	記号	内 容	単 位
32	PP(2)	下流側ヘッド圧力(境界条件)	kg/cm <sup>2</sup> ・a
33	HP(1)	上流側ヘッド比エンタルピー(境界条件)	Kcal/kg
34	HP(2)	下流側 " ( " )	Kcal/kg
41	WG	SG 1 基当りの水/蒸気重量流量	kg/sec
42	QT	SG 1 基当りの総伝熱量	Kwatt
43	AHTT	SG 1 基当りの総伝熱面積	m <sup>2</sup>
44	PEXB	破断部外圧(境界条件)	kg/cm <sup>2</sup> ・a
45	KLOSH1	ヘッド→伝熱管(流路縮小)形状圧損係数	—
46	KLOSH2	伝熱管→ヘッド(流路拡大) "	—
51	Y(i) (i=1, NY)	伝熱管内初期状態量入力点座標 (入口ヘッドよりの距離) 〔入力点数NYはSWAC11-ID6で指定〕	m
61	PY(i) (i=1, NY)	上記Y(I)に対応する初期圧力	kg/cm <sup>2</sup> ・a
71	HY(i) (i=1, NY)	上記Y(I)に対応する初期比エンタルピー	Kcal/kg
101	XXQQ	不使用	
102	GAMR	"	
103	ERRX	"	
104	GAMC	"	
105	ERRC	"	

### 5.2.5 補足説明

#### 5.2.5-1 計算モデル

- (1) 1次元の水/蒸気の流動を扱い、流路の分岐、流路断面積変化は扱えない。
- (2) 境界条件は破断開放端(瞬時完全開口)とリザーバ(圧力、エンタルピー一定)境界、あるいは盲端境界である。
- (3) SGの伝熱管破断時の水噴出率を評価するため両端の破断口よりの水噴出率を同時に計算することができる。すなわち破断口より入口ヘッド側の伝熱管(便宜上、上流側と呼ぶ)、と破断口より出口ヘッド側の伝熱管(下流側と呼ぶ)の両方の流動を同時に計算することができる。(IHBND(SWAC11-ID7)=0の場合)  
これに対し、破断端と逆の端が盲端境界の場合(IHBND=1)は、単管のみを扱う。  
IHBND=0,1の各々の場合の計算モデルを図5.2-1, 5.2-2に示す。

5.2.5 - 2 計算条件

(1) 初期条件

水噴出率計算では初期定常状態より、破断開口時間を零とにおいて瞬時完全開口条件のもとで計算を行なう。

入力データでは伝熱管各位置 (Y(i), SWAC11-RD51) における初期圧力 (PY(i), SWAC11-RD61) と比エンタルピー (HY(i), SWAC11-RD71), ならびにSG1基当りの水/蒸気重量流量 (WG, SWAC11-RD41) を指定する。各指定位置の間の値は線形内挿される。

初期流速は以上のデータより次式で計算される。

$$u_i = \frac{WG}{NTUBE \times A \times r_i} \quad \dots\dots (5-1)$$

ただし

- $u_i$  : セル i の初期流速 [m/sec]
- WG : SG 1 基当りの水/蒸気重量流量 [kg/sec]  
(SWAC11-ID41)
- NTUBE : 伝熱管本数 (SWAC11-ID3)
- A : 伝熱管内断面積 [m<sup>2</sup>]  
 $= \frac{\pi}{4} \times (DHEX)^2$
- DHEX : 伝熱管内径 [m] (SWAC11-RD4)
- $r_i$  : セル i の比重量 [kg/m<sup>3</sup>]

(2) 境界条件

水噴出率計算で扱われる境界条件は 3.2.2 項で述べたように破断開放端と上流端 (リザーバ, あるいは盲端) である。下表に境界条件を指定する入力データを示す。

表 5.2.1 境界条件の指定

	境界条件	指定入力データ
上流端	リザーバ (圧力, エンタルピー一定)	IHBND=0 (SWAC11-ID7) PP(1), PP(2) ( " -RD31).....圧力 HP(1), HP(2) ( " -RD33).....エンタルピー KLÖSH1, KLÖSH2 ( " -RD45,46) ...圧損
	盲端	IHBND=1
流出端	開放 (完全開口)	PEXB (SWAC11-RD44)

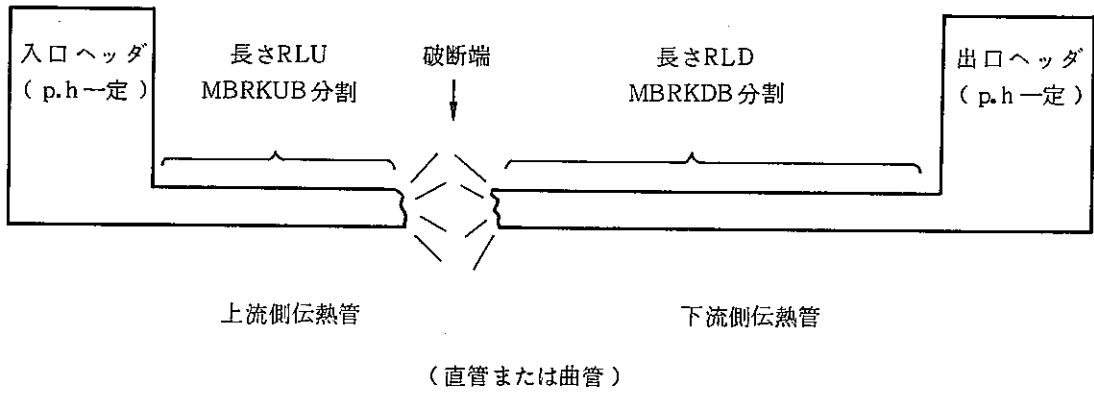


図 5.2-1 水噴出率計算モデル ( IHBND = 0 の場合 )

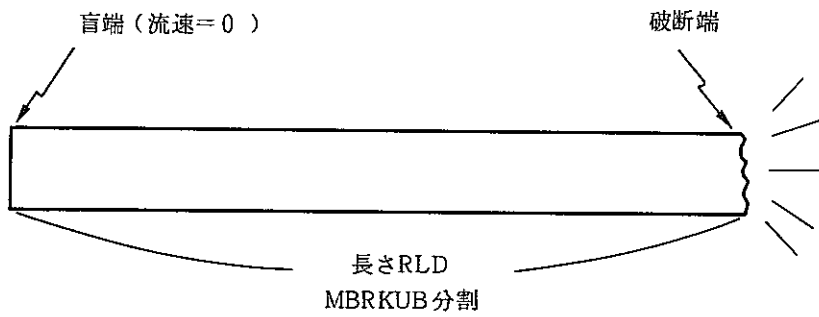


図 5.2-2 水噴出率計算モデル ( IHBND = 1 の場合 )

(3) その他の条件

i) 圧力損失の取扱い

伝熱管内の摩擦圧力損失については、入力データ IFCAL (SWAC11-ID9) により以下のように扱われる。

IFCAL=1の場合は摩擦損失係数を定数として、FFR (SWAC11-RD28) に入力する。

この場合の圧損は次式となる。

$$\Delta Pf = \frac{FFR}{2gdi} \cdot \gamma_i \cdot u_i^2 \cdot \Delta x \quad \dots\dots (5-2)$$

ここで di は管内径 [m],  $\gamma_i$  は比重量 [kg/m<sup>3</sup>],  $u_i$  は流速 [m/sec] である。

IFCAL=0 の場合はプログラムで各位置、各時刻におけるレイノルズ数を計算し次のように扱われる。

$$\Delta Pf = \frac{f_r \xi f_s}{2gdi} \cdot \gamma_i' \cdot u_i'^2 \cdot \Delta x \quad \dots\dots (5-3)$$

ここで  $f_r$  は二相増倍係数 (Martinelli-Nelson 係数) でありプログラムにテーブル化して内蔵している。

$\xi$  は管の曲率による増倍係数であり次式で与えられる。

ITUBE (SWAC11-ID4) = 0 の場合

$$\xi = \begin{cases} \left[ \text{Re} \cdot \left( \frac{di}{D_{coil}} \right)^2 \right]^{0.05} & \text{Re} \cdot \left( \frac{di}{D_{coil}} \right) \geq 0.034 \\ 1 & \text{Re} \cdot \left( \frac{di}{D_{coil}} \right) < 0.034 \end{cases} \quad \dots\dots (5-4)$$

ITUBE=1 の場合、すなわち直管の場合は  $\xi = 1$  である。

ここで Re はレイノルズ数,  $D_{coil}$  はコイル径 [m] であり入力データ (SWAC11-RD6) で与える。

$f_s$  は通常の管摩擦係数であり、次式で与える。

$$\begin{cases} \text{Re} < 2300 & f_s = 64 / \text{Re} \quad \dots\dots (5-5) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{Re} \geq 2300 & \frac{1}{\sqrt{f_s}} = -2 \log_{10} \left[ \frac{e/di}{3.71} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f_s}} \right] \quad \dots\dots (5-6) \end{cases}$$

ここで e (=ROUGH) は管壁の粗度であり入力データ (SWAC11-RD5) で与える。

$\gamma_i', u_i'$  は各々、二相増倍係数を乗ずる際の換算比重量と流速である。

ii) 入熱の取扱い

伝熱管壁より流入 (出) する入熱については以下のように簡略化して扱う。

- ① 熱伝熱量は、一定の値とし、水側、及び Na 側の流動変化の影響は考えないものとする。

- 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。

以上の仮定により入力データで与える  $Q_t$  (SWAC11-RD42) と，エネルギー式 (3-4) 式中の  $Q$  (単位体積当りの入熱) の関係は次のようになる。

平均熱伝達量は

$$Q_{av} = \frac{Q_t}{4.18 \times A_t} \quad [\text{Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}] \quad \dots\dots (5-7)$$

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

$$A_m = \pi d_o \Delta x \quad [\text{m}^2] \quad \dots\dots (5-8)$$

入熱量

$$Q' = Q_{av} \times A_m \quad [\text{Kcal}/\text{sec}] \quad \dots\dots (5-9)$$

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

$$\begin{aligned} Q &= Q' / \left( \frac{\pi d_i^2}{4} \Delta x \right) = Q_{av} A_m / \left( \frac{\pi d_i^2}{4} \Delta x \right) \\ &= (Q_t \cdot d_o) / (1.045 \cdot A_t \cdot d_i^2) \quad [\text{Kcal}/\text{m}^3 \cdot \text{sec}] \quad \dots\dots (5-10) \end{aligned}$$

ただし

総伝熱量	$Q_t$	[Kwatt] (SWAC11-RD42)
総伝熱面積	$A_t$ (外径基準)	[m <sup>2</sup> ] (SWAC11-RD43)
伝熱管 1 メッシュ当りの入熱	$Q'$	[Kcal/sec]
伝熱管内，外径	$d_i, d_o$	[m]
平均熱伝達量	$Q_{av}$	[Kcal/m <sup>2</sup> · sec]

この (5-10) 式の処理はイニシアライズのルーチンで行われ， $Q$  は定数として扱われる。

### 5.2.5-3 計算メッシュ巾

数値計算に使用される空間メッシュ巾，時間ステップ巾は各々次のように決める。

#### (1) 空間メッシュ巾 ( $\Delta x$ )

上流側伝熱管について

$$\Delta x_1 = RLU / MBRKUB \quad [\text{m}]$$

下流側伝熱管について

$$\Delta x_2 = RLD / MBRKDB \quad [\text{m}]$$

..... (5-11)



ただし

RLU	: 上流側伝熱管長さ	〔m〕	(SWAC11-RD1)
RLD	: 下流側	"〔m〕	(SWAC11-RD2)
MBRKDB	: 上流側伝熱管分割数		(SWAC11-ID1)
MBRKUB	: 下流側	"〔m〕	(SWAC11-ID2)

$\Delta x$  の大きさは、二相流の流出となる場合、計算開始直後の計算結果に対してかなり大きな効果を持つため、事情の許す範囲で小さな値とすることが望ましい。

## (2) 時間ステップ巾 ( $\Delta t$ )

時間ステップ巾 ( $\Delta t$ ) は入力データ SWAC11-RD14~18 で与える。値としては次式で表わされる Courant 条件を満たす範囲で選ぶ。

$$\Delta t \leq \left| \frac{\Delta x}{a} \right| \min \quad \dots\dots\dots (5-12)$$

ここで  $a$  は水/蒸気の音速で、高温圧縮水の場合 1,200~1,600m/sec の値である。特に厳しい初期条件より計算を開始する場合は、(5-12) 式で決まる  $\Delta t$  の 1/2 程度以下の値で計算を開始するとよい。(6.1.4 項を参照)

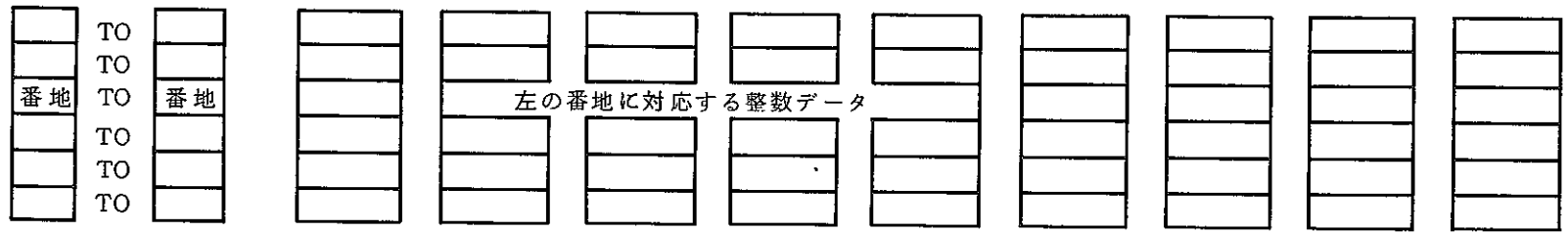
## 5.3 出力形式

図 5.3-1 に入力データのプリント形式、図 5.3-2 に計算結果のプリント形式を示す。

他に、SWACSコードの他の計算モジュール(初期スパイク圧計算、準定常圧計算)とのデータの引渡しのためのデータファイル、リスタート計算のためのデータファイル、プロッタープログラムのためのデータファイルを作成することができるが詳細はSWACSコードの使用説明書<sup>8)</sup>を参照されたい。

\*\*\* タイトルカード

FIXED POINT INPUT DATA



FLOATING POINT INPUT DATA

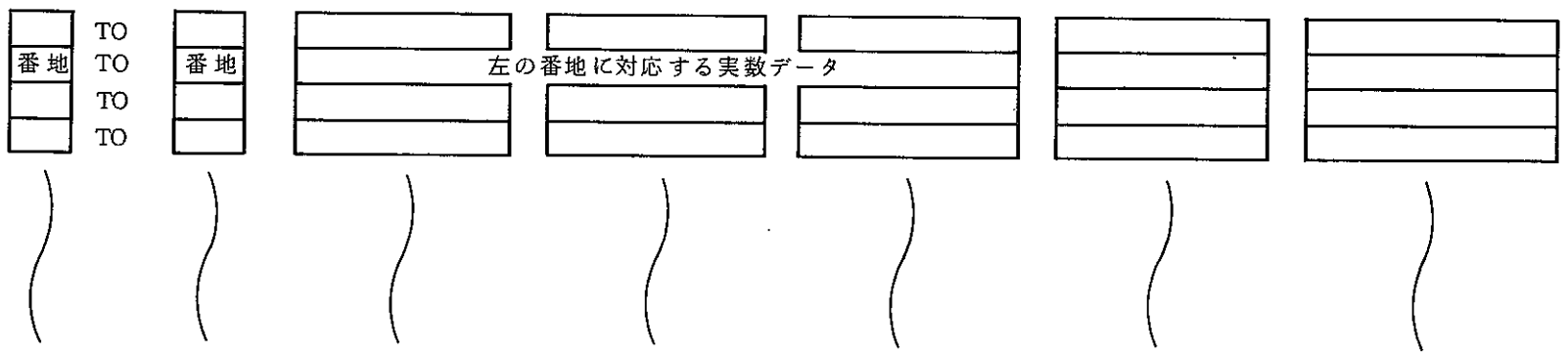


図 5.3-1 入力データの出力形式

〔伝熱管状態量の出力〕

\*\*STATE OF TUBE\*\*

I STEP =  TIME =  (SEC)

