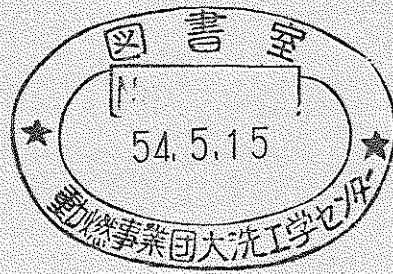


区分変更	
変更後資料番号	<del>78-07</del>
決裁年月日	平成 10 年 3 月 26 日

小リーク・ナトリウム-水反応「セーフティ  
・マップ」解析コード

SWAC-10-MJ/1 の使用マニュアル



1978年10月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
S	N 952 78-07
<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>	

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)



配 布 限 定  
PNC 〇N952 78-07  
1 9 7 8 年 1 0 月

## 小リーク・ナトリウム-水反応「セーフティ・マップ」解析コード SWAC-10-MJ/1の使用マニュアル

進 藤 嘉 久\*  
大 後 美 道\*  
三 宅 収\*  
堀 雅 夫\*\*  
佐 藤 稔\*

### 要 旨

ナトリウム冷却高速炉の蒸気発生器において、伝熱管小リーク発生時の、リーク検出計-水素濃度計-の検出性能評価は、いわゆる「セーフティ・マップ」でおこなわれる。本報告書は原型炉用「セーフティ・マップ」作成コードSWAC-10-MJ/1の取扱いマニュアルとして作成されたものである。

SWAC-10-MJ/1は、すでに同様の目的で動燃50MW蒸気発生器試験施設用に作られたSWAC-10コードを、原型炉用に改造したものである。

本改造により従来のSWAC-10コードと異なった主な点は以下のとおりである。

- (1) 計算対象を原型炉製作準備設計Iの体系とした。
- (2) 伝熱管ウェステージ式をリーク点/ターゲット間距離の効果が取扱える動燃実験式を用いた。
- (3) 一次破損孔のセルフウェステージによる孔径拡大現象を取扱えるようにした。
- (4) Na中検出器のNi膜中の水素拡散応答特性を取扱えるようにした。

---

\* 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  
\*\* 大洗工学センター・蒸気発生器開発部・部長代理



NOT FOR PUBLICATION  
PNC<sup>2</sup> BN952 78-07  
October, 1978

User's Manual of Safety Map Code SWAC-10-MJ/1

— Evaluate Detector Capability against  
Small Leak Sodium-Water Reaction —

Yoshihisa Shindo\*, Yoshimichi Daigo\*,  
Osamu Miyake\*, Masao Hori\* and  
Minoru Sato\*

#### Abstract

Water leak detectors—hydrogen concentration meters are equipped with secondary cooling system of LMFBR to detect small leak of water from heat transfer tube in steam generator.

Leak rate region to be able to detect the water leaks before secondary tube failure is decided by using the concept of so-called "safety map".

Computer code "SWAC-10-MJ/1" provides the safety map for secondary cooling system of proto-type reactor. This paper is written for user's manual of the code.

SWAC-10-MJ/1 code was made through the modification of original code "SWAC-10" which had been developed for 50MW Steam Generator Test facility.

Major differences from SWAC-10 code are as follows ;

- (1) Secondary cooling system of proto-type LMFBR is selected for calculation object
- (2) Wastage rate equations proposed by PNC are accepted.
- (3) Effect of enlargement of initial water leak hole due to self-wastage is introduced.
- (4) Hydrogen diffusion process in Ni membrane of hydrogendetector is introduced

---

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

\*\* Steam Generator Division, do.

## 目 次

1	まえがき	1
2	計算コード	3
2.1	計算体系	3
2.2	計算モデル	5
2.3	計算式	9
2.4	計算コードの構成	22
2.5	インプット形式	26
2.6	アウトプット	36
2.7	データ作成要領	37
3	テスト計算	38
3.1	テスト計算の概要	38
3.2	計算条件	40
3.3	計算結果	42
3.4	所要計算時間	42
4	あとがき	45
5	参考文献	46
6	付録	47
	インプットデータリスト	47

## 1. ま え が き

ナトリウム冷却高速炉の蒸気発生器（以下SGと略記する）において伝熱管壁のピンホールより水の小リークが生じる場合がある。水のリーク近傍では、ナトリウムと水の反応面に生ずる高温・高腐食性反応生成物により、隣接健全伝熱管壁が「ウェステージ」現象により短時間で侵食されて、二次破損が生じる。

破損伝播を防止するためには、小リークを検出して伝熱管内保有水を大気中にブローし、ナトリウムへの水の噴出を止めるほかない。

小リークの検出器として現在実用レベルに達していると思われるものは、水素濃度計を用いるものである。これはナトリウムと水の反応生成物の一つである水素により、ナトリウム中およびカバーガス中の水素濃度が、通常の運転レベルよりも上昇するのを検知することで、水のリークを知ろうというものである。この検出法は、水リーク点から水素計の設置されている場所への水素の輸送遅れ時間、水素計構造上からくる測定遅れ時間などにより、検出するのにある時間が必要である。

さまざまなSG運転条件と水リーク条件とにおいて、水リークが始まってから検出して二次破損防止対策を講じてその効果が現われるまでの時間と、ウェステージにより二次破損が生じる時間を比較することにより、二次破損を防止し得る条件領域が明らかとなる。通常、これらは「セーフティ・マップ」と呼ばれる図上で比較される。「セーフティ・マップ」作成用計算コードとして、動燃50MW蒸気発生器試験施設（以後50MWSGTFと略記する）用に「SWAC-10」コード<sup>(1)</sup>が開発され、施設運転の要に供されてきた。

本報告の「SWAC-10-MJ/1」コードは原型炉「もんじゅ」設計用に、「SWAC-10」コードを改造したものである。その機能は「SWAC-10」と同様に「セーフティ・マップ」を作成する（このほかSG内での小リーク発生からの時刻に対する各リーク検出系の応答特性計算、水素濃度および水素濃度上昇率を算出する）ものである。

「SWAC-10-MJ/1」コードに改造するにあたり、変更した個所は次のとおりである。

- (1) 計算対象を「もんじゅ」製作準備設計Iの体系とした。
- (2) ウェステージ式はリーク点と隣接ターゲット管間距離を考慮した動燃実験式を用いた。
- (3) 一次破損孔のセルフウェステージによる孔径拡大効果を導入した。
- (4) 通常運転時の初期バックグラウンド濃度は内部計算により求めるようにした。

- (5) リーク率の外部入力化および計算点の増加を行なった。
- (6) ナトリウム中への水素溶解割合，許容損耗肉厚を外部入力で与えるようにした。
- (7) 検出器のNi膜中の水素拡散応答特性を取扱えるようにした。

このため，従来のコード使用マニュアルの一部を変更し，コード改造に伴うテスト計算結果を追加して，使用マニュアルとしたのが本報告である。

## 2. 計算コード

### 2.1 計算体系

図 2.1 に計算体系を示す。2次ナトリウム系は中間熱交換器、ヘリカル伝熱管、有液面型蒸気発生器（過熱器、蒸発器）、主循環ポンプから構成されている。純化系は蒸発器出口側のコールドレグ配管のポンプ入口部付近に設置されている。蒸発器のナトリウム液面は、オーバーフローラインからダンプタンクに常時、ナトリウムが流入し、ダンプタンクからくみ上げラインにより、蒸発器の入口配管部にもどされることにより、一定に保たれている。

水素検出系はナトリウム中には過熱器出口Eおよび蒸発器出口Jに、カバーガス中には過熱器および蒸発器に各々取付られている。両検出計ともNi膜の拡散型検出器を用いている。

