

区分変更	
変更後資料番号	78-05
決裁年月日	平成10年3月26日

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) —



技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
S	N952 78-05
<p>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</p> <p>動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室</p>	

1978年8月

動力炉・核燃料開発事業団

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、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)

ト
の

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)-

三宅 収[※] 進藤 嘉久[※] 田中 信夫[※]
佐藤 稔[※]

要 旨

高速増殖炉の蒸気発出器における大リーク・ナトリウム-水反応事故の一連の圧力、流動現象の解析を行なうために「SWACS」コードを開発した。

「SWACS」コードは伝熱管破損直後に発生する初期スパイク圧、スパイク圧の二次冷却系への圧力波伝播、初期スパイク圧静定後に生ずる準定常圧力上昇過程、およびこれら圧力発生
の主要因である破損伝熱管からの水噴出率を計算するモジュールから構成されている。

本報告書は「SWACS」コードの解析手法の概要をとりまとめたものである。

※ 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

※ 同 上 現在高速炉開発本部



NOT FOR PUBLICATION

PNC² EN 952 78-05

Aug., 1978

Computer Code for Large Leak Sodium-Water

Reaction Analysis -SWACS-

-General Outline-

Osam Miyake* Yoshihisa Shindo*

Nobuo Tanaka** Minoru Sato*

Abstract

A computer code "SWACS" has been developed to analyze various pressure / fluid-flow phenomena during the large leak sodium - water reaction accident of LMFBR's steam generator (SG) system.

"SWACS" code consists of four calculation modules, i.e. the calculation of initial spike pressure which occurs immediately after heat transfer tube breaks, the calculation of pressure propagation through the secondary loop, the calculation of quasi-static pressure which arises after spike pressure ceases, and the water leak rate calculation.

The general outline of "SWACS" code is described in this paper.

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

** Presently with Fast Breeder Reactor Development Project.

SN952 78-05

“水ノク・ナリウメ-水反應解析コード” - SWACS 概要説明書 -

- “水ノク・ナリウメ-水反應解析 (オ3報) -

正誤表

頁	行	誤	正
7	6	$\frac{\partial(PH)}{\partial t} + \frac{\partial(PH^2)}{\partial x} = \dots$	$\frac{\partial(PH)}{\partial t} + \frac{\partial(PH^2)}{\partial x} = \dots$
9	下9	その際、発應点近傍は	その際、反応点近傍は
11		(流路合流境界) 図	
15	8,9	放出系配管内	放出系配管内
19	2	長沼辰三郎	長沼辰二郎
19	5	吉田直樹	吉岡直樹
23		水噴出計算 (SWAC II)	水噴出計算 (SWAC 11)

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
記 号 表	17

付録 SWACS コードの構成

1. 概 要
2. 全体のコントロール
3. 各計算モジュールの構成
4. プログラム・サイズ

1. ま え が き

ナトリウム冷却高速増殖炉プラントの重要機器である蒸気発生器（以下SGと略す）において伝熱管が何らかの原因により破断すると、ナトリウム中へ噴出した大量の水／蒸気とナトリウムの反応が起こり、高温、高圧の水素ガスが発生し、内圧が上昇して、2次主冷却系の系統機器を破損させる恐れがある。

この大リーク・ナトリウム-水反応の諸現象の実験研究は動燃大洗工学センターにおいて、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。

この試験結果を高速増殖炉原型炉「もんじゅ」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^{2), 3), 4), 5)}が開発された。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。¹⁾ 「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もの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。

本報告は、計算コード「SWACS」の構成、各計算モジュールの内容を紹介するために概要説明書としてとりまとめたものである。

2. コードの概要

2-1 解析対象

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-水反応に附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）²⁾と呼ぶ）
- (2) ナトリウム-水反応が起こった直後より数 10msec 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-7）³⁾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）⁴⁾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 of 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）⁵⁾と呼ぶ）

2-3 コードの構成

SWACS コード¹⁾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総合関係を図 1-1 に示す。各モジュールの計算モデルの概要を表 1-1 に示す。また図 1-2 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。