J2	U	W	P	H	I	E	T	R	VÖID	C
セル番号	流速	流量	圧力	エンタルピー	内部エネルギー	全エネルギー	温度	比重量	ボイト率	音速
	[m/sec]	[kg/sec]	[kg/cm <sup>2</sup> ]	[kcal/kg]	[kcal/kg]	[kcal/kg]	[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[—]	[m/sec]

〔水噴出率の出力〕

JTER = <input type="text"/>	TIME11 = <input type="text"/>	RLEAKU = <input type="text"/>	RLEAKD = <input type="text"/>	RLEAK = <input type="text"/>
) = <input type="text"/>	) = <input type="text"/>	) = <input type="text"/>	) = <input type="text"/>	) = <input type="text"/>
) = <input type="text"/>	) = <input type="text"/>	) = <input type="text"/>	) = <input type="text"/>	) = <input type="text"/>
) = <input type="text"/>	) = <input type="text"/>	) = <input type="text"/>	) = <input type="text"/>	) = <input type="text"/>
出力回数	時間	上流側	下流側	合計した
	(SEC)	水噴出率	水噴出率	水噴出率
		[kg/本・S]	[kg/本・S]	[kg/S]

図 5.3-2 水噴出計算の出力形式

## 6. 例題計算

本章では、本コードの機能の検証を目的として以下の例題計算を行ったので、その結果について記す。

(1) Edwards' Standard Problem No. 1<sup>8)</sup>の計算

(2) 高速増殖原型炉級SG(蒸発器)設計例に対するデモンストレーション計算

ここで、上記(1)は、初期スパイク圧発生領域における注水率の妥当性評価を目的とし、(2)は、実機SGに対するコードの適用性評価を主な目的として実施した。

### 6.1 Edwards' Standard Problem No 1 の計算

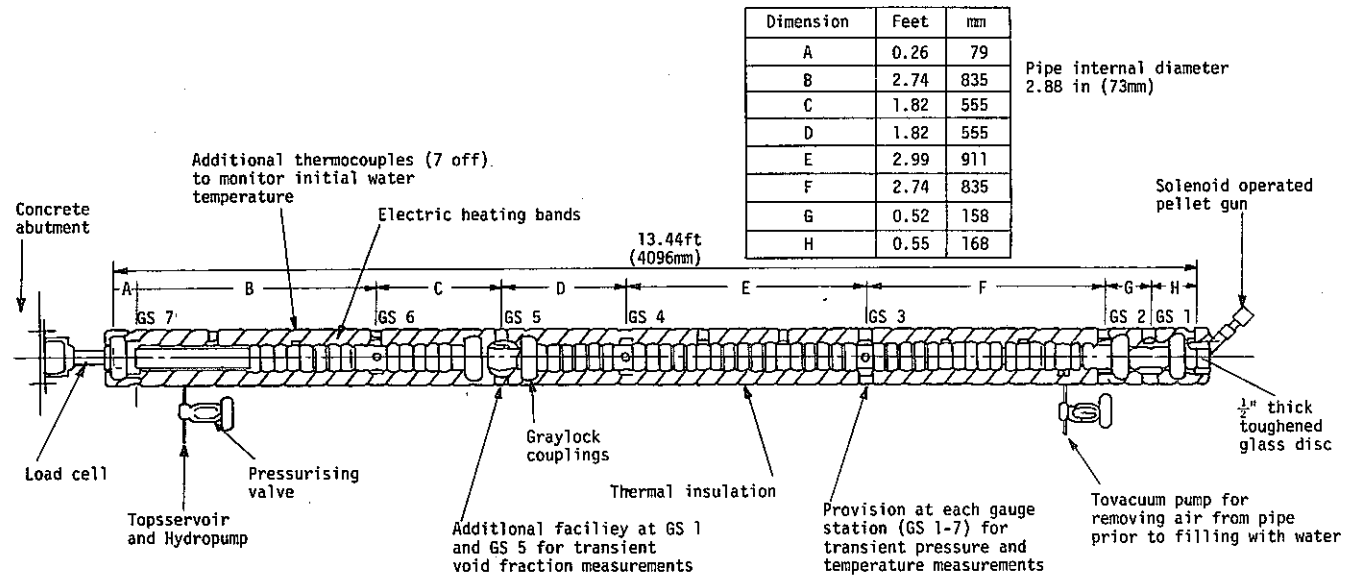
#### 6.1.1 Edwards 等の実験

実験装置を図 6.1.1 に示す。図に示されるようにサブクール状態の加圧水は水平直管(内径 73 mm, 長さ 4.1 m)に封入されており、均一な初期温度分布を持つように直管はバンドヒーターで加熱されている。水が予定した温度、圧力に達すると管の一端に取り付けられているガラス製円板がペレットガンによって破られ、水リークが開始されるようになっている。

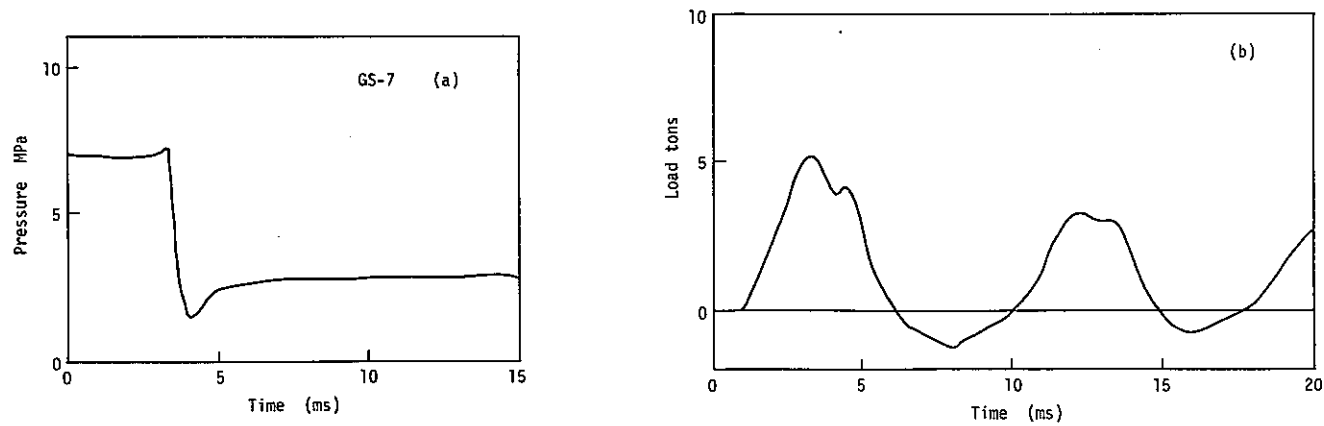
図 6.1.1 に示す GS1 から GS7 の 7 か所の測定点では圧力と温度変化が計測され、GS2 と GS5 では X 線を用いてボイド率も計測されている。

図 6.1.2 に実験結果の代表例を示す。本図(a)に示される GS7 の圧力は開口後 3~4 ms で急減し、飽和圧力以下になり熱力学的非平衡状態を示す。GS7 ではアンダースhoot 後、圧力は序々に回復している。各測定点で記録された圧力変動から計算された減圧波の伝播速度は 1234 m/s, である。水の音速は 242°C で 1265 m/s, であることから、減圧波はほぼ水の音速で上流に伝播していることが分る。

上記 Edwards らの実験は OECD の CSNI の Standard Problem No. 1 として採用された。



6.1-1 General arrangement of blowdown pipe



6.1-2 Transients of Pressure and Load (7.0MPa, 240°C)

6.1.2 計算条件

(1) 計算体系

モデル図は図 6.1.3 に示す如くであり、セル数 N は、82 である。

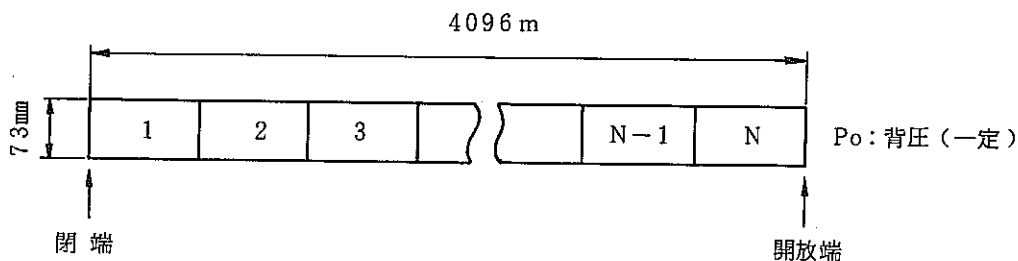


図 6.1-3 体系モデル図

(2) 初期条件

初期圧力は、 $10001 \text{ b/in}^2 \text{ g}$  ( $71.32 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ ) の一様分布とする。

各測定点 (GS-1~GS-7) における測定温度は誤差が大きいため、初期温度分布としてこの測定温度を使用せず、各測定点の飽和圧力から換算された Adjusted Temperature を使用した。<sup>9)</sup> 各測定点 (GS-1~GS-7) における Adjusted Temperature とエンタルピを 6.1.1 に示す。

表 6.1.1 Adjusted Temperature とエンタルピ

測定点	開放端からの距離 (mm)	温度 (°C)	エンタルピ (Kcal/kg)
GS-1	168	225	231
GS-2	326	224	231
GS-3	1161	232	239
GS-4	2072	231	237
GS-5	2627	232	239
GS-6	3182	234	241
GS-7	4017	231	237

また、Adjusted Temperature 分布を、図 6.1.4 に示す。各ノードの温度は、図 6.1.4 から求めた値を初期値とする。

(3) その他

開放端の破断は、瞬時に生じるものとし、完全開口を仮定した。

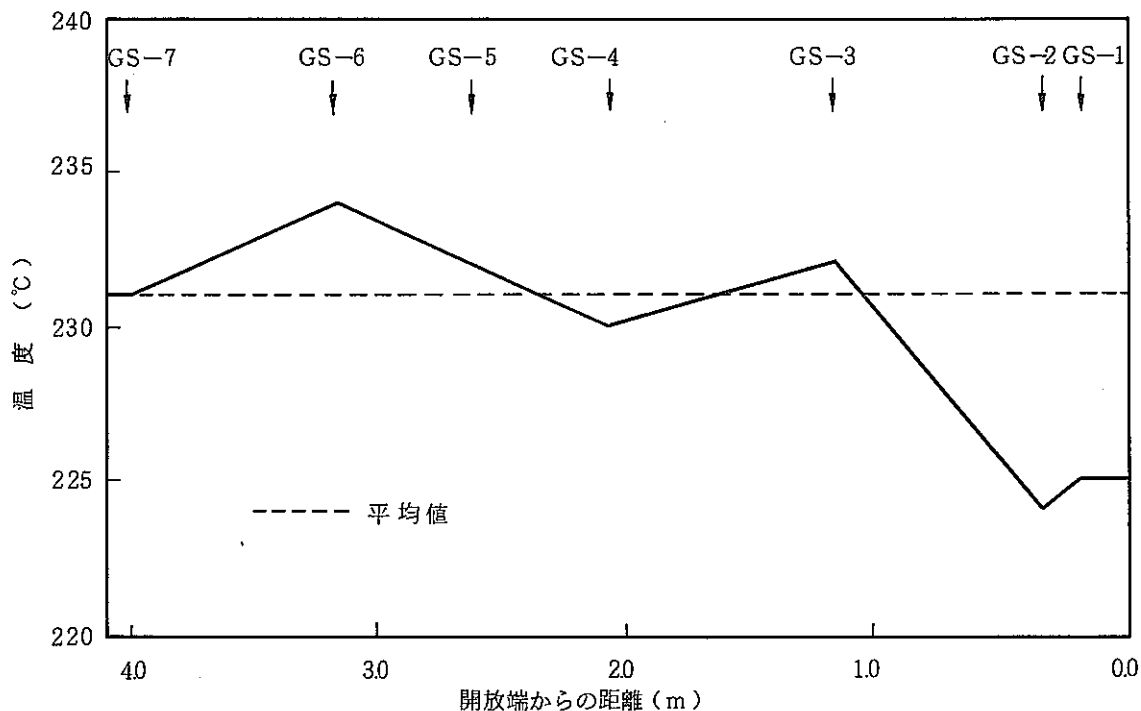


図 6.1-4 Adjusted Temperature 分布

6.1.3 計算結果

計算結果を以下の要領で記載する。

図 6.1-5 開口部における水リーク率変化

図 6.1-6 } GS-1~GS-7における圧力測定点についての圧力変化

} (実験値と併記)

図 6.1-12 }

図 6.1-13 GS-5におけるボイド率変化(実験値と併記)

図 6.1-14 時間  $t=0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15$ , msecにおける管内軸方向圧力分布

計算結果の概要をまとめると次の如くである。

- (1) 水リーク率は初期に  $6.72 \text{ kg/s}$  のピークに達した後、降下し約  $3.7 \text{ kg/s}$  で定常化する。
- (2) GS-1~GS-7の各点の圧力変化は概ね測定値と一致している。ただしGS-3~GS-7の測定値にみられる under shoot は解析では生じない。この under shoot は、沸騰の時間遅れによって生じるものと考えられ、気液平衡を仮定している本コードでは、模

擬し得ない。

- (3) ボイド率の計算結果は、減圧波が到達すると約 0.5 ~ 0.6 に立ち上がる計算結果となっている。

Edwards の測定値は、初期は約 0.15 程度 (GS-5) であり、計算値はかなり大きい。

- (4) 図 6.1.14 より読みとる減圧波の伝播速度は約 1200 m/s で、計算コードで使用している音速 (初期状態  $P_0 = 7.13 \text{ kg/cm}^2\text{a}$   $T_0 = 225^\circ\text{C}$  で 1244 m/s) にほぼ等しく、測定値 (1234 m/s) とも一致する。



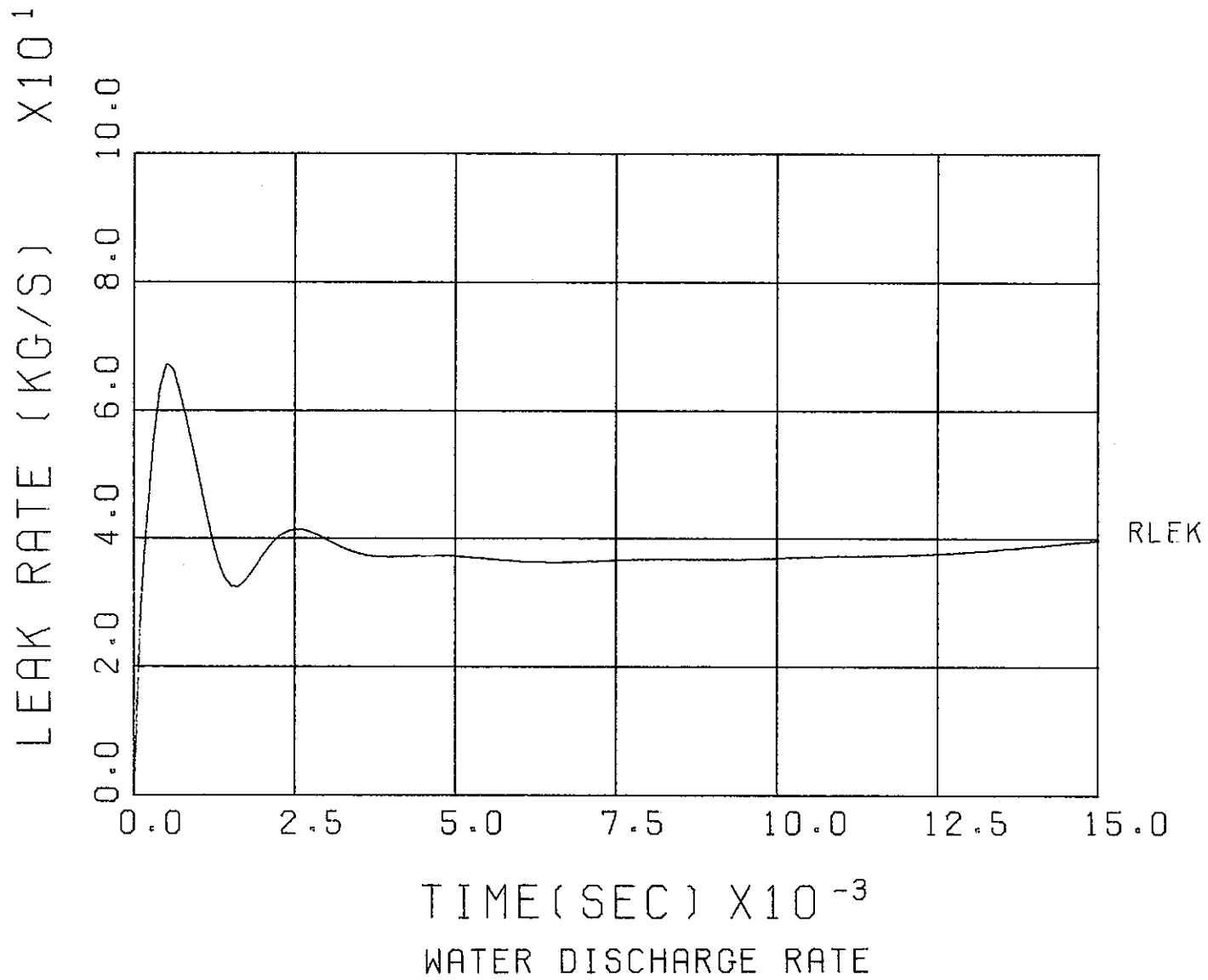


FIG. 6.1-5 STANDARD PROBLEM NO.1 ANALYSIS (SWACS)