水／蒸気系は蒸発器、気水分離器、過熱器を通り、タービン系に連がる。隔離弁は蒸発器入口、気水分離器出口、過熱器出口に設けられている。水／蒸気の大気放出系は蒸発器出口、過熱器入口、過熱器出口配管に大気放出配管が結合されている。蒸発器入口からの放出系は放出配管にブロータンクが結合されている。



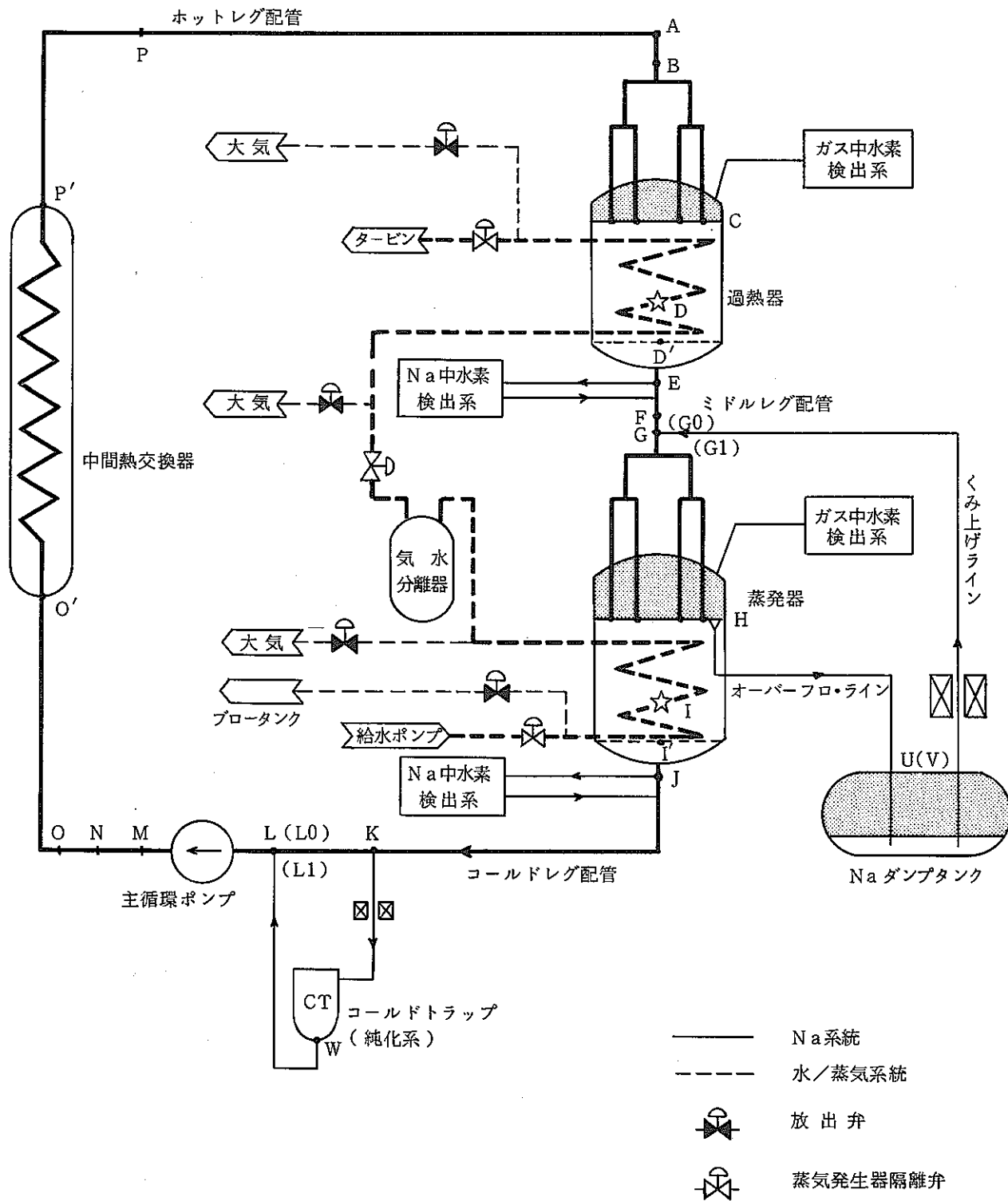


図 2.1 計算体系

## 2.2 計算モデル

### 2.2.1 セーフティ・マップ

セーフティ・マップは小リークが蒸発器または過熱器の伝熱管部で発生した時、隣接伝熱管がウェステージを受け、破損するまでの時間（許容損耗時間）とリーク発生時から発生水素を検出し、水／蒸気系のブローダウンによりナトリウム－水反応が停止するまでの時間（反応停止時間）を同一水リーク率に対して表わしたものである。反応停止時間と許容損耗時間の大小を同一水リーク率（初期リーク率）に対して比較することにより隣接伝熱管が破損するか否かを判定することができる。反応停止時間が許容損耗時間よりも短かければ、リークが発生しても隣接伝熱管を破損させずに、プラントを停止することができる。

このセーフティ・マップにより小リーク時の検出能力を評価する方法は J・A・Ford<sup>(2)</sup>らにより開発されたものである。

以下にこのセーフティ・マップの計算モデルについて記す。

### 2.2.2 許容損耗時間

許容損耗時間とは、セルフウェステージによる初期リーク孔の自己拡大（リーク率の増大）を考慮し、初期リークおよび自己拡大後のリーク（自己拡大発生時のみ）による隣接伝熱管へのウェステージ（以後ターゲットウェステージと略記する）によって許容損耗肉厚まで減肉させるに要する時間とし、初期リーク率に対して示される。

自己拡大がある場合は、自己拡大発生までの期間に損耗された肉厚を、許容損耗肉厚から引いた残存肉厚が、自己拡大後の増大リークにより損耗されるまでの時間を自己拡大発生時間に加えるものとする。

- (1) ターゲットウェステージ率は小リーク試験装置 SWAT-2 の実験結果から得られた実験式<sup>(3)</sup>を用いる。この式は伝熱管材質（SUS、クロモリ）、ナトリウム温度、リーク点と隣接伝熱管外面間距離  $L_{LT}$  / リーク孔径  $D_L$  を実験パラメータとして整理されたものであり適用範囲の最小水リーク率は  $L_{LT} / D_L$  を実験パラメータとして整理された同装置による実験結果<sup>(3)</sup> から  $L_{LT} / D_L$  が 150 の  $D_L$  に相当する値（外部入力として与える）とする。この値以下ではウェステージ率は零とする。
- (2) セルフウェステージによるリーク孔拡大時間はクロモリに対しては Greene の実験データ<sup>(4)</sup> を、ステンレスに対しては SWAT-2 の実験データから求めた水リーク率に対し

て整理した実験式<sup>(3)</sup>を用いる。

リーク孔拡大後の増大リーク率は初期リーク率に対する倍率を外部入力により与え計算する。

(3) 許容損耗肉厚は公称管厚の指定%（任意指定）を外部入力により与え計算する。

### 2.2.3. 反応停止時間

リーク発生から水素濃度上昇、水素検出、反応停止までの過程を図 2.2 に示す。

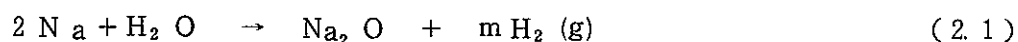
反応停止時間は検出時間（ $t_{DCT}$ ）、オペレータ判断時間（ $t_{OP}$ ）、水／蒸気系のブローダウン時間（ $t_{DP}$ ）の和で表わされる。