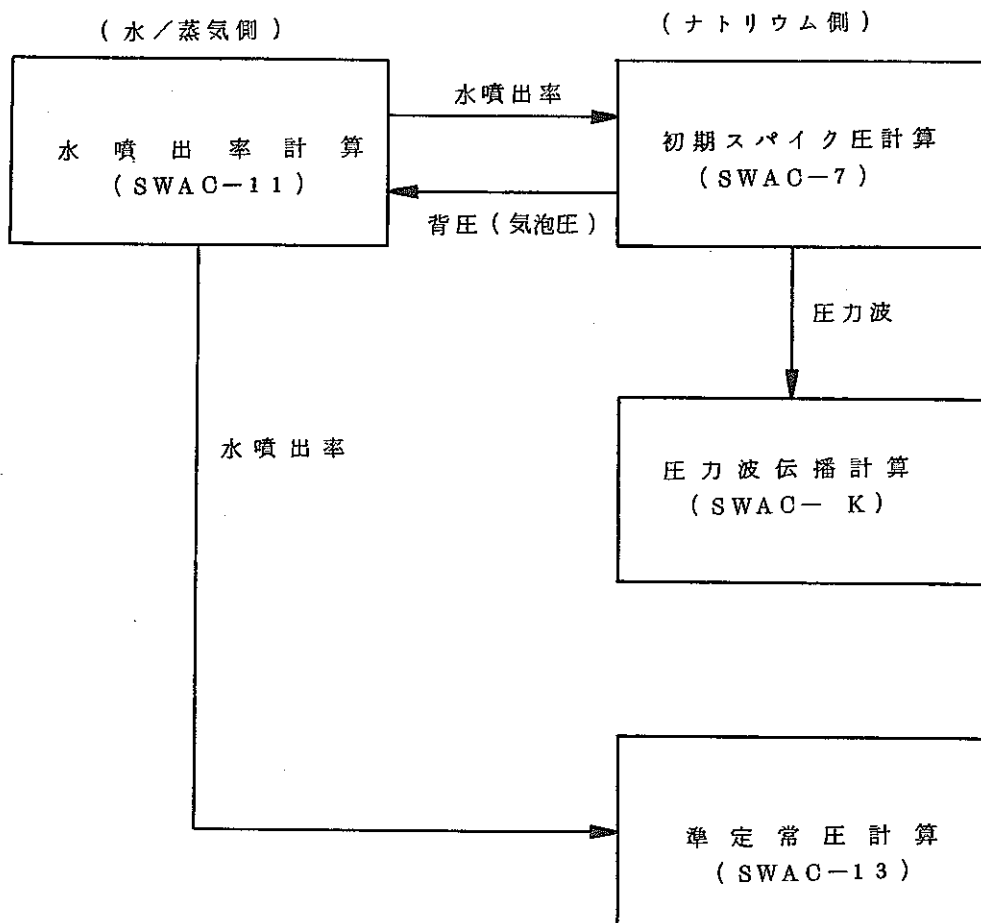


図 1-1 SWACS の計算モジュール結合関係

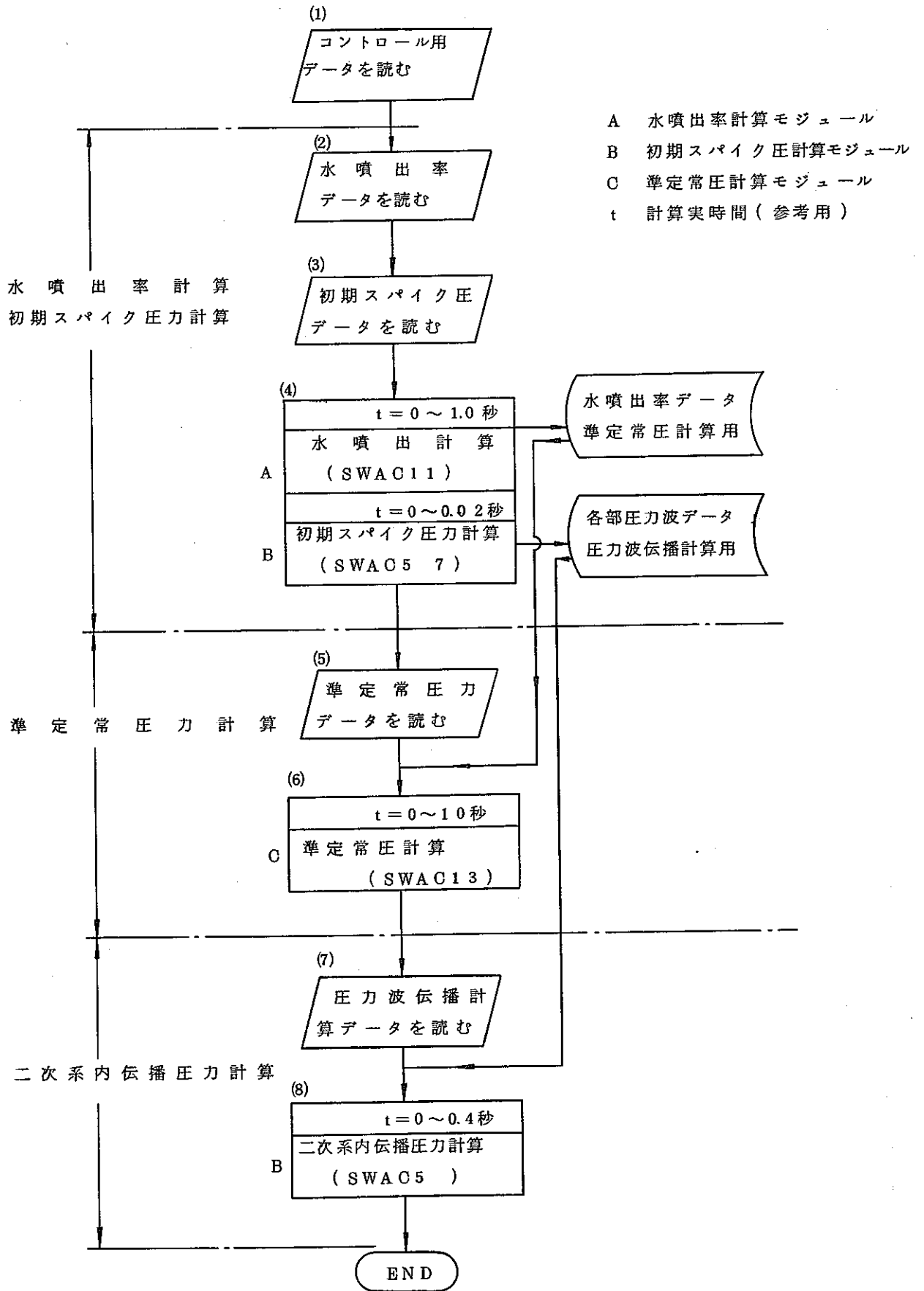


図 1-2 計算モジュールの実行手順図

表 1-1 計算モジュールのモデル

計算モジュール	内 容
SWAC-11 (水噴出率)	<ul style="list-style-type: none"> ・噴出水の相状 液, 二相, 蒸気 ・方程式 一次元, 質量, 運動量, エネルギー保存式, 状態式。 ・数値解法 陰的有限差分法(修正ICE法)。
SWAC-7 (初期スパイク圧)	<ul style="list-style-type: none"> ・流 体 圧縮性ナトリウムおよび球状水素ガス気泡。 ・方程式 一次元, 質量, 運動量保存式。 ・数値解法 特性曲線法。
SWAC-5K (圧力波伝播)	<ul style="list-style-type: none"> ・流 体 圧縮性ナトリウム。 ・方程式 一次元, 質量, 運動量保存式。 ・数値解法 特性曲線法。
SWAC-13 (準定常圧)	<ul style="list-style-type: none"> ・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单相または二相。 ・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

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²⁾する。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，過熱蒸気の水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上から，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として修正ICE (Implicit Continuous Eulerian) 法を採用している。

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。

尚，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液と考える。
- (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GS総伝熱量を総伝熱面積でわった平均値で扱う。まだ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，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附加する。

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。

(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 は衝激波を扱う際の数値計算安定化のための擬似粘性項。

(3) エネルギー保存式

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

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

(3-1), (3-2), (3-3) 式を修正 ICE 法を用いて差分化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、破断部より上流側では入口ヘッダと破断部が、破断部より下流側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。破断部境界では破断点より噴出側に三つの仮想セルを設定し、三番目の仮想セルの圧力が外圧と等しいとし、流速については三番目の仮想セルの両端で流速は等しいとする。また二番目と三番目の仮想セルの間では流体は等エンタルピー変化をするものとする。