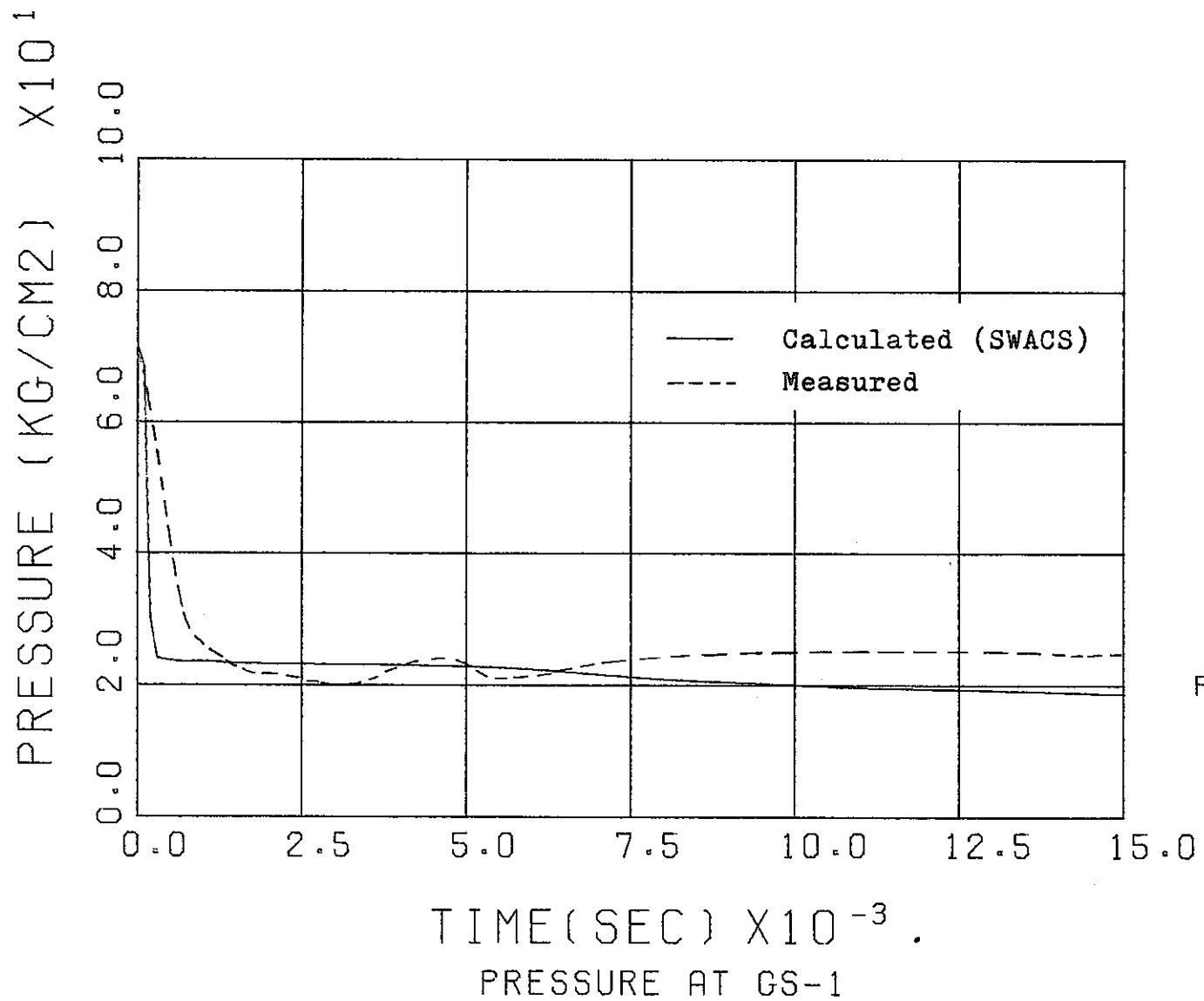


FIG. 6.1-6 STANDARD PROBLEM NO.1 ANALYSIS (SWACS)

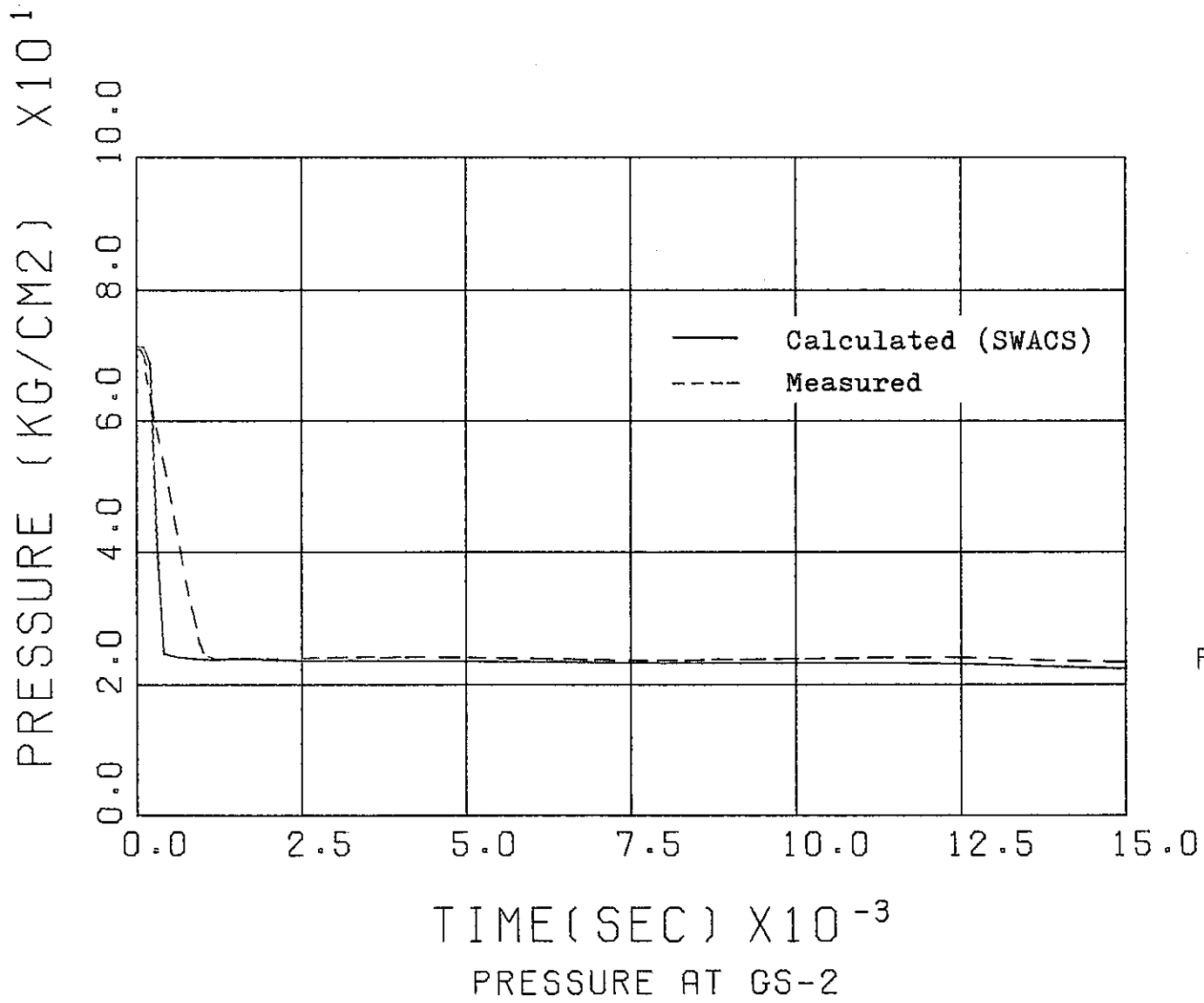


FIG. 6.1-7 STANDARD PROBLEM NO.1 ANALYSIS (SWACS)

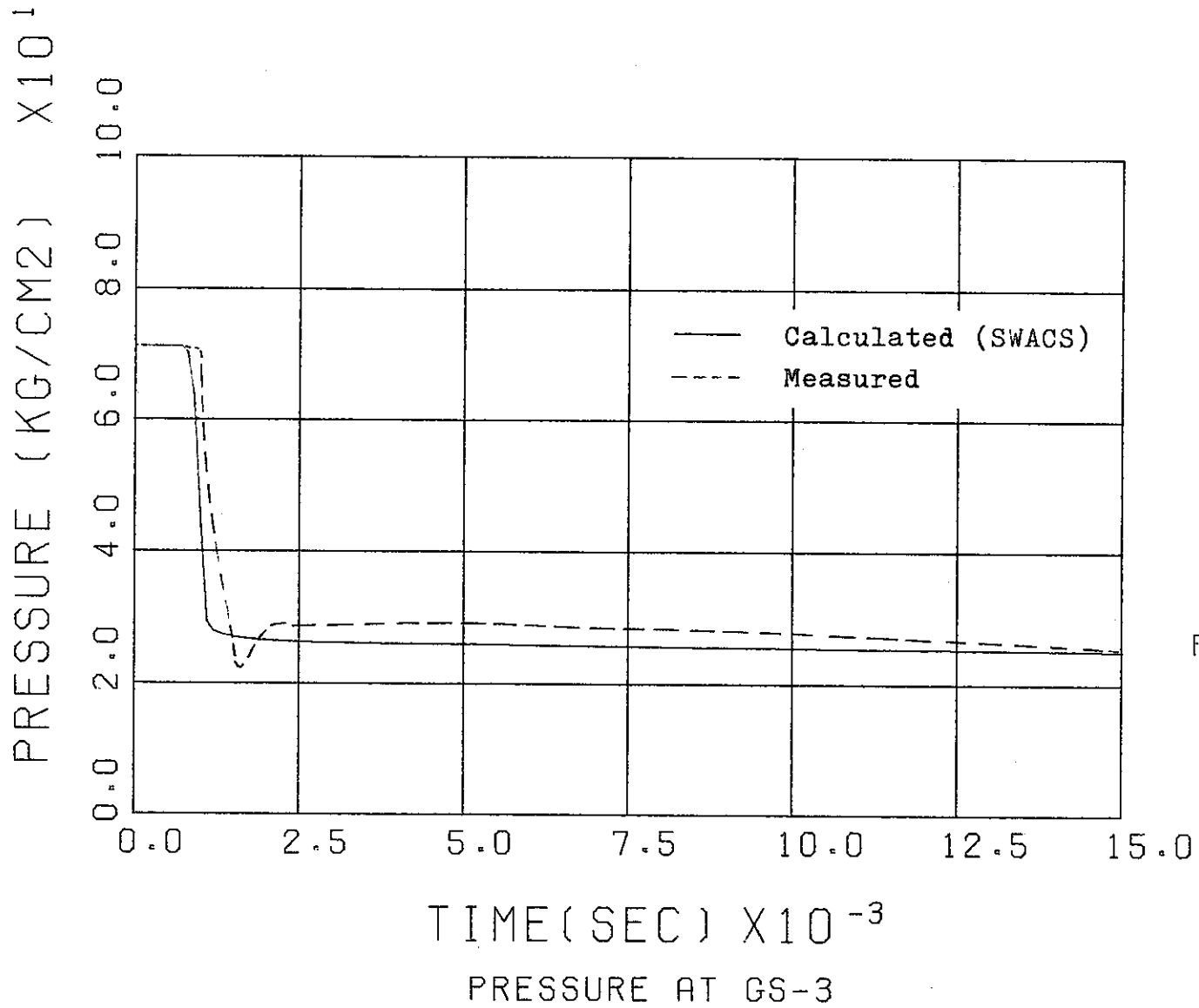


FIG. 6.1-8 STANDARD PROBLEM NO.1 ANALYSIS (SWACS)

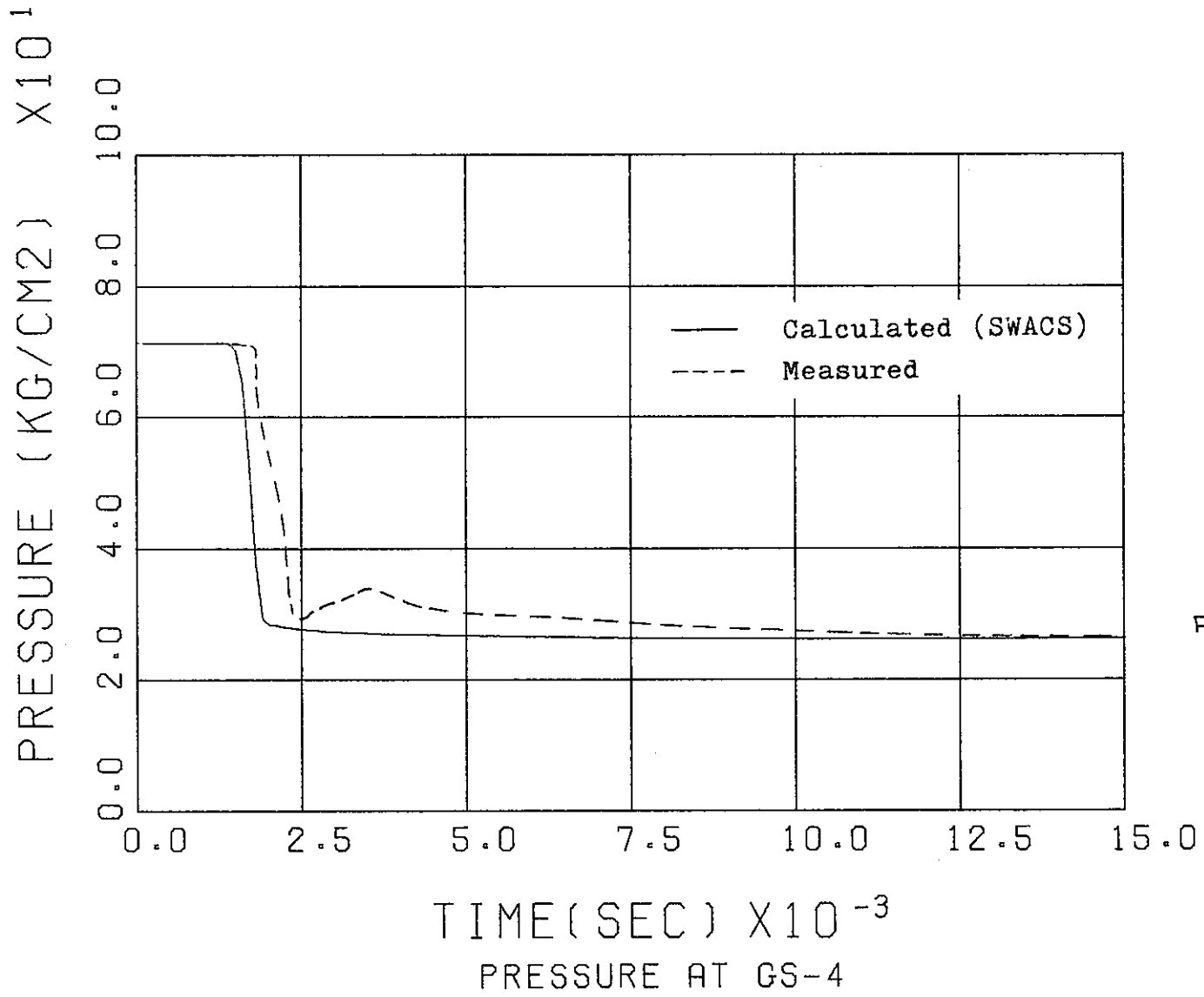


FIG. 6.1-9 STANDARD PROBLEM NO.1 ANALYSIS (SWACS)