検出時間はナトリウム中濃度検出法では、①リーク検出器の真空側の水素濃度が、検出可能な濃度となるまでの水素蓄積時間（Hydrogen build up time）（ $t_{DT}$ ）②リーク発生場所から検出器までの水素輸送時間（ $t_{TR}$ ）との和とし、カバーガス中濃度検出法では、①水素気泡がリーク発生場所からカバーガスの自由液面まで上昇し、リーク検出器の真空側の水素濃度が検出可能な濃度となるまでの水素蓄積時間（ $t_{DT}$ ）、②カバーガスから検出器までの水素輸送時間（ $t_{TR}$ ）との和とする。

以下に同図の事象の流れに従って説明する。

#### (1) 水素ガスの発生

(a) リーク水とナトリウムとの反応は次式に従うとする。



但し、 $m$ は1とし、水1モルに対し、水素1モルが発生するものとする。

(b) 発生水素ガスの1部分はただちに均一にナトリウム中に溶解するほかに、ナトリウム中を上昇し、カバーガス中へ移行する。

#### (2) ナトリウム中水素濃度

(a) リーク水によるナトリウム中水素濃度増分

ナトリウム中に溶解する水素の溶解割合は外部入力により水リーク率に対して一定な値を与える場合と、内部計算により求める場合がある。内部計算の計算モデルはSWAT-2試験装置の実験結果から求めた実験式（根井の式）<sup>(5)</sup>を用いた。

(b) 2次系循環による濃度上昇

ナトリウム中に均一に溶け込んだ水素の輸送速度は2次系のナトリウム流速と同じ

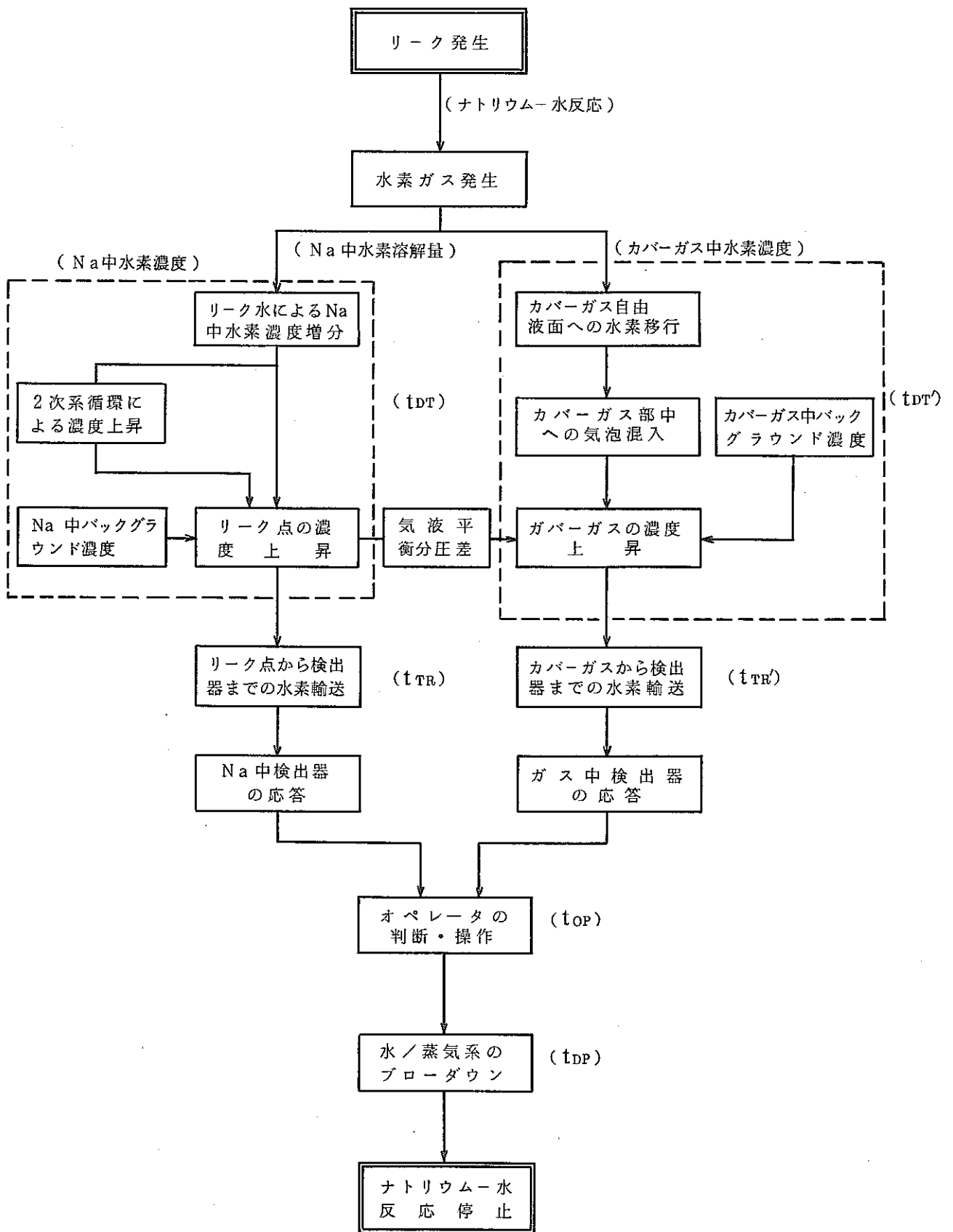


図 2.2 リーク発生から反応停止までの過程

とし、各流路位置での水素濃度上昇はステップ状に変化するものとする。

(c) リーク点の濃度上昇

リーク点の濃度は初期バックグラウンド濃度に、リーク点での発生濃度増分が、2次系循環時間遅れて加算されたものである。すなわちステップ状の増分を循環回数回バックグラウンド濃度に加えたものとする。

(d) ナトリウム中初期バックグラウンド濃度

伝熱管壁を通して水側より拡散してくる水素量と2次ナトリウム純化系のコールドトラップによる除去水素量から決定される。

(3) カバーガス中水素濃度

(a) カバーガス自由液面への水素移行

発生水素のうちナトリウムと溶解しない分は気泡となり、リーク点からカバーガス自由液面まで一定上昇速度（外部入力）で浮上するものとする。

(b) カバーガス部中への気泡混入

カバーガス自由液面へ浮上した水素気泡が完全にカバーガス中に混入する時間を考慮する。（外部入力）

(c) カバーガス中水素濃度

(i) カバーガス中水素濃度変化は(a)、(b)の水素気泡の浮上混入のほか、バルクのナトリウムとカバーガスの気液平衡からの水素分圧のずれによる水素移行およびカバーガス部内壁に付着するNaに吸着し、NaHとなることによる減少分をも考慮する。

(ii) バルクのナトリウムとカバーガスの気液平衡からの水素分圧のずれは、リーク点で発生したステップ状の水素濃度がカバーガス液面のナトリウム側にあらわれる時に発生するものとする。この気液間濃度不平衡から平衡状態になる時間も考慮し、外部入力で与える。

(iii) 通常運転開始時（カバーガス中水素濃度高状態）では気液間濃度不平衡によるカバーガス中の濃度上昇は無視する。

(d) カバーガス中初期バックグラウンド濃度

通常運転開始時は、外部入力で与えるものとし、開始以後の通常運転時はナトリウム中溶解水素の液面で気液平衡が保たれているものとし、その平衡分圧の濃度とする。気液平衡式における係数はVissers<sup>(6)</sup>らの求めたものを用いる。

(4) 検出器までの輸送時間

ナトリウム中検出器ではリーク発生場所から、またカバーガス中検出器ではカバーガス部から、それぞれの検出器のNi膜まで水素が輸送される時間  $t_{TR}$  ,  $t_{TR}'$  とする。