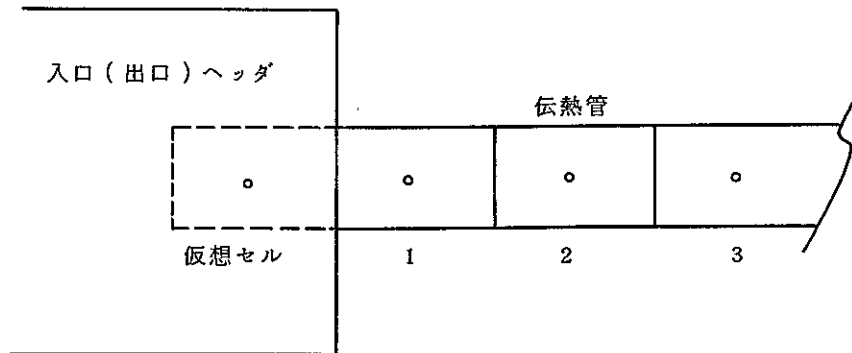


図 3-1 ヘッダ側境界

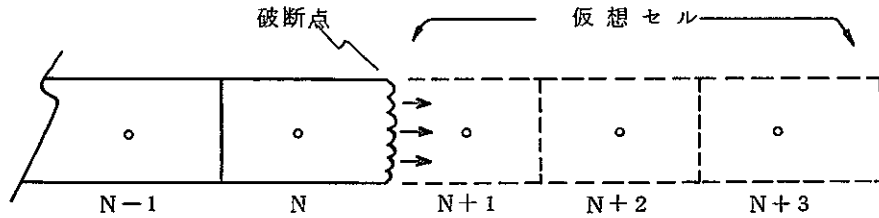


図 3-2 破断部境界

(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。

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

① f_s の算出

臨界レイノルズ数 ~ 2300 を境として

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

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

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

② ξ の算出 (管の曲率の影響)

ヘリカルコイル曲率による増倍係数 ξ は

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

③ f_r の算出 (2相の影響)

単相の場合 $f_r = 1$

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-水反応時のSG内での初期スパイク圧挙動³⁾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を計算⁴⁾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、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、反応点近傍は一次元球座標モデル、その他を一次元柱座標モデルとし両者を結合した球-柱モデルで扱い計算する。

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。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、ラブ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

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、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、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

$$-\frac{1}{g} \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x} \right) V = \frac{\partial H}{\partial x} - \sin\phi + \left(\frac{f}{d} + \frac{\xi}{L} \right) \frac{V|V|}{2g} \dots\dots\dots (4-1)$$

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

◦ 一次元球座標領域

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

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

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。

(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。

$$P_x \cdot Q_g = n \cdot R \cdot T_g \dots\dots\dots (4-5)$$

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

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。

$$P_c = P_{c0} \left(\frac{Q_{c0}}{Q_c} \right)^k \dots\dots\dots (4-7)$$

(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。

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

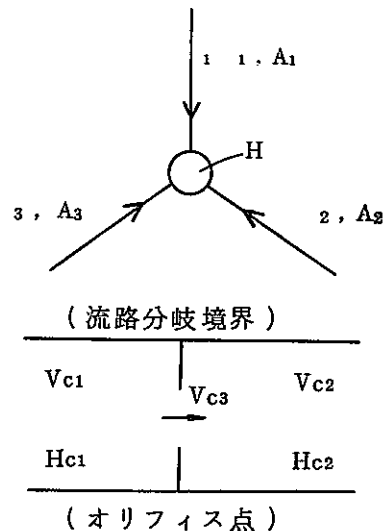
(7) オリフィス点

オリフィス点では次式が成立するとする。

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

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

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⁵⁾することを目的とし、次の一連の現象を解析することができる。

- (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、連続の式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)で継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変化、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圧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。

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

ここで P_{ik} は摩擦、形状等の圧力損失項である。

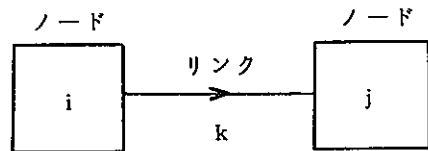
(2) 質量保存式

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。

$$\dot{M}_s = \sum_{\nu \in \tau_i} W_{s\nu} - \sum_{\nu \in \tau_i} W_{s\nu} \dots\dots\dots (5-2)$$

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

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。



(ノード・リンクモデル図)

(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。

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

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。

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

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

ただし、 $R_{HK} \equiv \rho_{HK} / \rho_{SK}$, α_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、カバーガス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

レイノルズ数の範囲で次のように定義

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

ただし $Re = \frac{Ud}{\nu}$

ii) 伝熱管コイル部の摩擦損失係数

$$\lambda_c = \frac{2}{3} Re^{-0.15} \left[0.23 + \frac{0.11}{(Lp/Dc - 1)^{1.08}} \right] \dots\dots\dots (5-7)$$