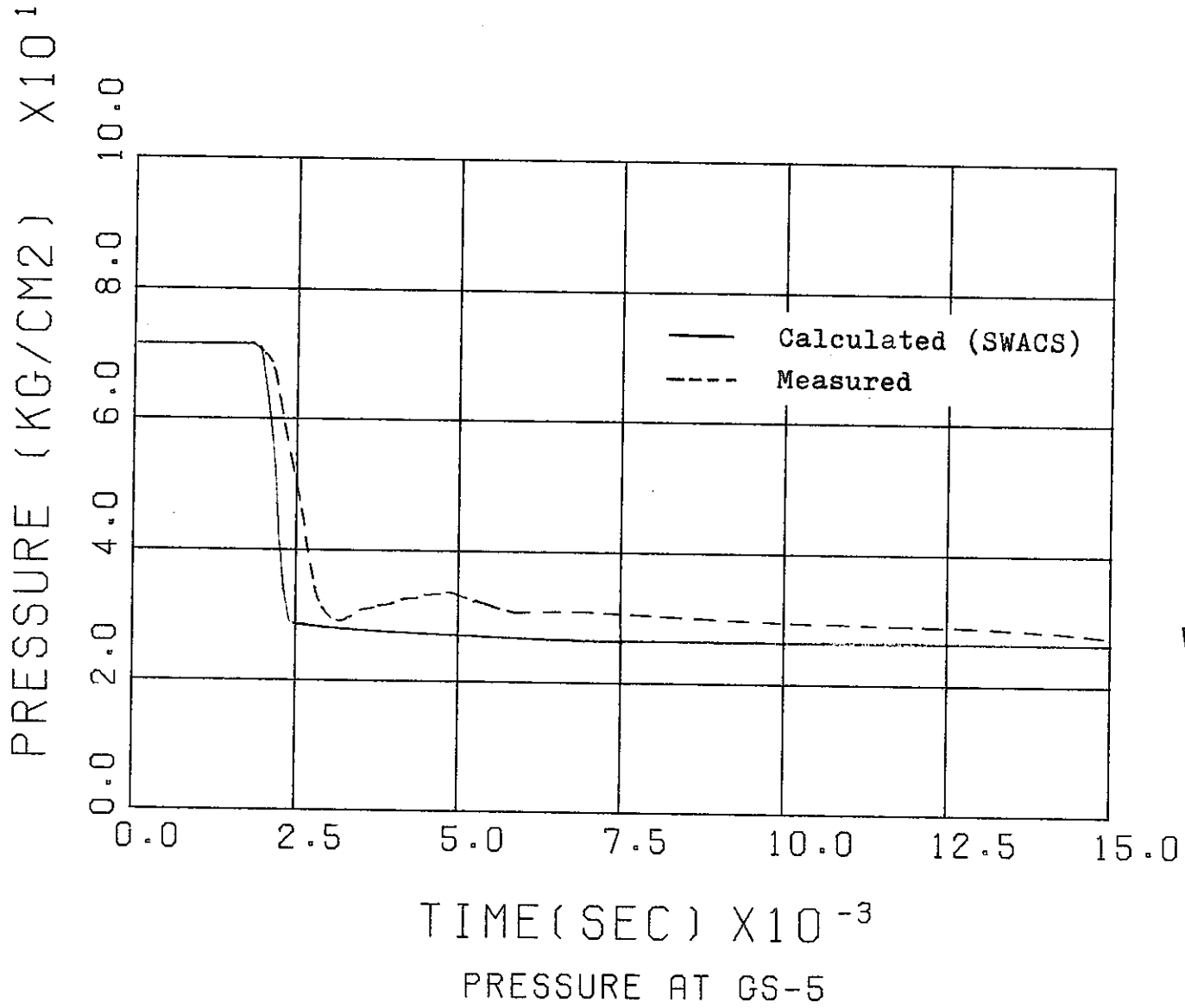


FIG. 6.1-10 STANDARD PROBLEM NO.1 ANALYSIS (SWACS)

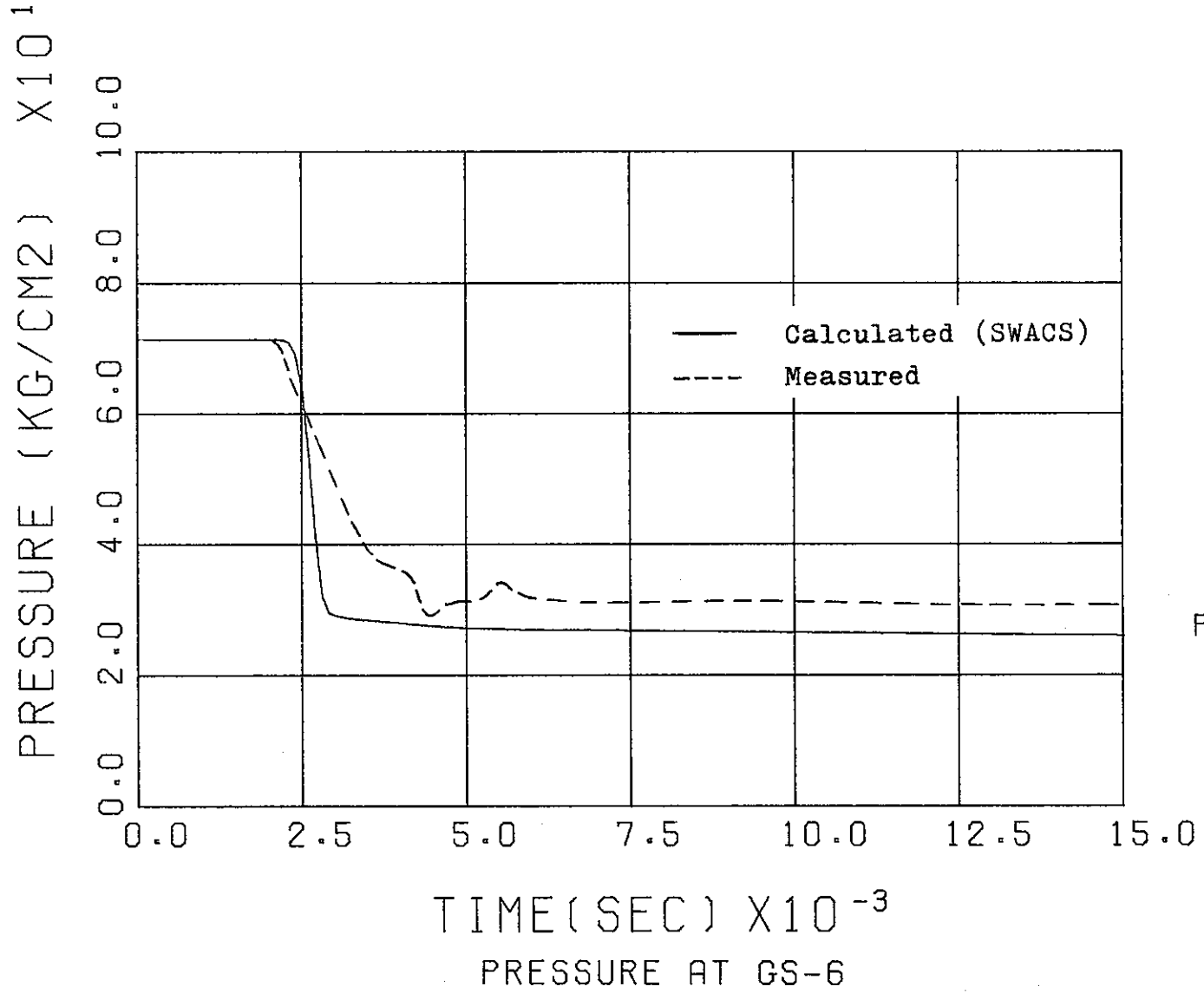


FIG. 6.1-11 STANDARD PROBLEM NO.1 ANALYSIS (SWACS)

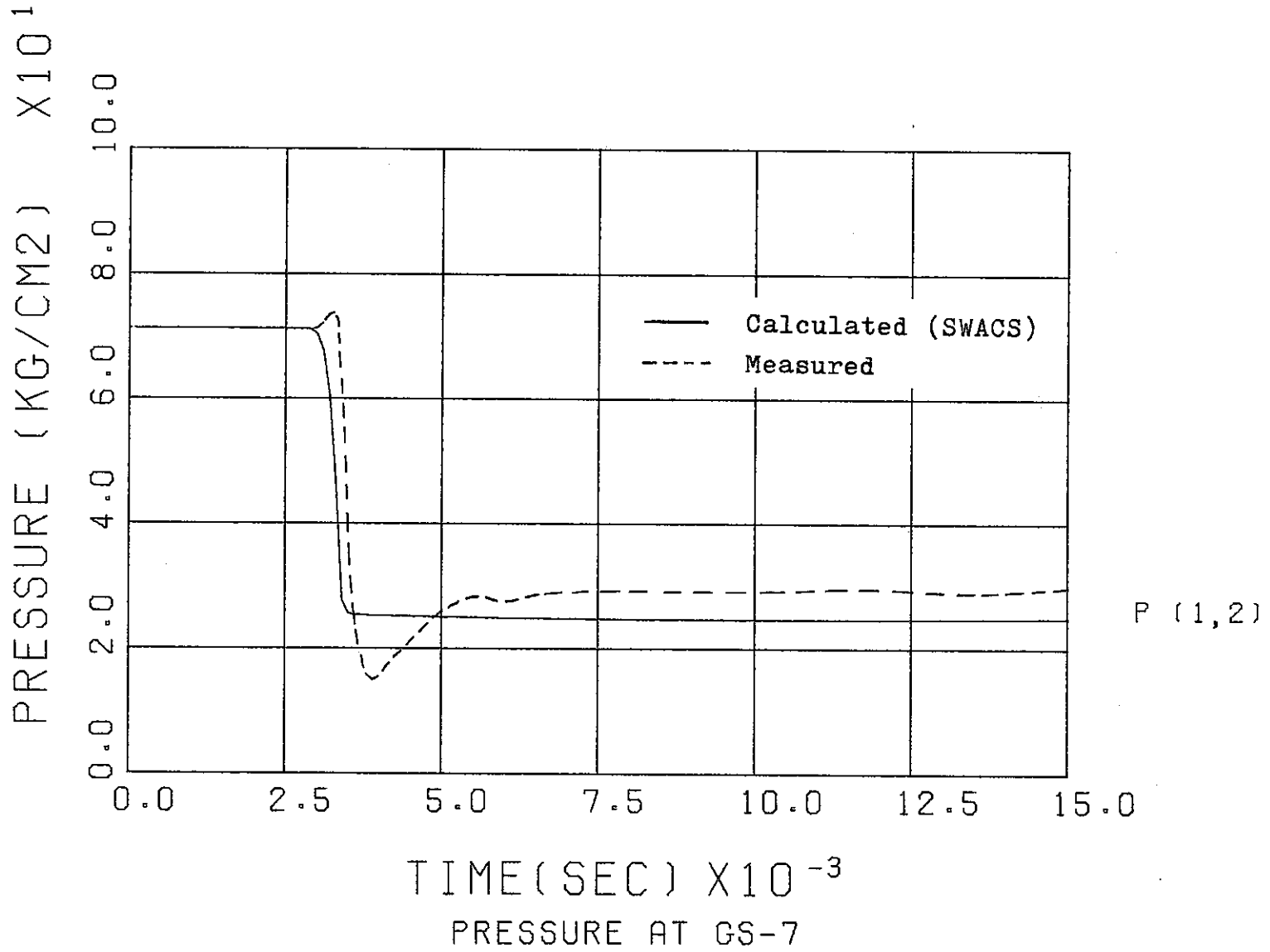


FIG. 6.1-12 STANDARD PROBLEM NO.1 ANALYSIS (SWACS)



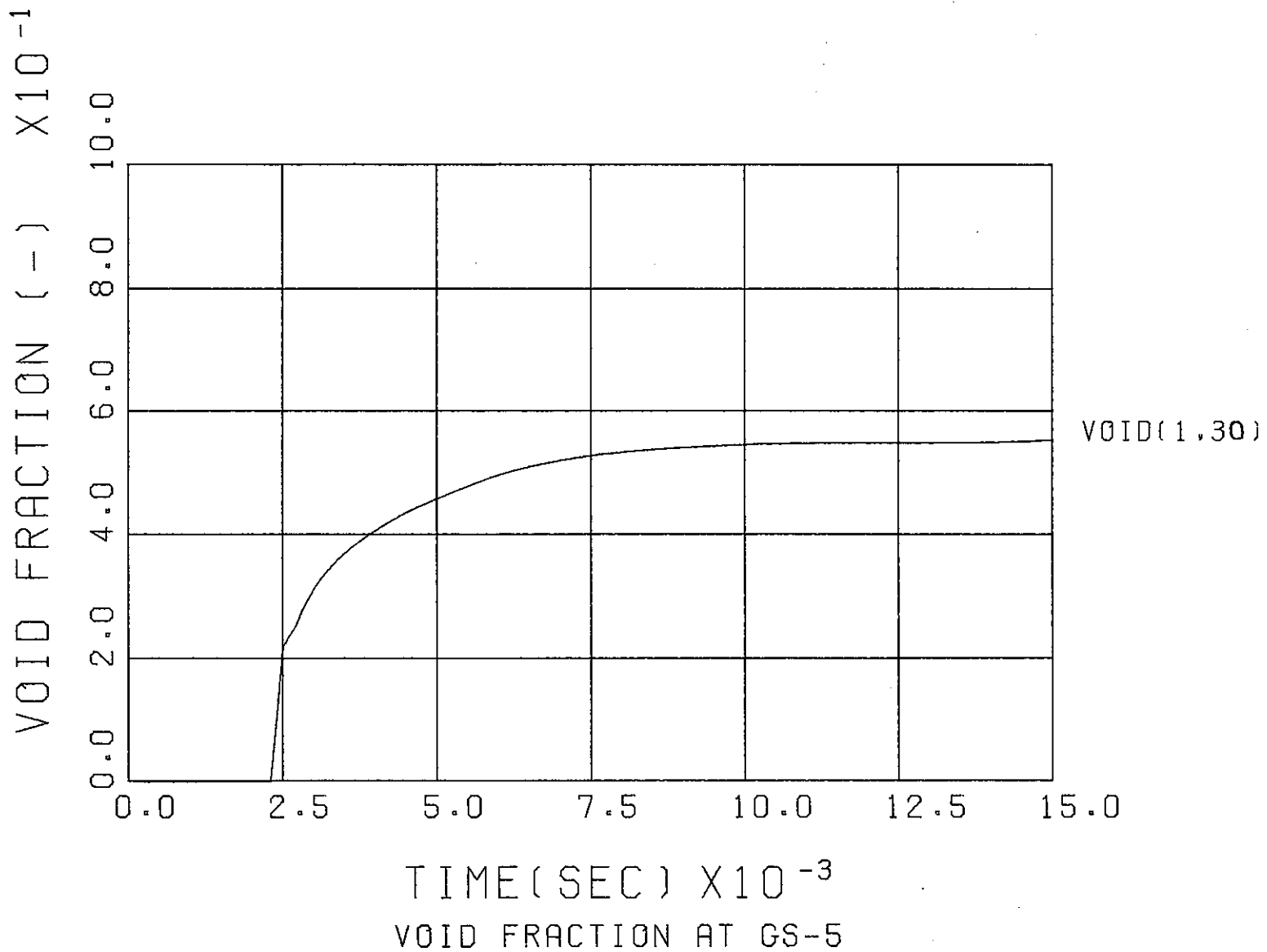


FIG. 6.1-13 STANDARD PROBLEM NO.1 ANALYSIS (SWACS)