#### (5) 検出器の応答

検出部に到達した水素は検出器のNi膜中を拡散で通過し、真空側に出る。この応答計算を簡単化するために、むだ遅れ時間と1次おくれ型の応答曲線で近似する。すなわち図2.3(a)に示すようにナトリウム中検出器では、Ni膜表面にステップ状の水素濃度変化があると、むだ遅れ時間 ( $t_{DY}$ ) 経過した後、時定数 ( $t_T$ ) の1次遅れ型応答が現われる。ガス中検出器では同図(b)に示すように、検出部に輸送されてくる水素濃度変化はランプ状変化があると、むだ遅れ時間 ( $t_{DY}'$ ) の後に現われるものとする。

ここでNi膜に加わる水素濃度はリーク点で発生した増分に検出率(検出器に輸送される迄の濃度変化率)を乗じたものとする。

これらのむだ遅れ時間、時定数および検出率は外部入力として与えられる。

#### (6) オペレータの判断・操作

オペレータは図2.3の検出器の指示する水素濃度の増加値がバックグラウンドレベルの指定パーセント以上になったとき、水リーク発生と判断し、SGのシャットダウン操作を開始する。この動作に要する時間 ( $t_{OP}$ ) は外部入力を与える。

#### (7) SGシャットダウンに伴う水側保有水のブローダウン動作 (SGの隔離弁の閉動作、放出弁の開動作等) により伝熱管内圧力が下がり、水リーク率は減少し、ナトリウム-水反応現象は実質的に終了する。

このブローダウン所用時間 ( $t_{DP}$ ) は外部入力を与える。

## 2.3 計算式

### 2.3.1 許容損耗時間 ( $t_A$ )

図2.4に計算概念図を示す。

初期リーク孔がセルフウェステージにより拡大がおきる時間の曲線と初期リーク率  $G_0$  一定で隣接管が破損するまでの時間(自己拡大のない場合)の曲線との交点Pを、自己拡大発生の境界水リーク率  $G_P$  とし、許容損耗時間の計算にさいして、水リーク率範囲を分けて取扱う。