ただし $Re = \frac{UDc}{\nu}$

iii) 二相流圧損増倍係数

Lockhart-Martinelli の式を基本として用いた。

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

$\phi^2 = (\phi_o^2)^N$

ただし N は補正係数

iv) ベンド部の圧損係数

$$\left. \begin{aligned} \zeta_b &= 0.00873 \lambda \theta (R/r) & \text{Re} (r/R)^2 < 91 \\ \zeta_b &= 0.00241 \lambda \theta \text{Re}^{-0.17} (R/r)^{0.84} & \text{Re} (r/R)^2 \geq 91 \\ \lambda &= \begin{cases} 0.95 + 17.2 (R/r)^{-1.90} & R/r < 19.7 \\ 1 & R/r \geq 19.7 \end{cases} \end{aligned} \right\} \dots\dots (5-9)$$

v) その他の圧損係数

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

(5) 故出系配管内の臨界流速

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

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

6. あとがき

計算コード「SWACS」の機能確認計算および実験による初歩的な検証⁶⁾によれば本コードで採用した解析モデルで基本的な誤りはないとの結論が得られている。

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、ダウンコ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。これら機能が追加された段階で本概要説明書は改訂される予定である。

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附記いたします。

記号表

1. 水噴出率計算

A_J : 熱の仕事当量	[kgm/kcal]	P : 圧力	[kg/m ² a]
d_i : 伝熱管内径	[m]	Q : 入熱量	[kcal/m ³ ·s]
E : 全エネルギー	[kcal/kg]	q : 擬似粘性係数	[kg/m ²]
e : 管壁の粗度	[m]	Re : レイノルズ数	[—]
f_i : 摩擦損失係数	[—]	U : 流速	[m/s]
f_e : 管摩擦損失係数	[—]	ρ : 比重量	[kg/m ³]
f_r : 2相増倍係数	[—]	ζ : ヘリカルコイル増倍係数	[—]
g : 重力加速度	[m/s ²]	θ : 伝熱管の傾斜角度	[rad]
I : 内部エネルギー	[kcal/kg]		

2. 初期スパイク圧計算, 圧力波伝播計算

A : 流路断面積	[m ²]	Q_c : カバーガス体積	[m ³]
C : 音速	[m/s]	Q_g : 水素ガス気泡体積	[m ³]
d : 流路等価直径	[m]	q_w : 水噴出率	[kg/s]
F : H / H ₂ Oモル転換比	[—]	R : 一般気体定数	[kg·m/mol·°K]
f : 摩擦損失係数	[—]	T_g : 水素ガス気泡温度	[°K]
g : 重力加速度	[m/s ²]	V : 流速	[m/s]
H : 圧力水頭	[m]	α : オリフィス係数	[—]
L : 流路長さ	[m]	ζ : 形状圧損係数	[—]
P_c : カバーガス圧力	[kg/m ² a]	φ : 流路傾き	[rad]
P_x : 水素ガス気泡圧力	[kg/m ² a]	κ : カバーガス比熱比	[—]

3. 準定常圧計算

$A_{i,j}$: ノード断面積	[m ²]	Δh : ヘッド差	[m]
A_k : リンク断面積	[m ²]	i : イニシアル・ノード添字	[—]
D_o : 伝熱管外径	[m]	j : ターミナル・ノード添字	[—]
d : リンク等価直径	[m]	k : リンク添字	[—]
g : 重力加速度	[m/s ²]	L_k : リンク長さ	[m]

M_H : ノード・水素ガス重量 [kg]	W_K : 混合物重量流量 [kg/s]
M_S : ノード・ナトリウム重量 [kg]	α : ボイド率 [-]
P_{ij} : ノード・圧力 [kg/m ²]	ζ : 形状圧損係数 [-]
Q_i : 水素ガス発生量 [kg/s]	ζ_B : ベンドの圧損係数 [-]
R : 水素気体定数 [kg·m/kg °k]	λ : 摩擦損失係数 [-]
Re : レイノルズ数 [-]	μ : 粘性係数 [kg·s/m ²]
S_K : リンクのスリップ比 [-]	ν : 動粘性係数 [m ² /s]
U_H : 水素ガス流速 [m/s]	ϕ : 二相増倍係数 [-]
U_S : ナトリウム流速 [m/s]	ρ_H : 水素ガス比重量 [kg/m ³]
U_K : 混合物流速 [m/s]	ρ_S : ナトリウム比重量 [kg/m ³]
W_H : 水素ガス重量流量 [kg/s]	ρ_K : 混合物比重量 [kg/m ³]
W_S : ナトリウム重量流速 [kg/s]	

参 考 文 献

1. 長沼辰三郎, 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-」
SJ 206-77-27(1)
2. 吉田直樹, 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
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」
SJ 213-76-02(1)
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)」
SJ 213-72-02-2
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)-」
SJ 941 77-170
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」 P.18-1
(No. 1 JAPANESE PAPERS) SA013 KWG 78-01