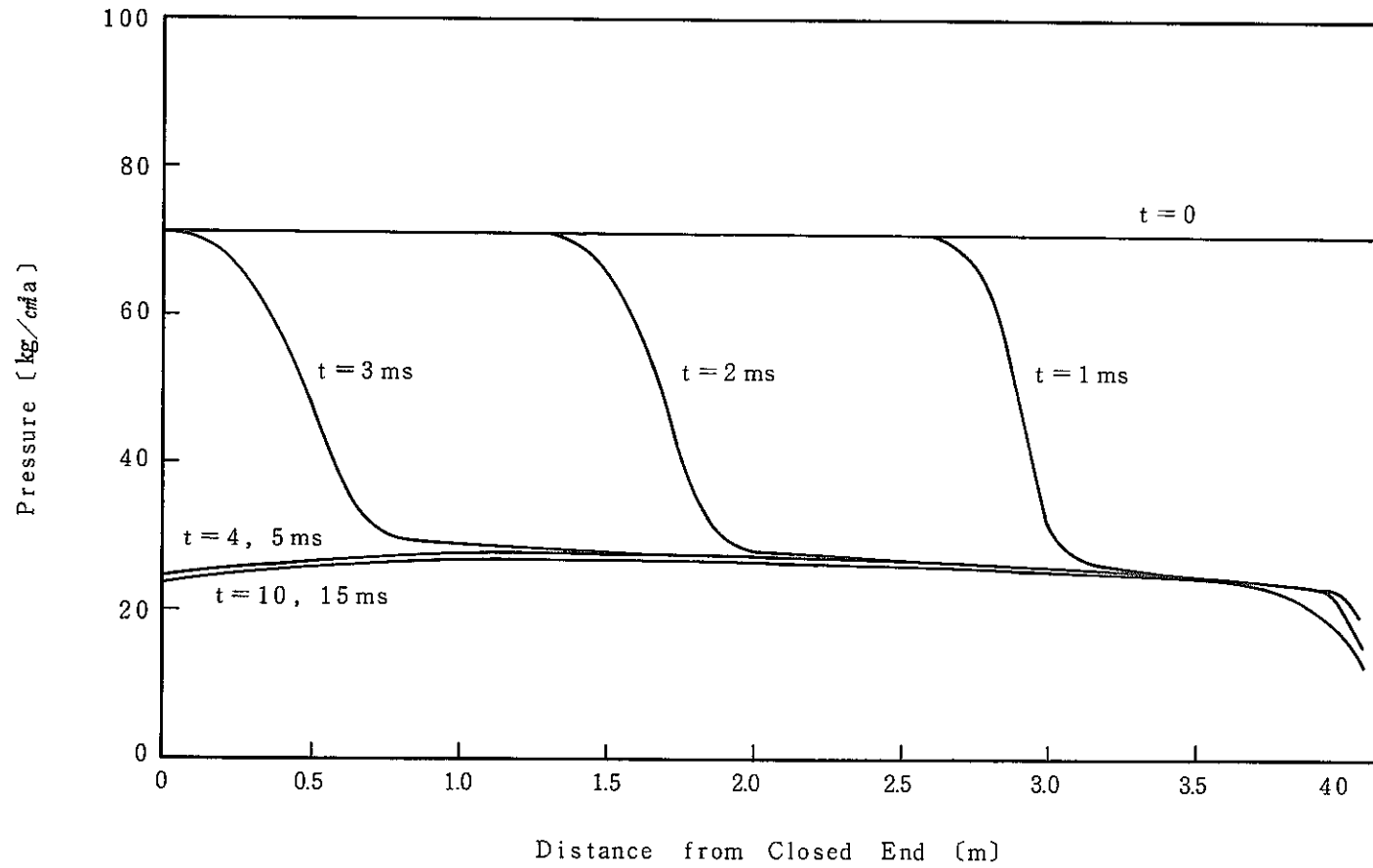


Fig. 6.1-14 Standard Problem No.1 Analysis (SWACS)  
Pressure Profile

6.1.4 考 察

計算結果で示した如く、圧力変化及び初期減圧沸騰波伝播現象に関しては、気液熱平衡モデルと言う範囲において、概ね実験結果と一致することがわかった。従って、破断初期における管内流動特性に関しても妥当な評価を行っているものと考えられる。しかし、Na-水反応解析上最も重要な水リーク率に関しては、実験的測定が困難なため、直接に検証することはできない。そこで、この初期水リーク率に関しては、数値計算（差分法等）に対する収束性及び解の妥当性について検討を進めることとする。

(1) 初期水リーク率の収束性

解の収束性を評価する意味で、空間メッシュ巾 ( $\Delta x$ ) 及び時間ステップ巾 ( $\Delta t$ ) に関するサーベイを行った。

サーベイを行なった範囲は  $\Delta x = 2.5 \sim 20$  cm,  $\Delta t = 0.0025 \sim 0.1$  msec である。尚本サーベイでは初期温度を  $231^\circ\text{C}$  均一としたため、図 6.1.5 のピーク値とはやや値は異なる。サーベイ結果の整理上、計算時間巾  $\Delta t$  と初期水状態の音速に対する Courant 条件の  $\Delta t c$  の比を定義する。

$$Rc = \Delta t / \Delta t c = \frac{\Delta t}{\Delta x / a} \approx \frac{\Delta t}{\Delta x / 1200} \dots\dots (6-1)$$

a) 図 6.1-15 に計算の安定領域を示す。

図中  $\times$  印は計算が出来なかった。(あるいは出来ても解が不安定だった) 計算メッシュを示す。不安定はすべて破断端のメッシュで生じた。図より、計算を行なうには  $Rc$  を  $1/2$  以下にすることが必要であると考えられる。

b) 図 6.1-16~19 に  $Rc$  に関し、初期 ( $\sim 2$  ms) の水リーク率の変化の計算結果をまとめた。更に、表 6.1-2 には初期ピーク値、(準)定常値、立ち上がり時間、ピーク巾に関し、計算メッシュの効果をまとめ、それを図 6.1-20~22 に示した。

c) これらより、傾向を定性的にまとめると以下の如くである。

i)  $\Delta x$  を一定にして、 $\Delta t$  ( $Rc$ ) を小さくする場合

$Rc$  を小さくすると ( $\Delta t$  を小さくしていくと)、初期水リーク率は大きくなるが、ある値に収束する。(図 6.1-20) 又、 $Rc$  を小さくすると立ち上がり時間 (図 6.1-21) は零に近づく、しかしピーク巾 (図 6.1-22) は逆に大きくなる。

ii)  $Rc$  を一定にして  $\Delta x$  ( $\Delta t$ ) を小さくする場合

$Rc$  を一定に保ち  $\Delta x$ , ( $\Delta t$ ) を小さくしていくと立ち上がり時間とピーク巾は共に小さくなり零に近づく。

又、ピーク値はやや小さくなるが  $Rc < 0.125$  ではほぼ一定である。

d) 以上は、水リーク率の初期ピークにのみ注目して、計算メッシュの効果をサーベイしたものであり、この初期のピーク以降の水リーク率の準定常値をみるならば、上述の厳しい条件は、はるかに緩和される。図 6.1-23 は  $\Delta x = 10 \text{ cm}$ ,  $\Delta t = 0.02 \text{ msec}$  と  $\Delta x = 5 \text{ cm}$ ,  $\Delta t = 0.005 \text{ msec}$  の比較をしたもので初期を除いて、両者の差はそれほど大きくない。

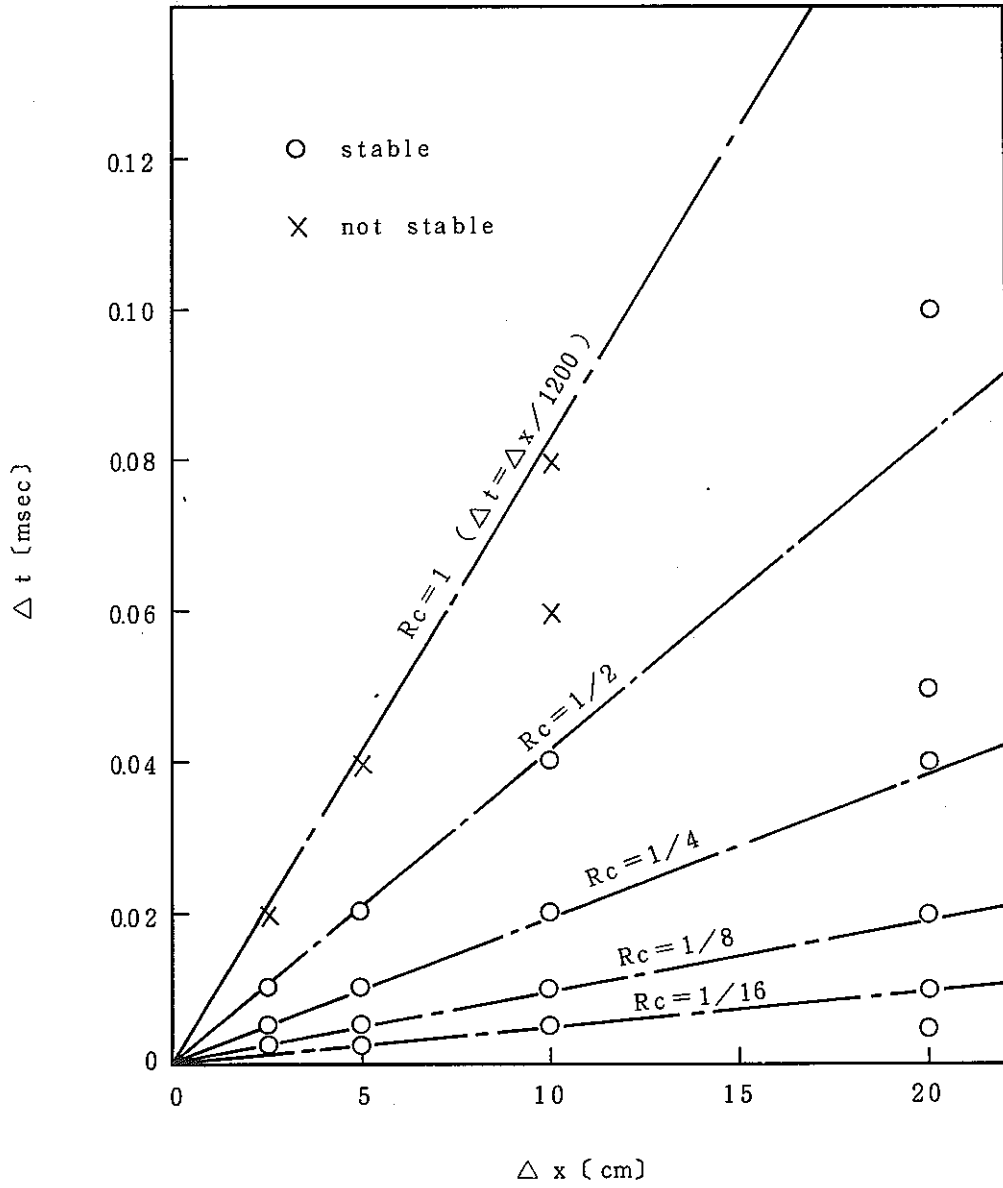


Fig. 6.1-15 Computational Stability Survey for Water Leak Rate Calculation (SWACS)

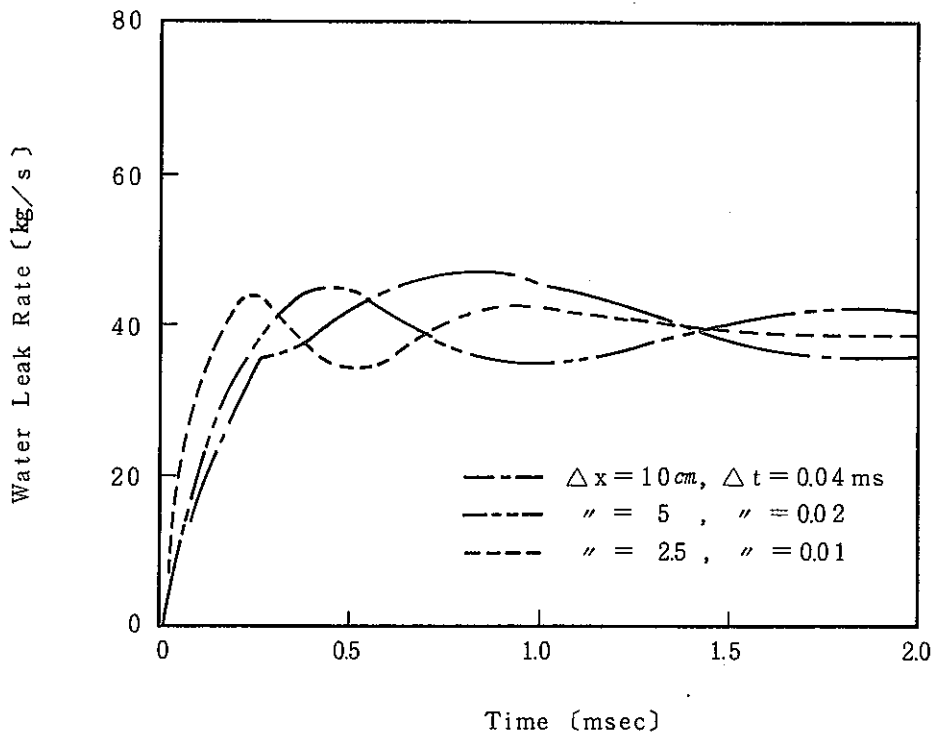


Fig. 6.1-16 Computational Mesh Sensitivity for Initial Water Leak Rate ( $R_c = 1/2$ )

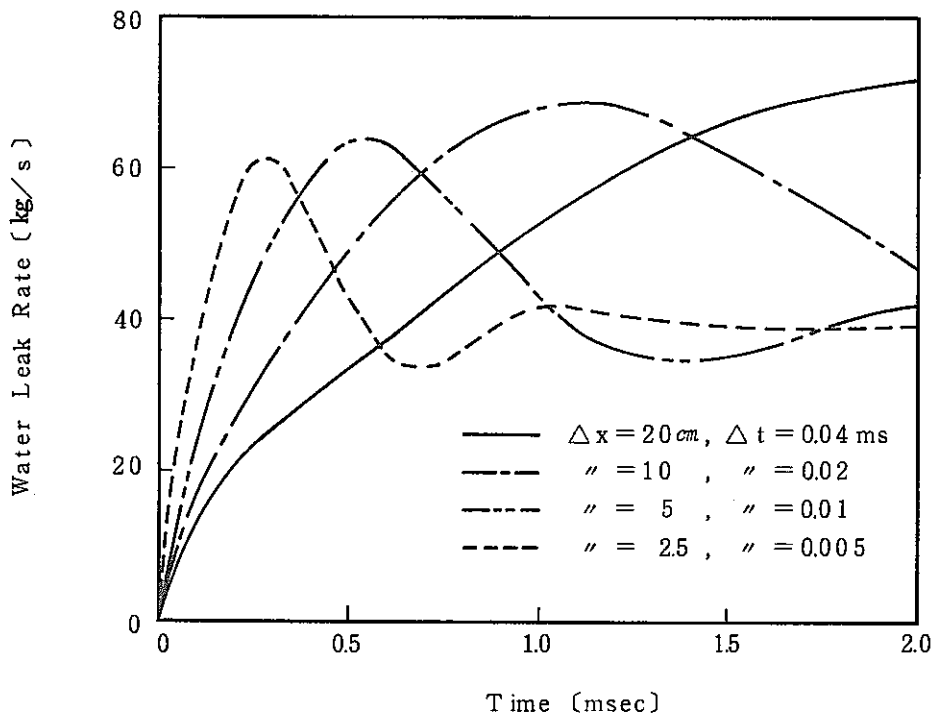


Fig. 6.1-17 Computational Mesh Sensitivity for Initial Water Leak Rate ( $R_c = 1/4$ )