(i) ターゲット管が貫通する前にリーク孔の自己拡大発生がある範囲(初期リーク率

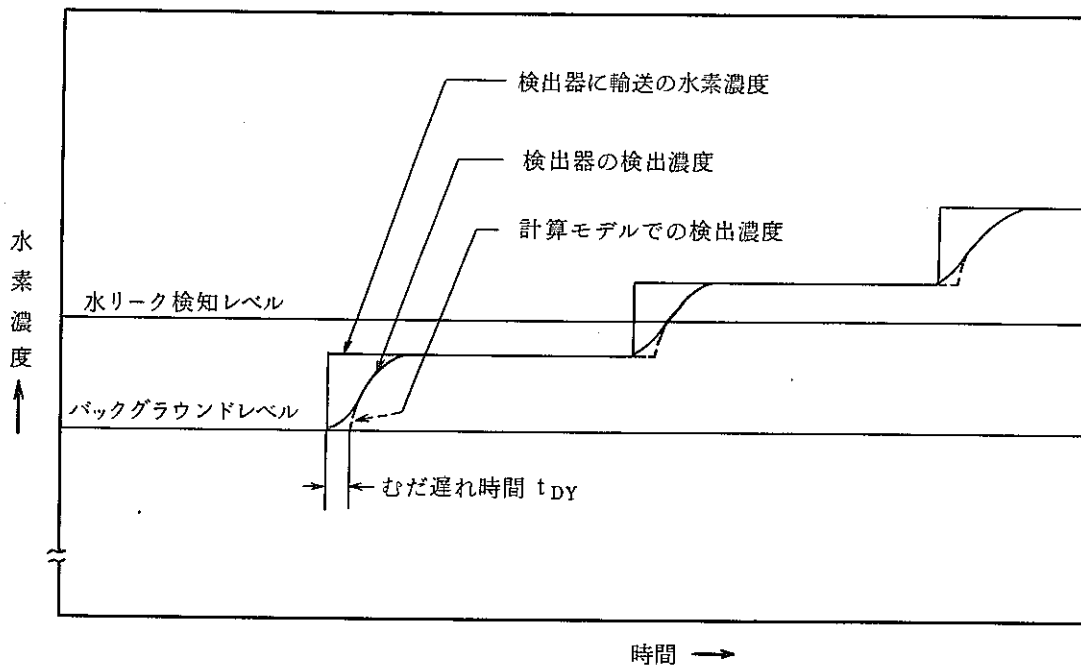


図 2.3.(a) Na 中水素検出系の検出濃度

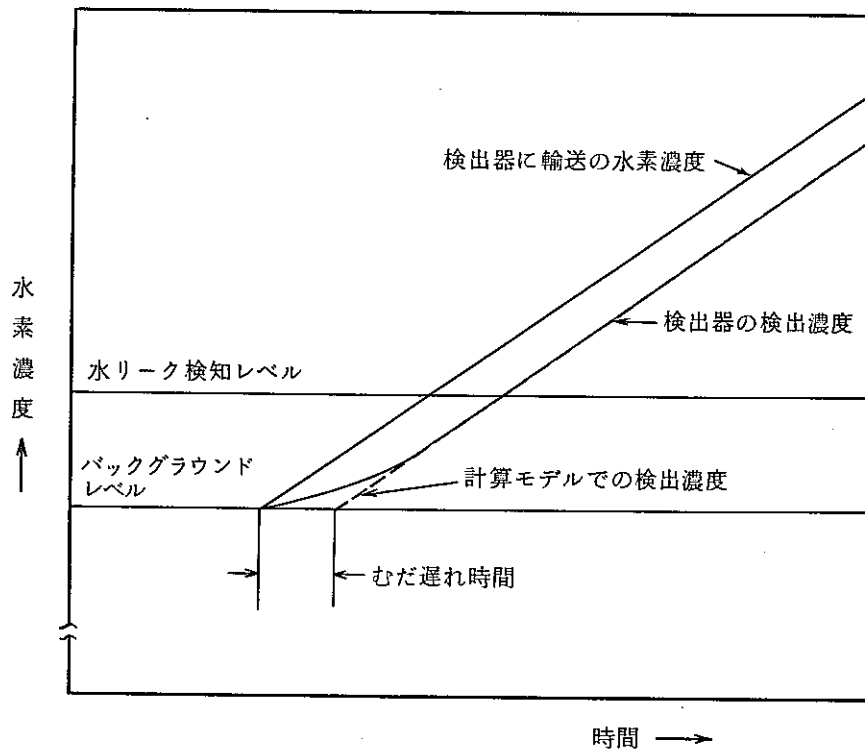


図 2.3.(b) ガス中水素検出系の検出濃度

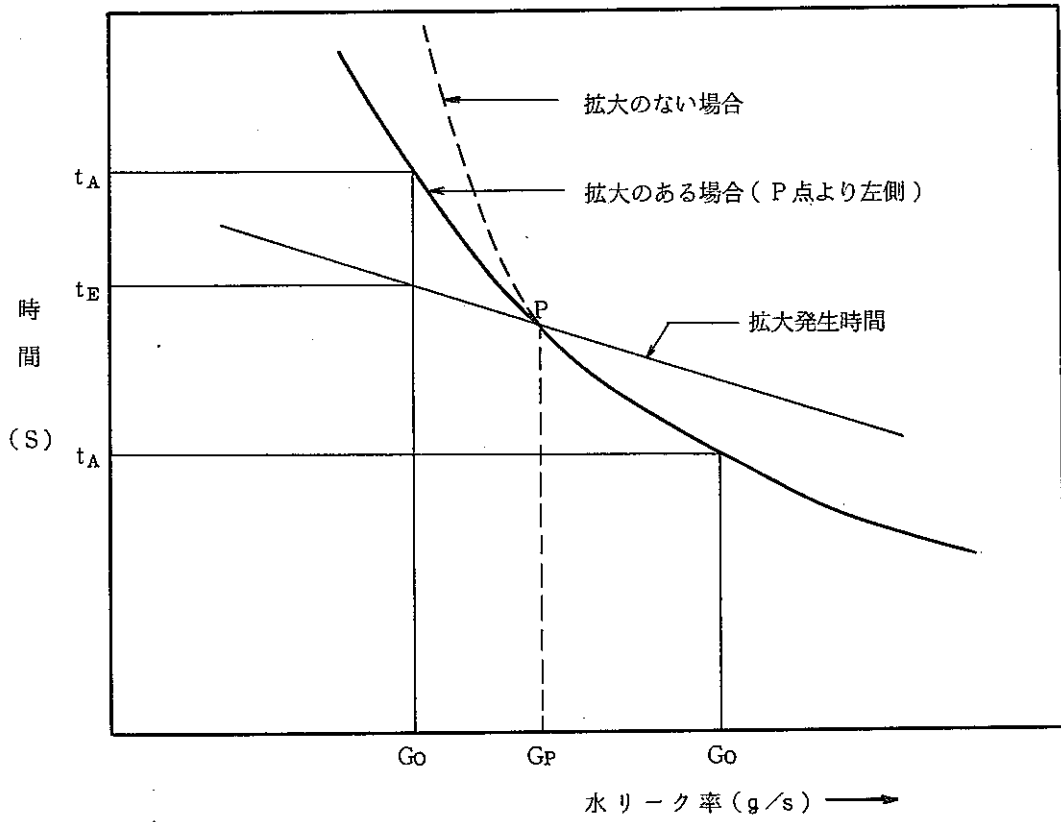


図 2.4 許容損耗時間計算概念



$$G_0 \leq G_p)$$

リーク孔が生ずる時間  $t_E$  (sec) までに、初期リーク率  $G_0$  (g/s) のターゲットウェステージ率  $W_{G0}$  (mm/s) による損耗肉厚を許容損耗肉厚  $\tau_A$  (mm) から引いた残存肉厚  $\tau_{W_{G0}}$  は

$$\tau_{W_{G0}} = \tau_A - W_{G0} \times t_E \quad [\text{mm}] \quad (2.2)$$

自己拡大後の増大したリーク率  $G_E$  (g/s) のターゲットウェステージ率  $W_{G_E}$  (mm/s) によって残存肉厚が損耗するまでの時間  $t_{EP}$  は

$$t_{EP} = \frac{\tau_{W_{G0}}}{W_{G_E}} \quad [\text{sec}] \quad (2.3)$$

従って、許容損耗時間  $t_A$  は

$$t_A = t_E + t_{EP} \quad [\text{sec}] \quad (2.4)$$

(ii) リーク孔の自己拡大発生前にターゲット管が貫通する範囲 ( $G_0 > G_p$ )

初期リーク孔径は隣接管破損時まで一定であるから、

$$t_A = \frac{\tau_A}{W_{G0}} \quad [\text{sec}] \quad (2.5)$$

(1) ターゲットウェステージ率

(a) クロモリ<sup>(3)</sup>

$$WR = \frac{4410}{L_{LT}} \exp \left\{ - \left[ 0.255 \left( \ln \frac{G}{5.12} \right)^2 + \frac{5460}{(T_L + 273)} \right] \right\} \quad [\text{mm/s}] \quad (2.6)$$

(b) ステンレス<sup>(3)</sup>

$$WR = \frac{9205}{L_{LT}} \exp \left\{ - \left[ 0.287 \left( \ln \frac{G}{3.19} \right)^2 + \frac{7180}{(T_L + 273)} \right] \right\} \quad [\text{mm/s}] \quad (2.7)$$

(2.6), (2.7) 両式の適用範囲はリーク孔とターゲット間距離  $L_{LT}$  (mm) とリーク孔直径  $D_L$  (mm) との比,  $L_{LT}/D_L$  が 150 以上の範囲ではウェステージ率は零とする。

計算では  $D_L = L_{LT}/150$  に相当する水リーク率  $G_{LD}$  が外部入力として与えられ、ウェステージ率の適用範囲を限定している。

$G \leq G_{LD}$  のとき

$$WR = 0 \quad [\text{mm/s}] \quad (2.8)$$

但し,  $L_{LT}$ ,  $G$ , ナトリウム温度  $T_L$  (°C) の適用範囲は以下のとおりである。<sup>(7)</sup>

$$\left. \begin{array}{l} 5 < L_{LT} \text{ (mm)} < 100 \\ 5 \times 10^{-4} < G \text{ (g/s)} < 17.5 \\ 280 < T_L \text{ (}^\circ\text{C)} < 530 \end{array} \right\} \quad (2.9)$$

(2) リーク孔自己拡大発生時間 ( $t_E$ )

(a) クロモリ<sup>(4)</sup>

$$t_E = 280 \times G^{-0.42} \quad [\text{sec}] \quad (2.10)$$

(b) ステンレス<sup>(3)</sup>

$$t_E = 150 \times G^{-1.0} \quad [\text{sec}] \quad (2.11)$$

(2.10), (2.11) 式の適用範囲は図 2.4 の P 点の水リーク率  $G_P$  までとする。

### 2.3.2 ナトリウム中水素濃度

(1) 発生水素ガス量 ( $Q_H$ )

$$Q_H = m \times \frac{2}{18} \times G \quad [\text{g/s}] \quad (2.12)$$

但し,  $m$  [ - ] : 水 1 モルに対して発生する水素モル数 ( $m = 1$ )

(2) Na 中水素溶解量 ( $Q_{HN}$ )

$$Q_{HN} = \phi \times Q_H \quad [\text{g/s}] \quad (2.13)$$

(3) Na 中水素溶解割合 ( $\phi$ )

外部入力と計算による場合がある。

(a) 外部入力の場合は全リーク率範囲において一定値を与える。

(b) 計算では根井の式<sup>(5)</sup>を用いる。

$$\phi = 1 - \left\{ 1 - \frac{0.02 \rho_N (C_{SL} - C_{OBG}) \times 10^{-6} \times L_{LLV}}{G^{0.7} \rho_H (U_B - U_N)} \right\}^3 \quad [ - ] \quad (2.14)$$

Na 中飽和水素溶解度は Vissers<sup>(6)</sup>らの式を用いる。

$$\log_{10} C_{SL} = 6.067 - \frac{2880}{(T_L + 273.0)} \quad [\text{PPm}] \quad (2.15)$$

但し,  $\phi = 1$  となる  $G$  以下では  $\phi = 1$  (100%溶解) とする。

$G$  [ g/s ] : 水リーク率

$\rho_N$  [ g/cm<sup>3</sup> ] : ナトリウム密度

$\rho_H$  [ g/cm<sup>3</sup> ] : 水素密度

$C_{SL}$  [ PPm ] : 水リーク点におけるナトリウム中飽和水素濃度

$C_{OBG}$  [ PPm ] : バックグラウンドナトリウム中水素濃度

- $L_{LLV}$  [ m ] : リーク点からナトリウム液面までの距離  
 $U_B$  [ m/s ] : 水素気泡のナトリウム中での上昇速度  
 $U_N$  [ m/s ] : リーク点からナトリウム液面間のナトリウム流速

(4) リーク水によるナトリウム中水素濃度増分 ( $\Delta C$ )

$$\Delta C = \frac{Q_{HN}}{Q_N \times 10^{-3}} \times 10^6 \quad [\text{PPm}] \quad (2.16)$$