付 録

SWACS コードの構成

1. 概 要

本文 2 項で述べたように 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¹⁾したものである。

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介して行なう。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。

又 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 項参照）

2. 全体のコントロール

付図-1 に SWACS の計算モジュールの実行手順図を，付図-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 O 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）

- JOSTD : 準定常圧計算をする (= 1) しない (= 0)
- JISPB2 : 圧力波伝播計算をする (= 1) しない (= 0)
- TEIJ : 水噴出率計算終了時刻
- TESP : 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
- (2) 水噴出率計算
- (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) LEKDEK }
(8) SWACII } : 水噴出率計算のコントロール
- (9) TFLOW : 初期スパイク圧, 圧力波伝播計算のコントロール
- (10) SWAC13 : 準定常圧計算のコントロール
- (11) 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 Δt 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。

3. 各計算モジュールの構成

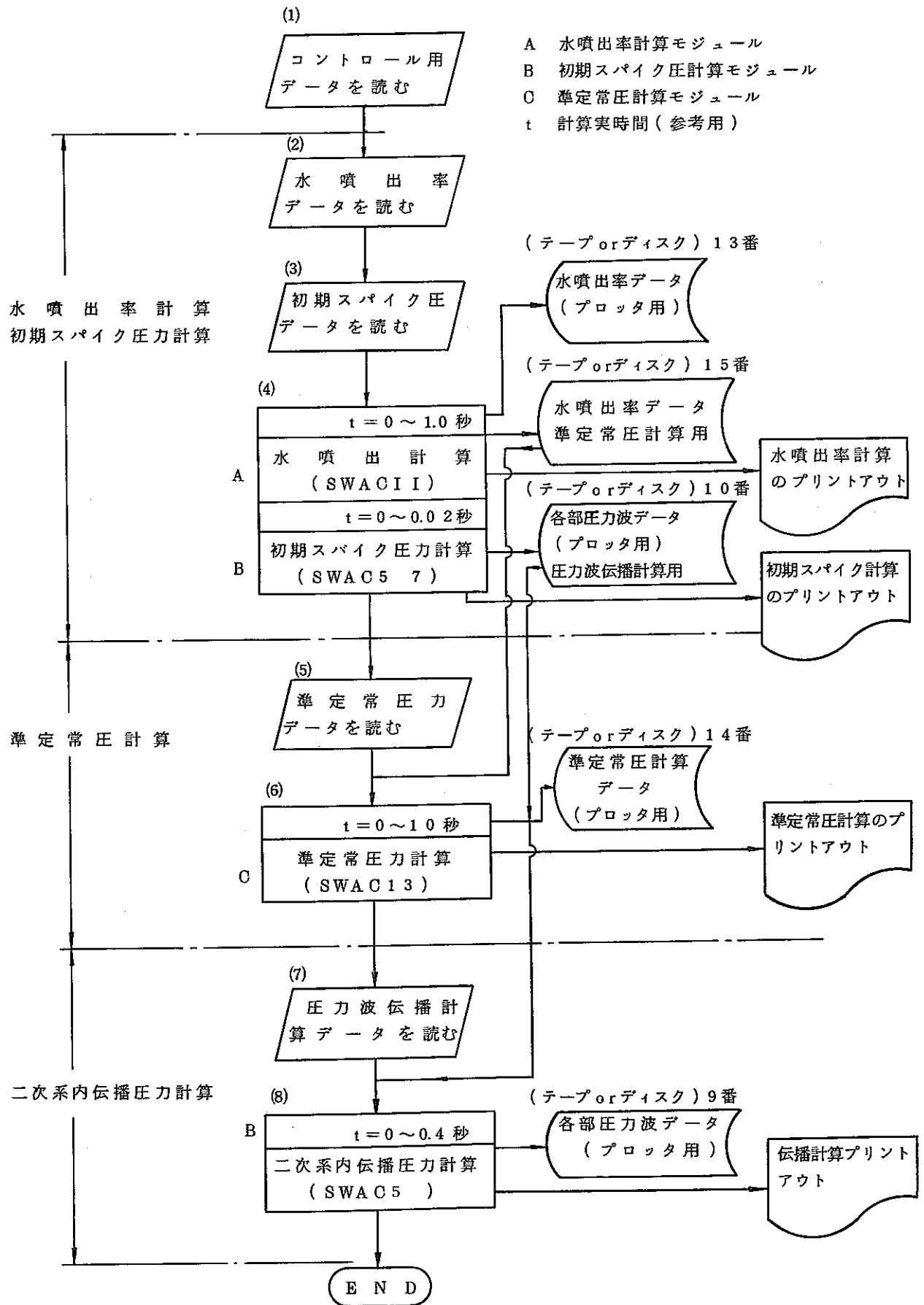
付図3に水噴出率計算モジュールの構成，付図4に初期スパイク圧計算，圧力波伝播計算モジュールの構成，付図5に準定常圧計算モジュールの構成を示す。