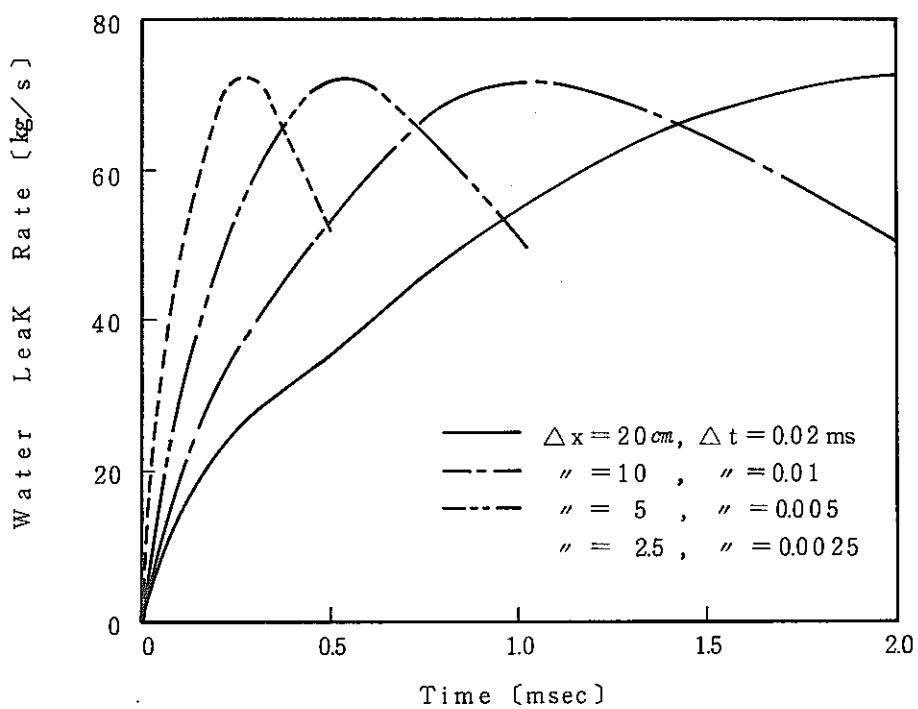


Fig. 6.1-18 Computational Mesh Sensitivity for Initial Water Leak Rate ( $R_c = 1/8$ )

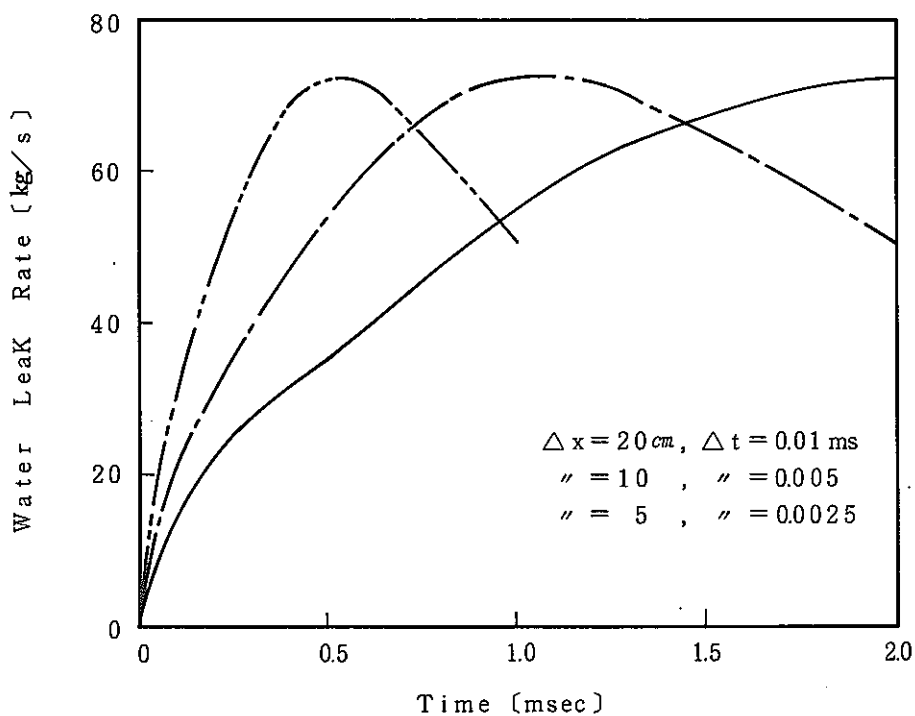


Fig. 6.1-19 Computational Mesh Sensitivity for Initial Water Leak Rate ( $R_c = 1/16$ )

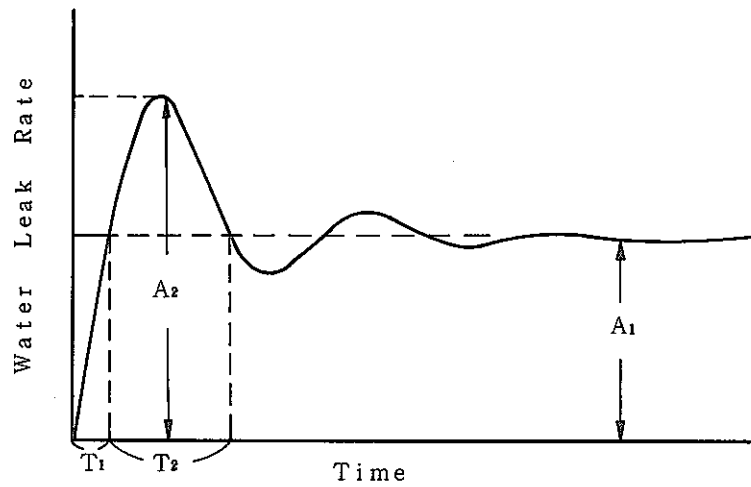


表 6.1-2 初期水リーク率に対する計算メッシュの効果

$R_c$	$\Delta x$ [cm]	$\Delta t$ [msec]	$A_1$ [kg/s]	$A_2$ [kg/s]	$T_1$ [msec]	$T_2$ [msec]
$\frac{1}{2}$	10	0.04	~40	47	0.43	0.96
	5	0.02		45	0.28	0.37
	2.5	0.01		44	0.17	0.15
$\frac{1}{4}$	20	0.04		73	0.66	
	10	0.02		69	0.38	1.86
	5	0.01		64	0.20	0.88
	2.5	0.005		61	0.11	0.43
$\frac{1}{8}$	20	0.02		72	0.61	
	10	0.01		72	0.31	~2.1
	5	0.005		72	0.16	~0.98
	2.5	0.0025		72	0.08	~0.54
1 16	10	0.005		72	0.31	~2.1
	5	0.0025	72	0.16	~1.05	



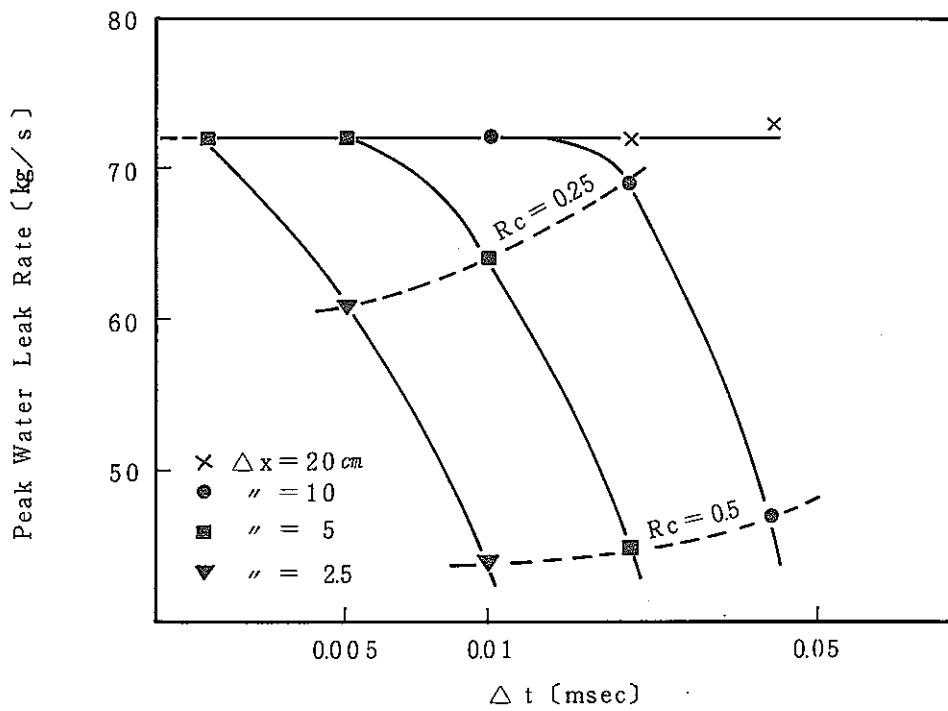


Fig. 6.1-20 Computational Mesh Sensitivity for Initial Peak of Water Leak Rate

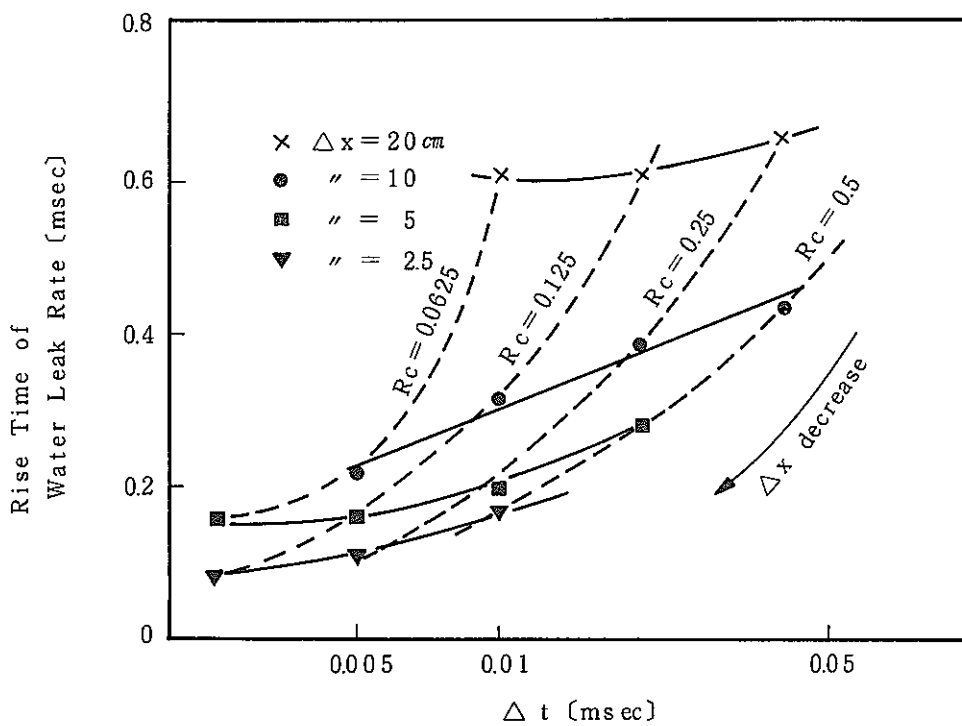


Fig. 6.1-21 Computational Mesh Sensitivity for Initial Rise Time of Water Leak Rate

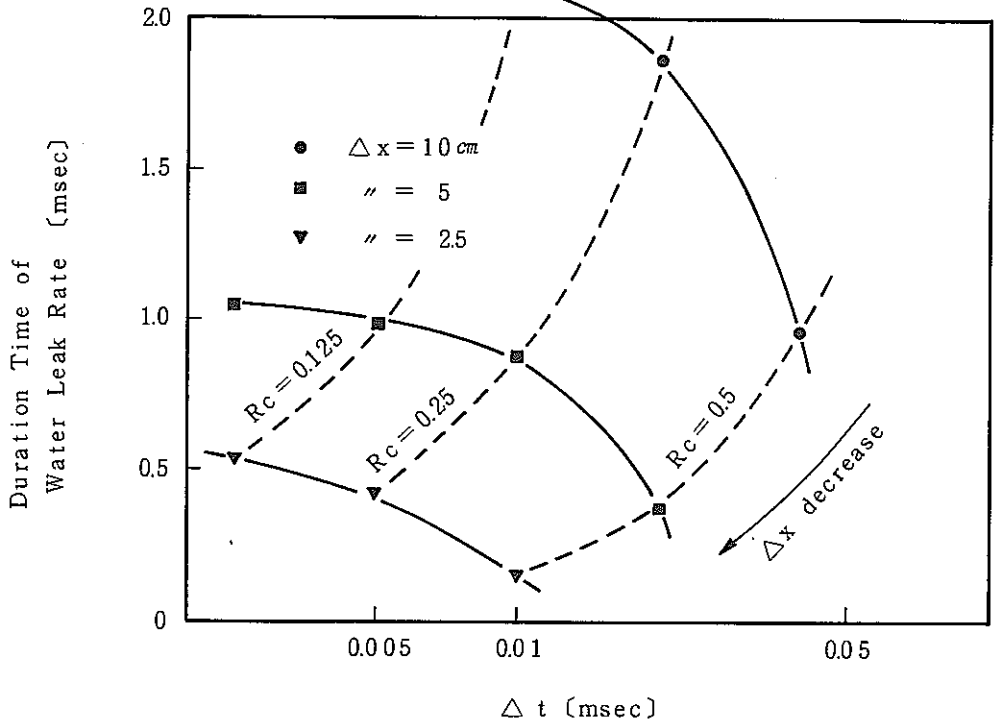


Fig. 6.1-22 Computational Mesh Sensitivity for Initial Duration Time of Water Leak Rate

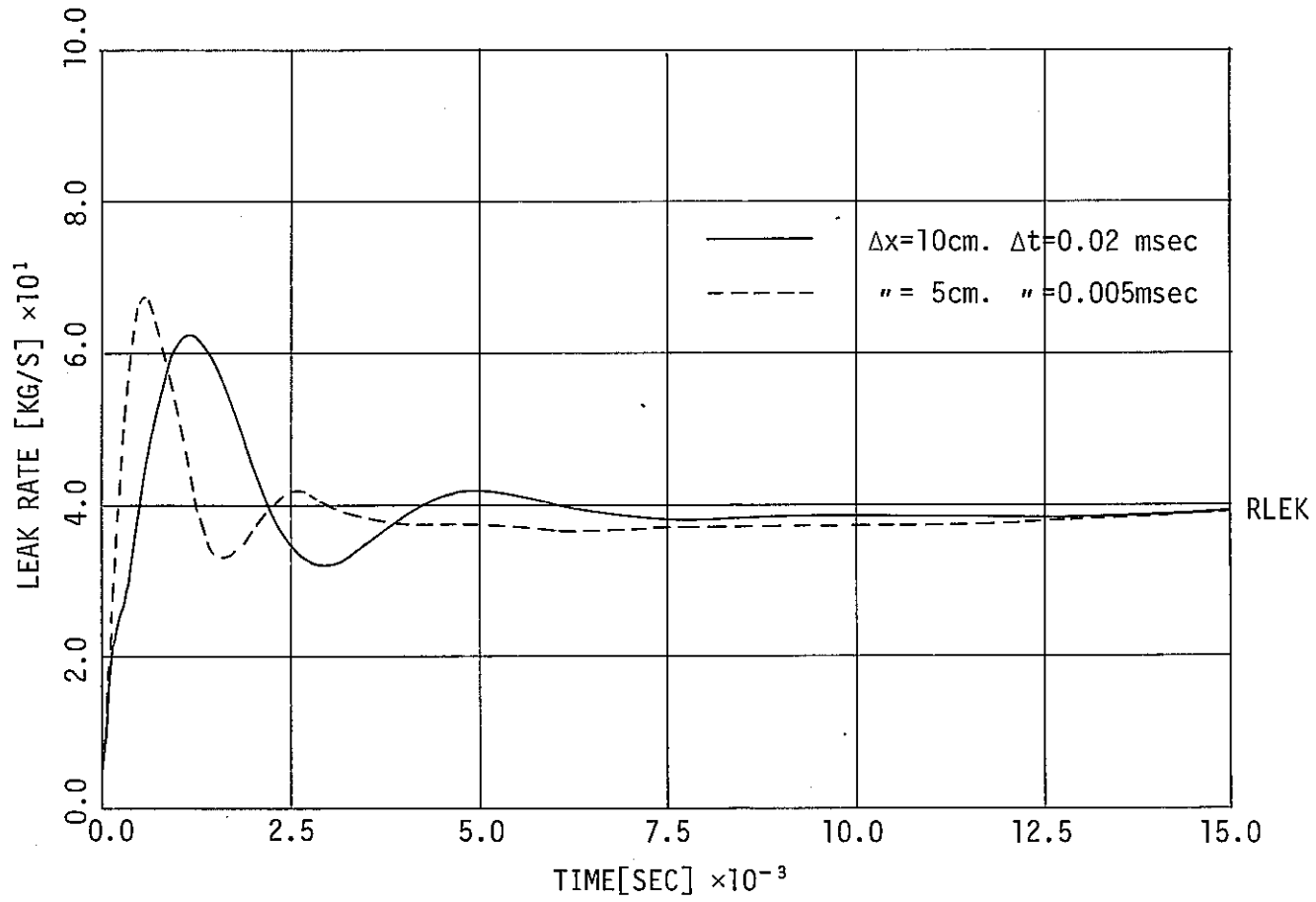


FIG. 6.1.23 STANDARD PROBLEM NO.1 ANALYSIS [SWACS C-2.1]  
WATER DISCHARGE RATE

## (2) 初期水リーク率の妥当性

メッシュ分割数を無限大とし、連続体に非常に近い状態を想定すれば、(1)の $\Delta x$ 及び $\Delta t$ サーベイの結果から、初期水リーク率は、図 6.1-24 に示すような傾向を示すものと考えられる。従って、初期スパイク圧評価上必要な破断後数 10 msec 程度の水リーク率特性に関しては、初期ピーク的な流量を除いた。その後の水リーク率が重要と考えられる。また本コードの破断点境界条件を見直すと破断部における運動量束を管内部 (N-1, N-2 ノード) から外挿近似しているため、管内部の圧力分布が準定常化する迄 (減圧沸騰波が破断部付近の数ノードを通過しその影響が定常化する迄) は、リーク率を正確に評価しているとは言い難い。圧力分布が準定常化された以降は、均質流の仮定に基づいた臨界流が計算され得ると考えられる。