但し  $Q_N$  [ Kg/s ] : ナトリウム流量

(5) 2次ナトリウム系の濃度上昇

図 2.1 の計算体系図において、各節点の水素濃度は次式に従う。

(a) 0 点の濃度  $C_{CO}$  (PPm) は

$$t \leq t_{LO} \text{ のとき } C_{CO} = C_{OBG} \quad (2.17)$$

$$t > t_{LO} \quad " \quad C_{CO} = f_{OL}(t - t_{LO}) \quad (2.18)$$

(b) P 点の濃度  $C_{CP}$  (PPm) は

$$t \leq t_{LP} \text{ のとき } C_{CP} = C_{OBG} \quad (2.19)$$

$$t > t_{LP} \quad " \quad C_{CP} = f_{OL}(t - t_{LP}) \quad (2.20)$$

(c) B 点の濃度  $C_{CB}$  (PPm) は

$$t \leq t_{LB} \text{ のとき } C_{CB} = C_{OBG} \quad (2.21)$$

$$t > t_{LB} \quad " \quad C_{CB} = f_{OL}(t - t_{LB}) \quad (2.22)$$

(d) C 点 (SH の自由液面) の濃度  $C_{CC}$  (PPm) は

$$t \leq t_{LC} \text{ のとき } C_{CC} = C_{OBG} \quad (2.23)$$

$$t > t_{LC} \quad " \quad C_{CC} = f_{OL}(t - t_{LC}) \quad (2.24)$$

(e) D 点 (SH の水リーク点) の濃度  $f_{CD}$  (PPm) は

$$t = 0 \quad \text{のとき} \quad f_{CD}(0) = C_{OBG} + \Delta C_{DFSH} \quad (2.25)$$

$$0 < t \leq t_{LD} \quad " \quad f_{CD}(t) = C_{OBG} + \Delta C_{DFSH} + \Delta C_{SH} \quad (2.26)$$

$$t > t_{LD} \quad " \quad f_{CD}(t) = f_{OL}(t - t_{LD}) + \Delta C_{DFSH} + \Delta C_{SH} \quad (2.27)$$

(f) E 点 (SH 出口での Na の中検出系取出点)  $C_{CE}$  (PPm) は

$$t \leq t_{DE} \text{ のとき } C_{CE} = C_{OBG} + \Delta C_{DFSH} \quad (2.28)$$

$$t > t_{DE} \quad " \quad C_{CE} = f_{CD}(t - t_{DE}) \quad (2.29)$$

(g) G 点 (ミドルレグ配管とくみ上げ系配管との合流点)  $f_{CG}(t)$  (PPm) は

(i) GO 側

$$t \leq t_{DG} \text{ のとき } C_{CGO} = C_{OBG} + \Delta C_{DFSH} \quad (2.30)$$

$$t > t_{DG} \quad " \quad C_{CGO} = f_{CD}(t - t_{DG}) \quad (2.31)$$

(ii) G1側

$$t \leq t_{HG} \text{ のとき } C_{CG1} = C_{OBG} + \Delta C_{DFEV} \quad (2.32)$$

$$t > t_{HG} \quad " \quad C_{CG1} = f_{CH}(t - t_{HG}) \quad (2.33)$$

(iii) G点

$$f_{CG}(t) = \frac{C_{CGO} \times Q_N + C_{CG1} \times Q_{OV}}{Q_N + Q_{OV}} \quad (2.34)$$

(h) H点 (EVの自由液面)  $f_{OH}(t)$  (PPm) は

$$t \leq t_{GH} \text{ のとき } f_{OH}(t) = C_{OB} \quad (2.35)$$

$$t > t_{GH} \quad " \quad f_{OH}(t) = f_{CG}(t - t_{GH}) \quad (2.36)$$

(i) I点 (EVの水リーク点)  $f_{OI}(t)$  (PPm) は

$$t = 0 \quad \text{ のとき } f_{OI}(t) = C_{OBG} + \Delta C_{DFEV} \quad (2.37)$$

$$0 < t < t_{HI} \quad " \quad f_{OI}(t) = C_{OBG} + \Delta C_{EV} + \Delta C_{DFEV} \quad (2.38)$$

$$t > t_{HI} \quad " \quad f_{OI}(t) = f_{OH}(t) = f_{OH}(t - t_{HI}) + \Delta C_{EV} + \Delta C_{DFEV} \quad (2.39)$$

(j) J点 (EV出口でのNa中検出系取出点)  $C_{OJ}$  (PPm) は

$$t \leq t_{IJ} \text{ のとき } C_{OJ} = C_{OBG} + \Delta C_{DFEV} \quad (2.40)$$

$$t > t_{IJ} \quad " \quad C_{OJ} = f_{OI}(t - t_{IJ}) \quad (2.41)$$

(k) K点 (純化系のコールドレグ配管での取出点)  $C_{OK}$  (PPm) は

$$t \leq t_{IK} \text{ のとき } C_{OK} = C_{OBG} + \Delta C_{DFEV} \quad (2.42)$$

$$t > t_{IK} \quad " \quad C_{OK} = f_{OI}(t - t_{IK}) \quad (2.43)$$

(l) L点 (コールドレグ配管と純化系出口配管との合流点)  $f_{OL}(t)$  (PPm) は

(i) L0側

$$t \leq t_{IL} \text{ のとき } C_{OLO} = C_{OBG} + \Delta C_{DFEV} \quad (2.44)$$

$$t > t_{IL} \quad " \quad C_{OLO} = f_{OI}(t - t_{IL}) \quad (2.45)$$

(ii) CT入口側

$$t \leq t_{IW} \text{ のとき } C_{OTI} = C_{OBG} \quad (2.46)$$

$$t > t_{IW} \quad " \quad C_{OTI} = f_{OI}(t - t_{IW}) \quad (2.47)$$

(iii) L1側

$$t \leq t_{WL} \text{ のとき } C_{CL1} = f_{CTO} (C_{OBG}) \quad (2.48)$$

$$t > t_{WL} \quad " \quad C_{CL1} = f_{CTO} (C_{CTI}) \quad (2.49)$$

(iv) L点

$$f_{CL}(t) = \frac{C_{CLO} \times (Q_N - Q_{CT}) + C_{CL1} \times Q_{CT}}{Q_N} \quad (2.50)$$

但し  $t_{LO}$  [sec] : L~0間の水素輸送時間 (=ナトリウム流速)

$t_{LP}$  [sec] : L~P "

$t_{LB}$  [sec] : L~B "

$t_{LC}$  [sec] : L~C "

$t_{LD}$  [sec] : L~D "

$t_{DE}$  [sec] : D~E "

$t_{DG}$  [sec] : D~G "

$t_{HG}$  [sec] : H~U~G "

$t_{GH}$  [sec] : G~H "

$t_{HI}$  [sec] : H~I "

$t_{IJ}$  [sec] : I~J "

$t_{IK}$  [sec] : I~K "

$t_{IL}$  [sec] : I~L "

$t_{IW}$  [sec] : I~W "

$t_{WL}$  [sec] : W~L "

$C_{CTI}$  [ppm] : コールドトラップ入口水素濃度

$C_{OBG}$  [ppm] : バックグラウンドナトリウム中水素濃度

$\Delta C_{SH}$  [ppm] : SHのリーク部の水素濃度増分

$\Delta C_{EV}$  [ppm] : EV "

$\Delta C_{DFSH}$  [ppm] : SHの伝熱管からの拡散水素による濃度増分

$\Delta C_{DFEV}$  [ppm] : EV "

$Q_N$  [kg/s] : ナトリウム流量

$Q_{OV}$  [kg/s] : オーバーフロー流量

$Q_{CT}$  [kg/s] : コールドトラップ流量

(6) 2次ナトリウム系の初期バックグラウンド濃度 ( $C_{OBG}$ )

SGおよび純化系を含む2次ナトリウム系の水素濃度変化  $dc/dt$  を1点近似モデルで表わすと、SGの伝熱管から拡散で出てくる水素量と純化系のコールドトラップにより除去される水素量との収支より次式が成り立つ。

$$\frac{dc}{dt} = \frac{S \cdot A}{W_N} - \eta \frac{Q_{CT}}{W_N} (C - C_{SCT}) \quad (2.5.1)$$