4. プログラム・サイズ

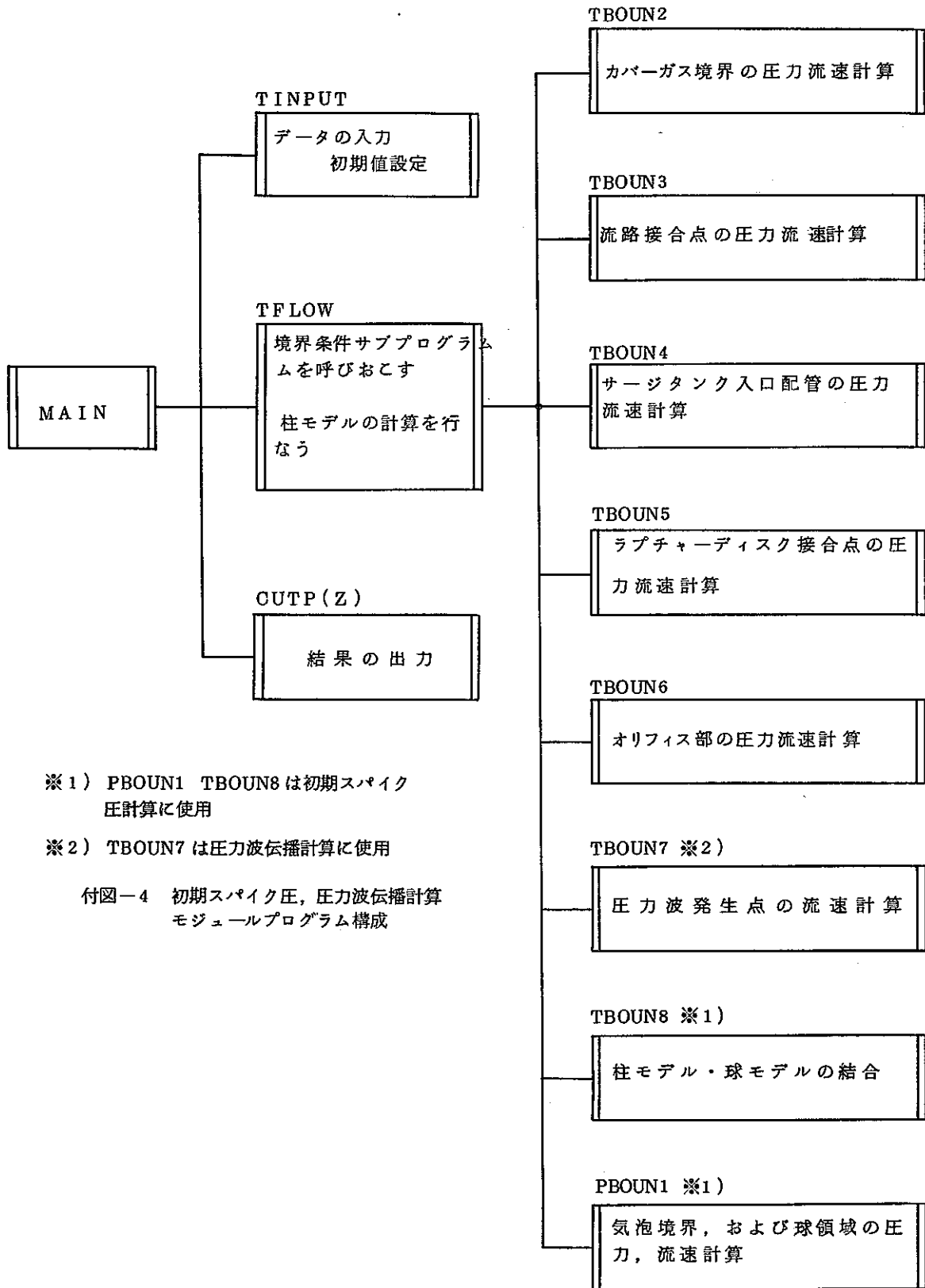
SWACSコードはFACOM230/58計算機用に作成されており，使用言語はFORTRAN-IVで，FACOM計算機Eレベルコンパイラでコンパイルされる。