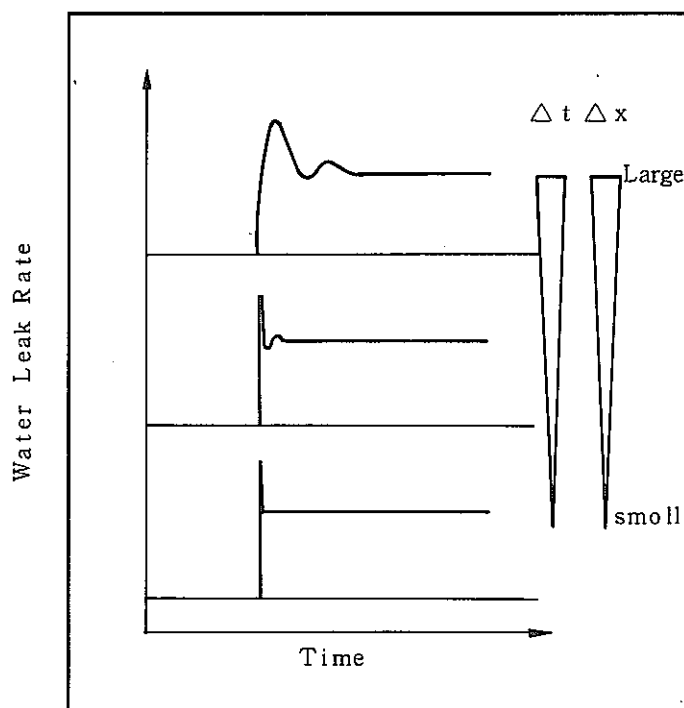


図 6.1-24 初期水リーク率に与る $\Delta t$ 、 $\Delta x$ の影響

この初期の水リーク率についての解析解についての検討は資料<sup>10)</sup>で行なわれる。ここでは、本計算コードの解、すなわち数値解に関する影響因子を挙げておく。

## i) 2相流中音速評価値の相違

本コードでは、3.1節に示した如く低クオリティ領域において、音速を水単相流-2%クオリティ間で線形内挿している。

## ii) 近似状態式の誤差

- iii) 差分近似に伴う誤差
- iv) 計算誤差等

## 6.2 原型炉級SG体系への適用計算

高速増殖原型炉級SG（蒸発器）に対する適用計算例について示す。計算対象の概要は2章図2.1-1及び図2.1-2に示した如くであり、管内水の初期状態としては、入口側から、加圧水、2相び過熱蒸気領域を有する。

### 6.2.1 計算条件

#### (1) 形状データ

a) 伝熱管長さ	給水側	24	[m]
	蒸気側	59.6	[m]
b) ヘリカルコイル代表径		1.929	[m]
c) 伝熱管内面粗度		$5 \times 10^{-5}$	[m]
d) コイル部流路傾斜角		5.05	[deg]

#### (2) 初期値データ

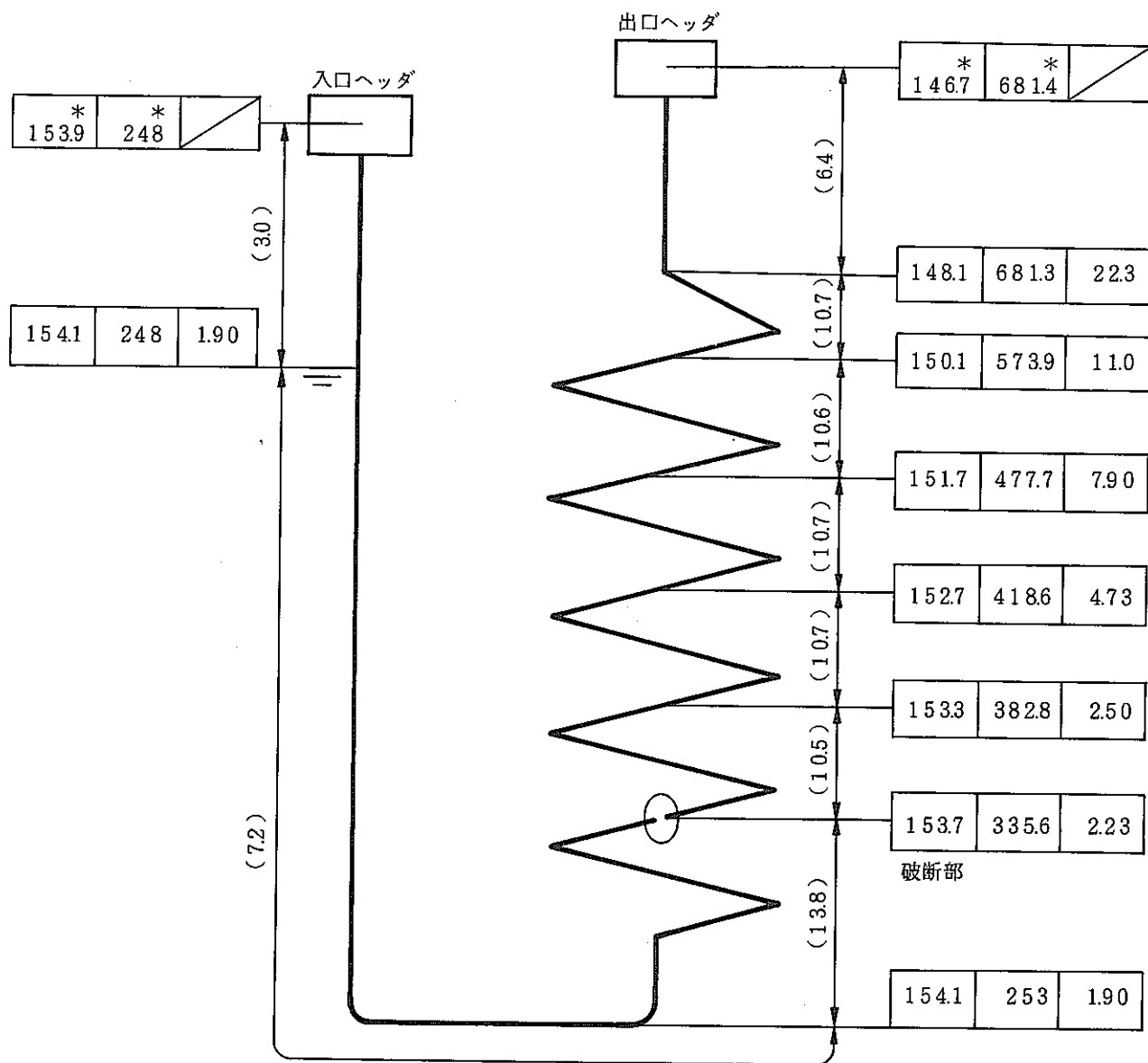
図6.2.1に伝熱管軸方向圧力、エンタルピ流速分布を示す。

#### (3) 境界条件

出入口圧力、エンタルピ図6.2-1記載値で一定破断口外圧Na中初期圧力 $2.8 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ で一定。

#### (4) 計算ケース

計算は、初期20msecの間に着目した詳細計算と、流量が定常化するまでの過渡状態計算（1sec迄）の2ケースについて行った。各ケースについて使用した時間及び空間メッシュ巾を表6.2.1に示す。



圧力	エンタルピー	流速
Kg/cm <sup>2</sup> g	Kcal/Kg	m/sec

( ) : 流路長(m)

\* : 一定境界条件

図 6. 2-1 水噴出率計算体系と初期値

表 6.2-1 使用空間メッシュ及び時間メッシュ

Case	ノード分割数 給水側/蒸気側	空間メッシュ巾 〔cm〕 給水側/蒸気側	時間メッシュ巾・コントロール	
			時間〔sec〕	メッシュ巾〔sec〕
1	120/298	20/20.1	0 ~ $5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$
			$5 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-5}$
			$2 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-5}$
			$5 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-5}$
2	48/120	50/49.7	0 ~ $1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
			$1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-4}$
			$1 \times 10^{-2} \sim 4 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-4}$
			$4 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-4}$
			$1 \times 10^{-1} \sim 2.5 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^{-4}$
			$2.5 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^0$	$4 \times 10^{-4}$

## 6.2.2 計算結果及び考察

## (1) 短時間(0~20 msec 迄)の結果

図 6.2-2 に初期水リーク率変化を示す。破断部水初期状態は、図 6.2-1 に示した如く、サブクール水状態であり、リーク率変化としては、前項で示した結果と同様の傾向を示す。給水ヘッダ側及び蒸気ヘッダ側からの水リーク率は、この時間領域では、ほとんど差を生じていない。図 6.2-3 にこの時間領域における圧力分布変化を示す。給水側は、全領域サブクール水であるため、破断部からの減圧沸騰波の伝播及びヘッダからの圧縮波の伝播が生じているのが分かる。これに対し、蒸気側は、初期エンタルピ分布の影響が強く現われ、初期圧力分布としては、複雑であり、2相域がダンパー的なヘッダとしての役割をはたし、蒸気ヘッダに減圧波が到達する以前に圧縮波が破断に方向に伝播している。

## (2) 長時間(0~1 sec 迄)の結果

図 6.2-4 に1 sec 迄の水リーク率変化を示す。初期 0.1 sec 迄は、蒸気ヘッダ側からの水リーク率が高い。これは、前述したように初期では蒸気側伝熱管内に存在する2相

部のヘッダー的効果が初期に現われ、その後、各ヘッダーでの水/蒸気状態量及び管長さの影響が支配的になるためである。図 6.2-5 に 1 sec 迄の圧力分布変化を示す。給水側では、初期において階段状の圧力分布（初期エンタルピー分布によって決定される飽和圧力の影響による）を示すが、定常期での分布は、ほぼ直線であり、破断部において、圧力が低下する。（破断部のみ 2 相で、給水側はサブクール水状態にある。）蒸気側は、ヘッダーに向って、エンタルピーの連続的な上昇があり、2 相域、過熱蒸気域が存在するためこの時間領域では比較的穏かな圧力分布変化となる。また、定常期では管内はほぼ過熱蒸気状態であり、圧力低下に伴う比容積上昇があるため圧力分布としては曲線的となる。