上式の解において  $t \rightarrow \infty$  としたものをバックグラウンド水素濃度とする。

$$C_{OBG} = \frac{S \cdot A}{\eta \cdot Q_{CT}} \times 10^6 + C_{SCT} \quad [\text{ppm}] \quad (2.5.2)$$

但し、コールドトラップ効率  $\eta$  は

$$\eta = \frac{C_{CTI} - C_{CTO}}{C_{CTI} - C_{SCT}} \quad [ - ] \quad (2.5.3)$$

コールドトラップ温度に対するコールドトラップ出口のナトリウム中飽和水素濃度  $C_{SCT}$  は Visser's らの式<sup>(6)</sup>を用いる。

$$\log_{10} C_{SCT} = 6.067 - \frac{2880}{(T_{CT} + 273.0)} \quad [\text{ppm}] \quad (2.5.4)$$

S	[Kg-H <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> hr]	: 伝熱管単位面積からの拡散水素量
A	[m <sup>2</sup> ]	: 伝熱管ナトリウム接液表面積
W <sub>N</sub>	[Kg]	: 系内ナトリウムインベントリ
Q <sub>CT</sub>	[Kg/hr]	: 純化系ナトリウム流量
C <sub>CTI</sub>	[ppm]	: コールドトラップ入口水素濃度
C <sub>CTO</sub>	[ppm]	: コールドトラップ出口水素濃度
T <sub>CT</sub>	[°C]	: コールドトラップ最低温度

2.3.3 カバーガス中水素濃度 ( $C_{CG}$ )

図2.5にリークSGのカバーガス中の水素濃度モデルを示す。

## (1) 通常運転開始時の場合 (カバーガス内水素濃度高状態)

## (a) リークSG

- (i)  $t \leq t_{RSB} + t_{MXB}$  (発生気泡がリーク点からナトリウム液面まで到達し、カバーガスと混合する迄)

$$C_{CG} = C_{OBGCG} \quad [vppm] \quad (2.55)$$

但し  $t_{RSB}$  [sec] : 発生気泡がリーク点からナトリウム液面まで到達する時間

$$t_{RSB} = \frac{L_{LLV}}{U_B - U_N} \quad [sec] \quad (2.56)$$

$L_{LLV}$  [m] : リーク点からナトリウム液面までの距離

$U_B$  [m/s] : 水素気泡のナトリウム中での上昇速度

$U_N$  [m/s] : リーク点からナトリウム液面間のナトリウム流速

$t_{MXB}$  [sec] : 水素気泡のカバーガスとの混合時間

$C_{OBGCG}$  [vppm] : カバーガスの初期バックグラウンド

- (ii)  $t > t_{RSB} + t_{MXB}$  (ナトリウム液面に上昇した気泡の水素がカバーガス中に完全に混合した後)

カバーガス中に混合した水素体積  $V_H$  は

$$V_H = \frac{2.24 \times 10^{-3}}{2.02} (1-\phi) \frac{2}{18} G \times (t - t_{RSB} - t_{MXB}) \quad (m^3) \quad (2.57)$$

$$C_{CG} = C_{OBGCG} + \frac{V_H}{V_{CGST}} \times 10^6 \times \phi_{CG} \quad [vppm] \quad (2.58)$$

但し  $\phi$  [-] : Na 中水素溶解割合

$V_{CGST}$  [ $m^3$ ] : 標準状態におけるカバーガス体積

$\phi_{CG}$  [-] : カバーガス中に混合した水素が NaH として胴内壁に吸着する効果を考慮した時のカバーガス中水素の実質混合割合

- (b) リークしていない SG

$$C_{CG} = C_{OBGCG} \quad [vppm] \quad (2.59)$$

- (2) 通常運転の場合 (カバーガス液面で気液平衡が保たれている状態)

バックグラウンド濃度にカバーガス中に混入した水素による濃度変化分およびバルクのナトリウムとカバーガスの気液間濃度不平衡による濃度変化分を加算したものである。

- (a) リーク SG

- (i)  $t \leq t_{RSB} + t_{MXB}$

$$C_{CG} = C_{OBGCG} \quad [vppm] \quad (2.60)$$

- (ii)  $t_{RSB} + t_{MXB} < t < t_{LNL} + t_{EQU}$

$$C_{CG} = C_{OBGCG} + \frac{V_H}{V_{CGST}} \times 10^6 \times \phi_{CG} \quad [vppm] \quad (2.61)$$

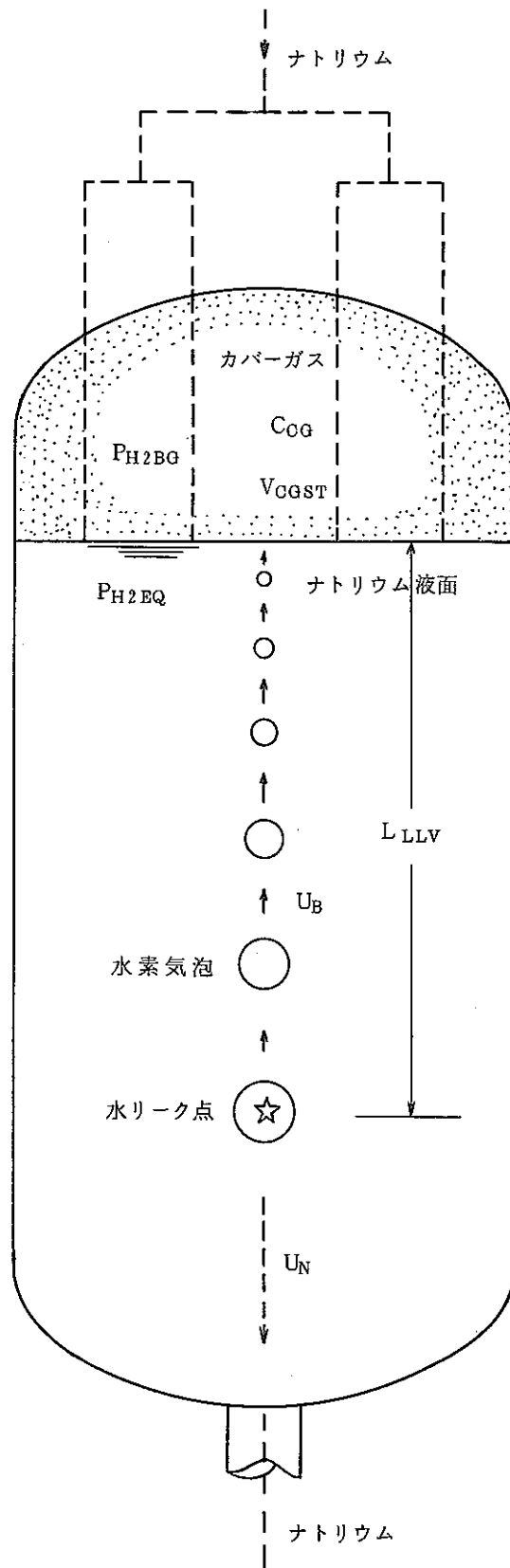


図 2.5 カバーガス水素濃度モデル (リーク SG)