プログラムサイズは

サブプログラム数	103ルーチン
カード枚数	約11000枚
必要コア容量	約480KB



付図-1 計算モジュールの実行手順図

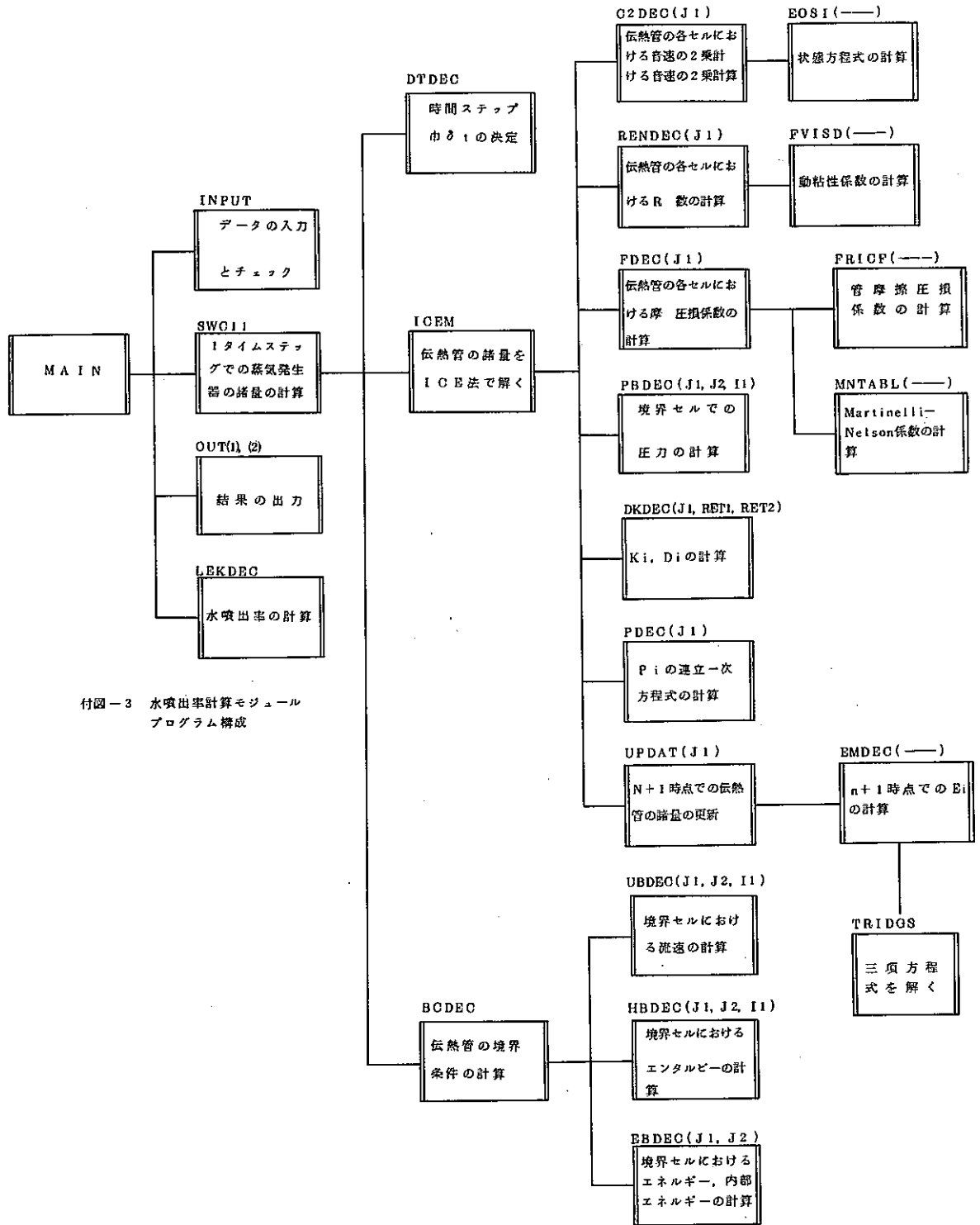


※1) PBOUN1 TBOUN8 は初期スパイク
圧計算に使用

※2) TBOUN7 は圧力波伝播計算に使用

付図-4 初期スパイク圧, 圧力波伝播計算
モジュールプログラム構成

付図-4 初期スパイク圧, 圧力波伝播計算モジュールプログラム構成



付図-3 水噴出率計算モジュールプログラム構成

付図-5 準定常圧、計算モジュールのプログラムの構成