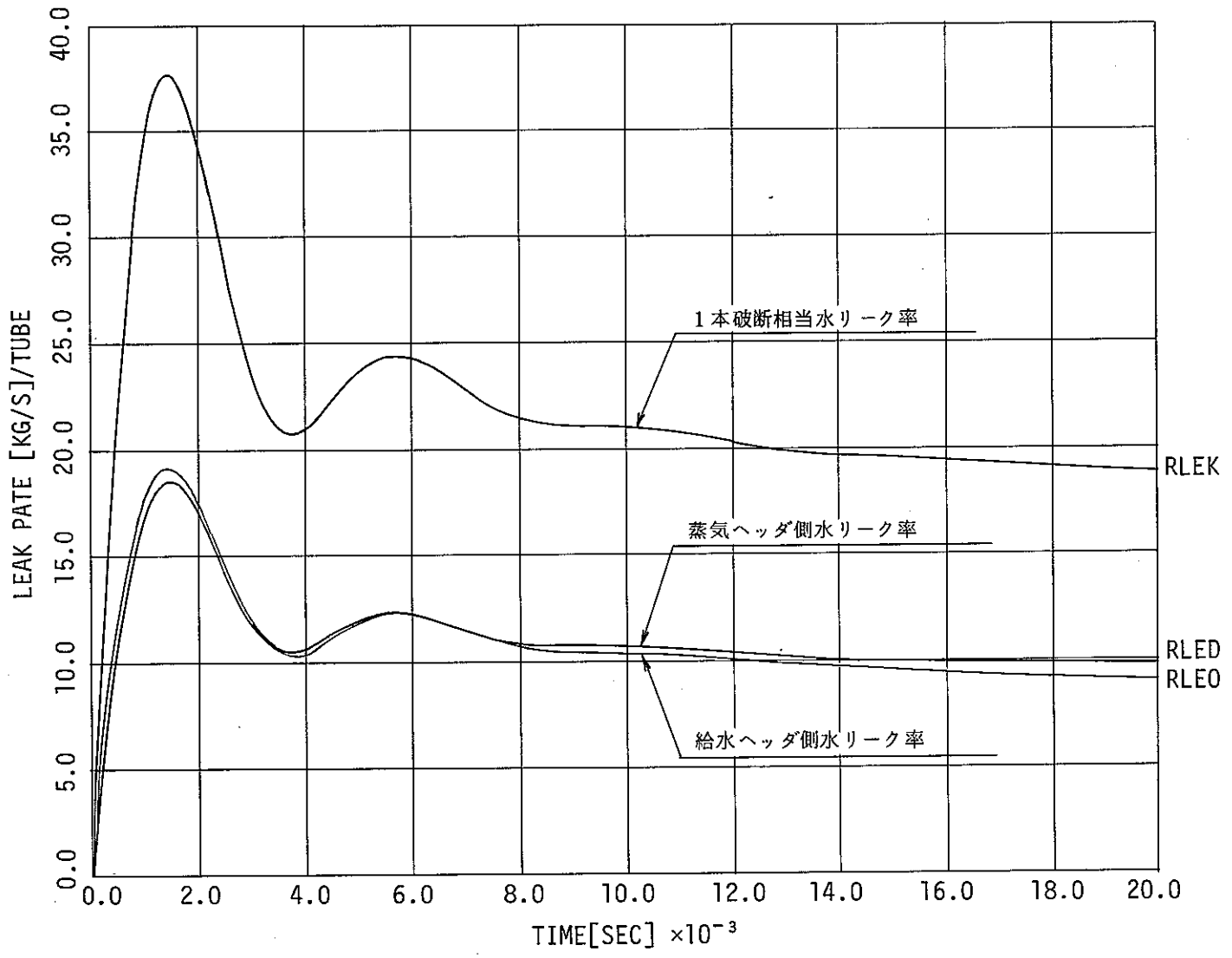


図 6.6-2 EV コイル下部破断時初期水リーク率解析結果

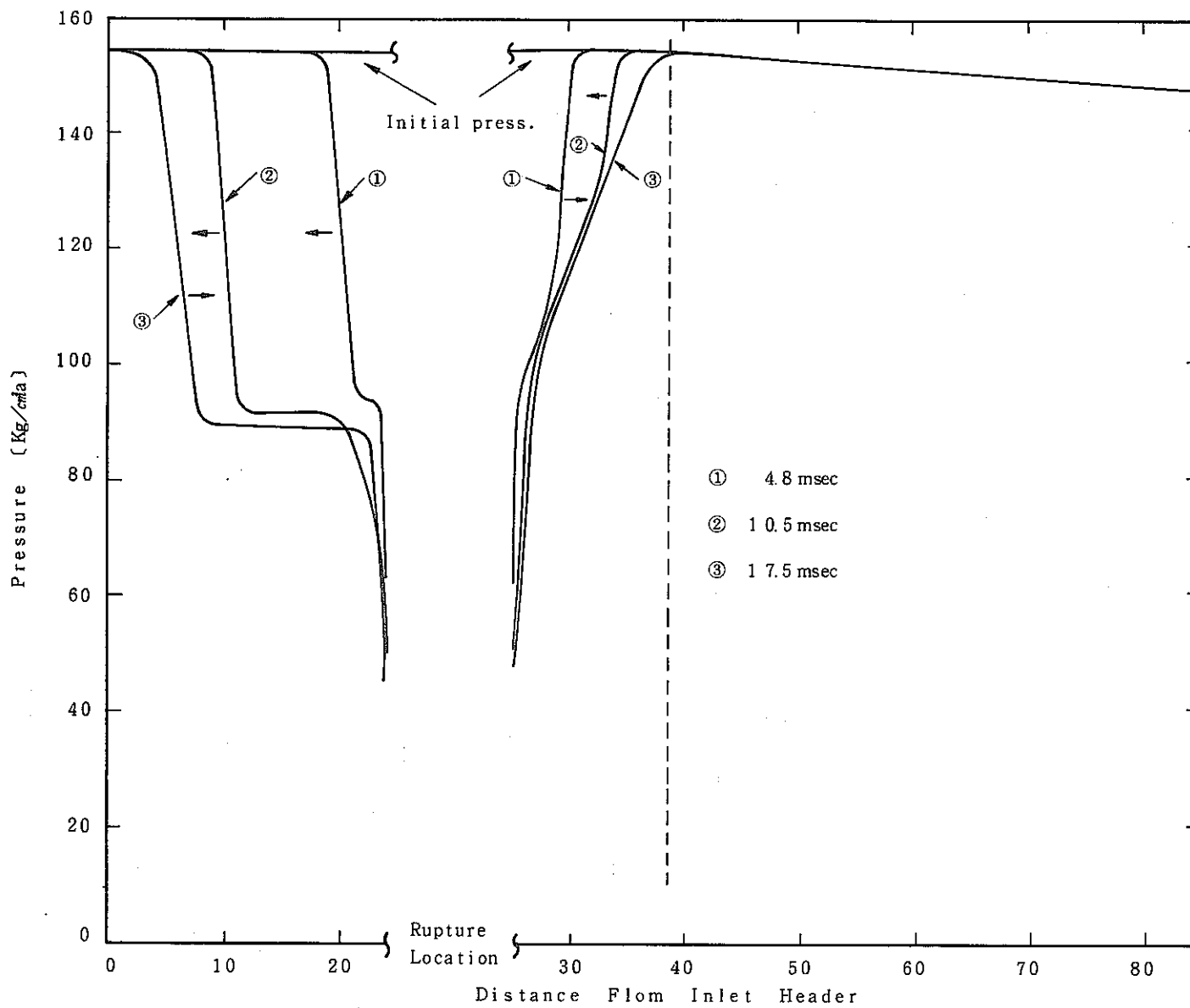


图 6.2-3 破断传热管内压力分布变化 (破断初期)

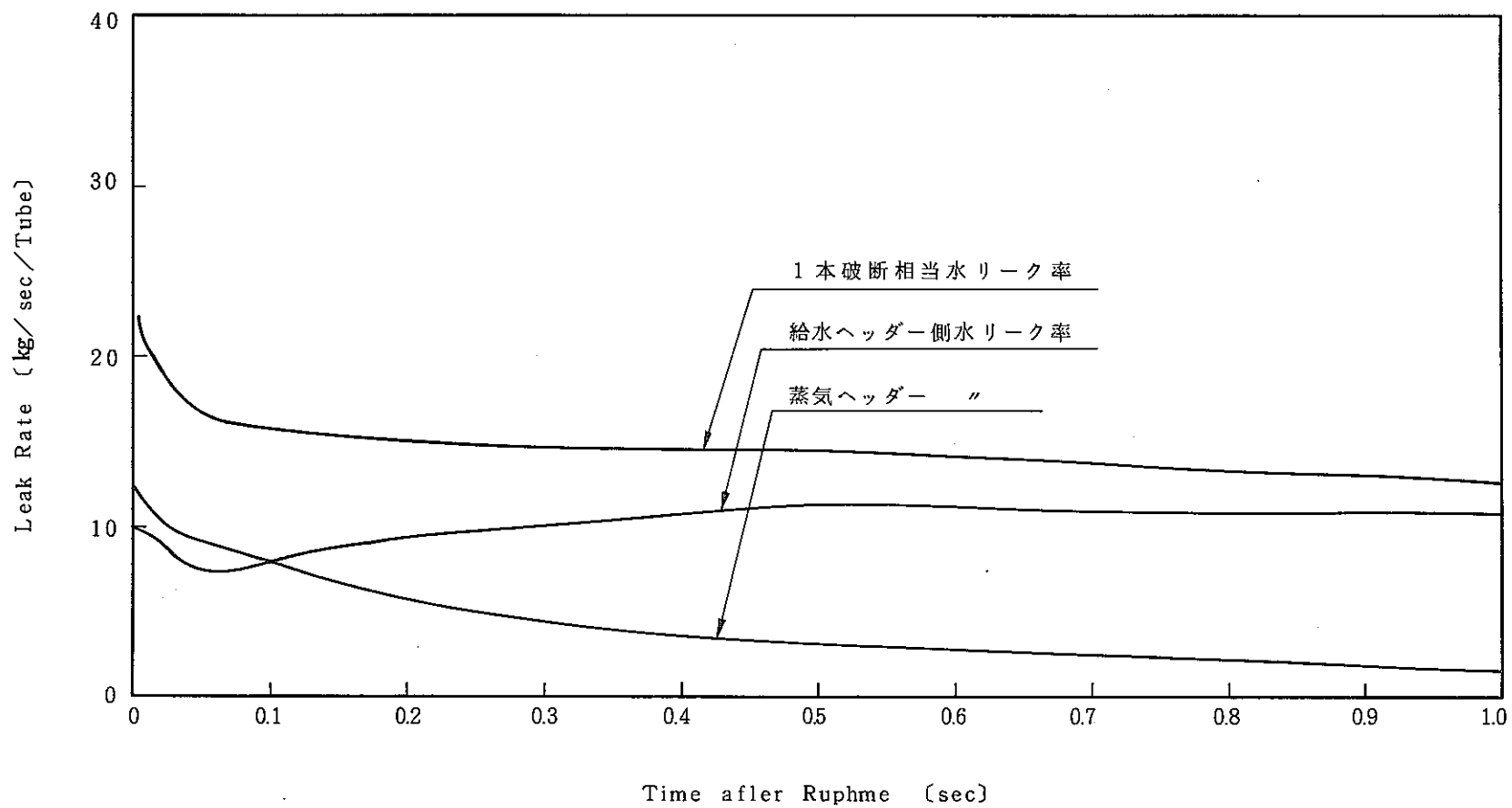


図 6.2-4 EVコイル下部破断時水リーク率変化

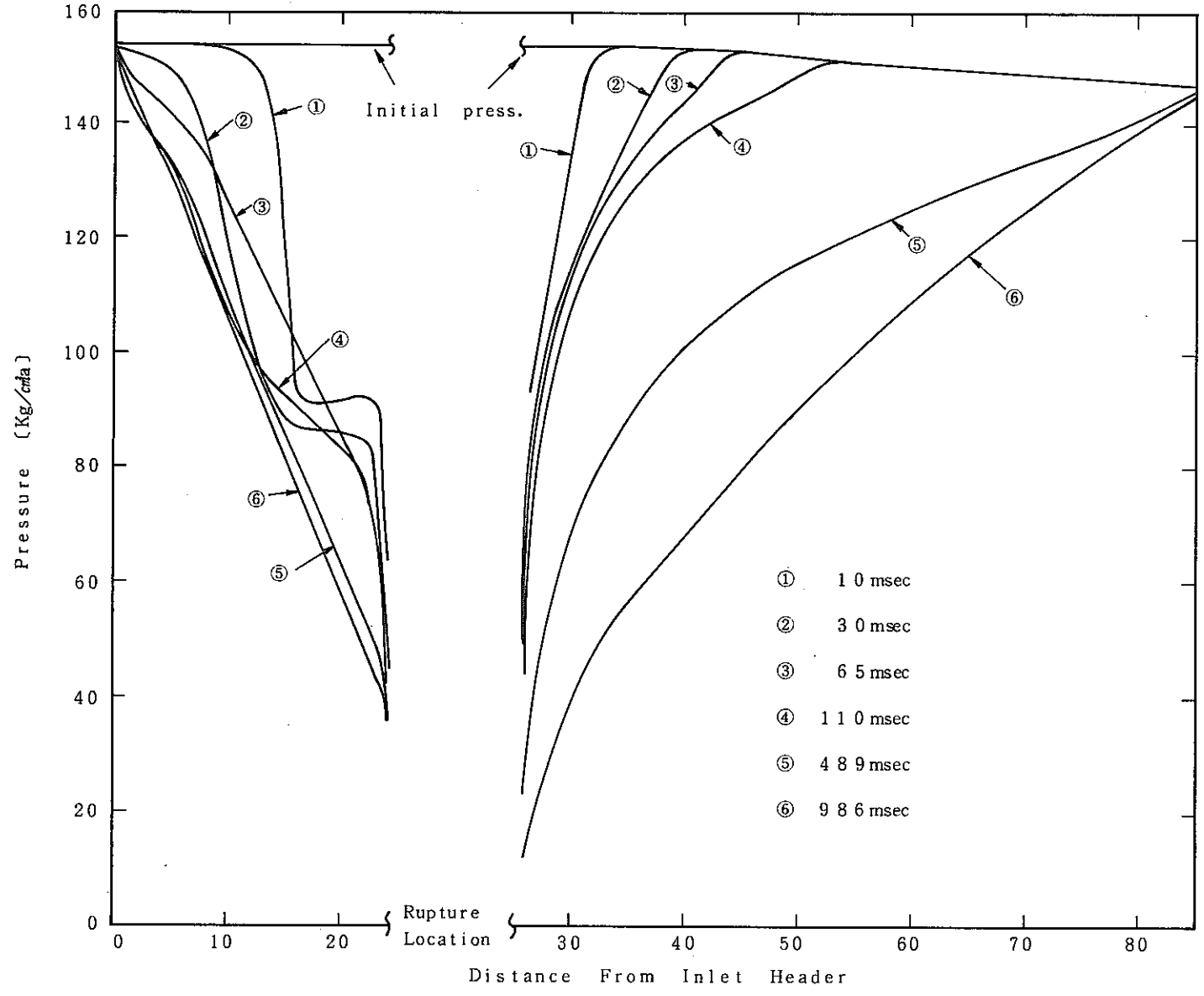


图 6.2-5 破断传热管内压力分布变化

### 6.3 例題計算のまとめ

EdwardsらのStandard Problem No.1の計算において管内圧力変化は、実験とほぼ一致している。また、初期水リーク率も気液平衡、均質混流の仮定の下に妥当な解を与えることがわかった。また、原型炉級SGへの適用計算においても、管内の圧力変化等は理論的に矛盾なく評価できることがわかった。したがって、本コードは大リークNa-水反応解析に適用する上での必要条件是満足しているものと考えられる。しかし、コード検証の観点からは未だ不充分と云わざるを得ない。今後、多数の実験解析を行い検証による信頼性向上を計って行く必要がある。

尚、本例題計算に使用した計算用データリストをAppendixに示す。

## 7. 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コードSWAC-11のオリジナル版について指摘されていた改良すべき点に着目してコードの修正を行ない使用説明書を書き改めた。

本コードの修正と検討計算により、原型炉級蒸気発生器における大リーク・ナトリウム-水反応解析に対し、SWAC-11はブローダウン以前の初期水噴出率の評価計算モジュールとして実用可能になった。

今後、さらに詳細な実験解析および検証を進めていく必要があると考えられる。

## 8. 参 考 文 献

- 1) 吉岡直樹, Y. W. Shin, 錦見正和, 佐藤稔  
「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)」  
SN 952-77-05
- 2) 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 - (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)」PNC SN952 79-19 (1979)
- 3) 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 - (概要説明書)・大リーク・ナトリウム-水反応解析 (第7報) -」PNC SN952 79-20 (1979)
- 4) F.H. Harllow and A.A. Amsden,  
"A Numerical Fluid Dynamics Calculation Method for All Flow Speeds" J. Comp. Phys., 8, p197 (1971)
- 5) 「機械工学便覧-改訂第6版」日本機械学会 (1977)
- 6) H. Ito,  
"Friction Factor for Turbulent Flow in Curved Pipes"  
Rep. Inst. High Sp. Mech., Japan, Vol. 11 (1959/1960)
- 7) R.C. Martinelli and D.B. Nelson,  
"Prediction of Pressure Drop During Forced Circulation Boiling of water" Trans. ASME Vol. 70 (1948)
- 8) A.R. Edwards, T.P.O'Brien "Studies of Phenomena Connected with the Depressurization of Water Reactors" J.Br.Nucl.Energy Soc., Vol. 9 (April 1970)
- 9) R.W. Garner "Comparative Analyses of Standard Problems-Standard Problem 1" Interim Report I-212-74-5. 1, ANC (October 1973)
- 10) M. Hori, O. Miyake "Analytical Treatment of Large leak Pressure Behavior in LMFBR Steam Generators" PNC N941 80-91 (June, 1980)

## APPENDIX 例題計算用入力データ

第6章で述べた例題計算に使用した入力データについて示す。

(1) Standard Problem No. 1 の計算用データ

表 A - 1

(2) 原型炉級 SG に関する適用計算用データ (初期 20 msec)

表 A - 2



表A-1 Standard Problem No.1の計算用データ

```

--- SWACS SAMPLE CALCULATION EDWARDS PROBLEM CASE=SC.EDW.2 ---
  1   6   1   0   0   0   0 10000
 11   5  100  100  100 1000  2000
 16   5   10   10   10 1000  2000
 40   1   1
 51   8   1   0   0   0   20   0   0   1

```

2 1 15.E-3

SWAC-11 DATA FOR EDWARDS PROBLEM

```

  1   7  82   0   1   1   1   9   1
  1   5   4.096   0.0   0.073   0.08   5.0E-5
  7   1   1.5708
 11   3   1.0   2.0   3.0
 14   5   5.0E-6   5.0E-6   5.0E-6   5.0E-6   5.0E-6
 21   5   6.7E-5   1.0E-4   0.0   1.0   1.0
 44   1   1.0
 51   5   0.0   0.079   0.914   1.469   2.024
 56   4   2.935   3.770   3.928   5.0
 61   5   71.32   71.32   71.32   71.32   71.32
 66   4   71.32   71.32   71.32   71.32
 71   5   237.0   237.0   241.0   239.0   237.0
 76   4   239.0   231.0   231.0   231.0

```

表A-2 原型炉級SGに関する適用計算用データ

(CASE W-1) WATER INJECTION ANALYSIS FOR MONJU SG'M' (EV-LOW-1DEG)

1	1	1					
6	1	10000					
11	5	10	20	100	100	500	
16	5	1	1	1	100	500	
37	2	1	1				
40	1	1					
51	1	1					
55	1	3					
58	1	1					

2 1 0.2E-2

SWAC-11 MODULE DATA

1	2	120	298
3	1	147	
5	2	1	10
33	1	10	

1	5	24.0	59.6	0.0242	0.0318	0.00005
6	2	1.929	1.66			
11	3	0.002	0.005	0.010		
14	1	0.000005				
15	4	0.00001	0.00002	0.00005	0.00005	
21	2	6.7	-05	1.0	-04	
24	2	1.0	1.0			
31	4	153.9	146.7	248.0	681.4	
41	1	105.28				
44	3	2.765	0.5	0.5		
51	5	0.0	3.0	10.2	24.0	34.5
56	5	45.2	55.9	66.5	77.2	83.6
61	5	153.9	154.1	154.1	153.7	153.3
66	5	152.7	151.7	150.1	148.1	146.7
71	5	248.0	248.0	253.0	335.6	382.8
76	5	418.6	477.7	573.9	681.3	681.4