但し  $t_{LNL}$  [sec] : リーク点の水素が2次系を通過してカバーガス液面のナトリウム側に輸送される時間

$t_{EQU}$  [sec] : 気液平衡到達への混合時間遅れ

(iii)  $t \geq t_{LNL} + t_{EQU}$

$$C_{CG} = C_{OBGCG} + \left( \frac{V_H}{V_{CGST}} + \frac{\Delta P_{H_2CG}}{760} \right) \times 10^6 \times \phi_{CG} \text{ [vppm]} \quad (2.62)$$

$$\Delta P_{H_2CG} = P_{H_2EQ} - P_{H_2BG} \quad [\text{Torr}] \quad (2.63)$$

但し  $\Delta P_{H_2CG}$  [Torr] : 気液平衡分圧  $P_{H_2EQ}$  とカバーガス中バックグラウンド分圧  $P_{H_2BG}$  との差

(b) リークしていないSG

(i)  $t < t_{LNL} + t_{EQU}$

$$C_{CG} = C_{OBGCG} \quad [\text{vppm}] \quad (2.64)$$

(ii)  $t \geq t_{LNL} + t_{EQU}$

$$C_{CG} = C_{OBGCG} + \frac{\Delta P_{H_2CG}}{760} \times 10^6 \times \phi_{CG} \quad [\text{vppm}] \quad (2.65)$$

(3) カバーガス中初期バックグラウンド濃度 ( $C_{OBGCG}$ )

(a) 通常運転開始時の場合

外部入力で与える。

(b) 通常運転の場合

ナトリウムバルクとの気液平衡状態にあることから、カバーガス中水素分圧  $P_{H_2BG}$  は

$$P_{H_2BG} = \left( \frac{C_{OBG}}{K} \right)^2 \quad [\text{vppm}] \quad (2.66)$$

従って、初期カバーガスバックグラウンド濃度  $C_{OBGCG}$  は

$$C_{OBGCG} = \frac{P_{H_2BG}}{760} \times 10^6 \quad [\text{vppm}] \quad (2.67)$$

但し、気液平衡式の係数  $K$  は Vissers らの式のものを用いる。

$$\log_{10} K = 0.86 - \frac{122}{(T_N + 273.0)} \quad \left[ \text{ppm/Torr}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.68)$$

$T_N$  [°C] : ナトリウム液面近傍温度

2.3.4 検出時間 ( $t_{DCT}$  ,  $t_{DCT}'$ )

2.2.3 に記したように検出時間は次式で表わされる。

$$t_{DCT} = t_{DT} + t_{TR} \quad (\text{ナトリウム中検出}) \quad [\text{sec}] \quad (2.69)$$

$$t_{DCT}' = t_{DT}' + t_{TR}' \quad (\text{ガス中検出}) \quad [\text{sec}] \quad (2.70)$$

(1) ナトリウム中検出の場合 ( $t_{DCT}$ )

- (a)  $t_{DT}$  はリーク検出器の真空側の水素濃度がバックグラウンド値の指定% (水リーク検知レベル) 以上になるまでの濃度上昇に必要な時間である。

検出器の濃度信号出力  $C_{DT}(t)$  は次式で与えられる。

$$C_{DT}(t) = F_C(t_1) + \frac{F_C(t) - F_C(t_1)}{t_T} \quad [\text{ppm}] \quad (2.71)$$

$$\text{但し } F_C(t) = \beta \times f_C(t) \quad [\text{ppm}]$$

$F_C(t)$  [ppm]: 検出器に輸送されてきた水素濃度

$t_1$  [sec]: 1ステップ前の計算時刻

$t_T$  [sec]: 1次遅れ曲線の時定数

$\beta$  [ - ]: 検出率

$f_C(t)$  [ppm]: リーク点の水素濃度変化

これが下記の条件式を満たすときに水リークを検知したものとする。

$$C_{DT}(t) \geq C_{OBG} + C_{OBG} \times \frac{k_{DT}}{100} \quad [\text{ppm}] \quad (2.72)$$

但し  $C_{OBG}$  [ppm]: ナトリウム中初期バックグラウンド値

$k_{DT}$  [%]: 検知レベル ( $C_{OBG}$  の指定%)

$t_{DT}$  は上式の判定式が満たされる時点までの経過時間であり、この時間は計算ステップを進めていく過程で決定される。

- (b)  $t_{TR}$  (リーク点から検出器までの水素輸送時間)

$$t_{TR} = t_{LDT} + t_{DTS} \quad [\text{sec}] \quad (2.73)$$

但し  $t_{LDT}$  [sec]: リーク点から検出系取出し部までの水素輸送時間

$t_{DTS}$  [sec]: 検出系の2次系配管取出点から検出器のNi膜面 (検出部) までの水素輸送時間

(2) ガス中検出 ( $t_{DCT}'$ ) の場合

- (a)  $t_{DT}'$  はナトリウム中検出と同様に検出器の真空側の水素濃度がバックグラウンド

値の指定%以上になるまでの濃度上昇に必要な時間である。

検出器の検出濃度および検知と判定する条件は各々 (2.70), (2.71) 式に従う。

(b)  $t_{TR'}$  はカバーガス部から検出器までの水素輸送時間であり外部入力により与えられる。

### 2.3.5 反応停止時間 ( $t_{STP}$ )

2.2.3で記したように反応停止時間に要するは次式となる。

$$t_{STP} = t_{DCT} + t_{OP} + t_{OP} \text{ (ナトリウム中検出)} \quad (\text{sec}) \quad (2.74)$$

$$= t_{DCT'} + t_{OP} + t_{OP} \text{ (ガス中検出)} \quad (\text{sec}) \quad (2.75)$$

## 2.4 計算コードの構成

図2.6に「SWAC-10-MJ/1」のフローチャートを示す。

初期値を設定したあと、水リーク量をパラメータにとり、発生水素量のナトリウム中への溶解量を算出して、ナトリウム中、カバーガス中の水素濃度のバックグラウンド値よりの増加分を計算する。次に時間を1ステップずつ進め、リークSGを有する系統の水素濃度上昇過程を、各リーク検出系取付け位置で、それぞれ算出し、各リーク検出器により検出可能となる時刻を計算する。以上の計算結果をもとに、「セーフティ・マップ」作図に必要なデータ処理を行ない、プロッターにて作図する。

以上の計算過程をメインプログラムと13個のサブプログラムにより実行する。これらのプログラム間のプログラム構成図を図2.7に示す。それぞれの役割を以下に記す。

MAIN	主なサブルーチンをコントロールするメインルーチン
INPUT	インプットデータの読み込みと、定数計算をする。
OUTPUT	インプットデータと定数をプリントアウトする。
WLEAK	水リーク量の関数となる、水素溶解割合、単位時間当りの水素濃度増分、伝熱管損耗量、許容損耗時間等を計算する。CALCH2ルーチンで求める値から検出系でのレコーダ指示値を計算してそれをDISK上に書出す。
CALCH2	ナトリウム中のミキシング位置、リーク位置、ナトリウム検出系取付け位置、およびカバーガス中での水素濃度変化を0秒からシュミレーション打切り時間ま

で計算してそれをDISKへ書出す。

CALOUT	リーク検出器応答特性図作成のために、各検出系での水素濃度最大値から100%目盛りの濃度を定義する。またセーフティマップ相当のデータをプリントアウトする。
GRAPH	①セーフティマップ ②リーク検出器応答特性図 ③リーク検出器指示値と応答勾配図の作成をする。③図勾配はSMINルーチンで指示値の近似式を求め、算出する。
WASTG	ウェステージ率を計算する。
SMIN	近似式を最小自乗法により求める。
GAMN	ナトリウム比重量を計算する。
PVISS	気液平衡式よりカバーガス中の水素分圧を求める。
CVISS	ナトリウム中飽和水素溶解度を計算する。
GAMH2	水素ガス比重量を計算する。
BLOCK	初期データを定義するBLOCK DATAルーチン。

尚、本プログラムの使用言語はFORTRAN-IVを用い、プログラムの大きさは、コアリジョンサイズ200KB、ステップ数約1500である。ソースリストは付録6.1に示す。

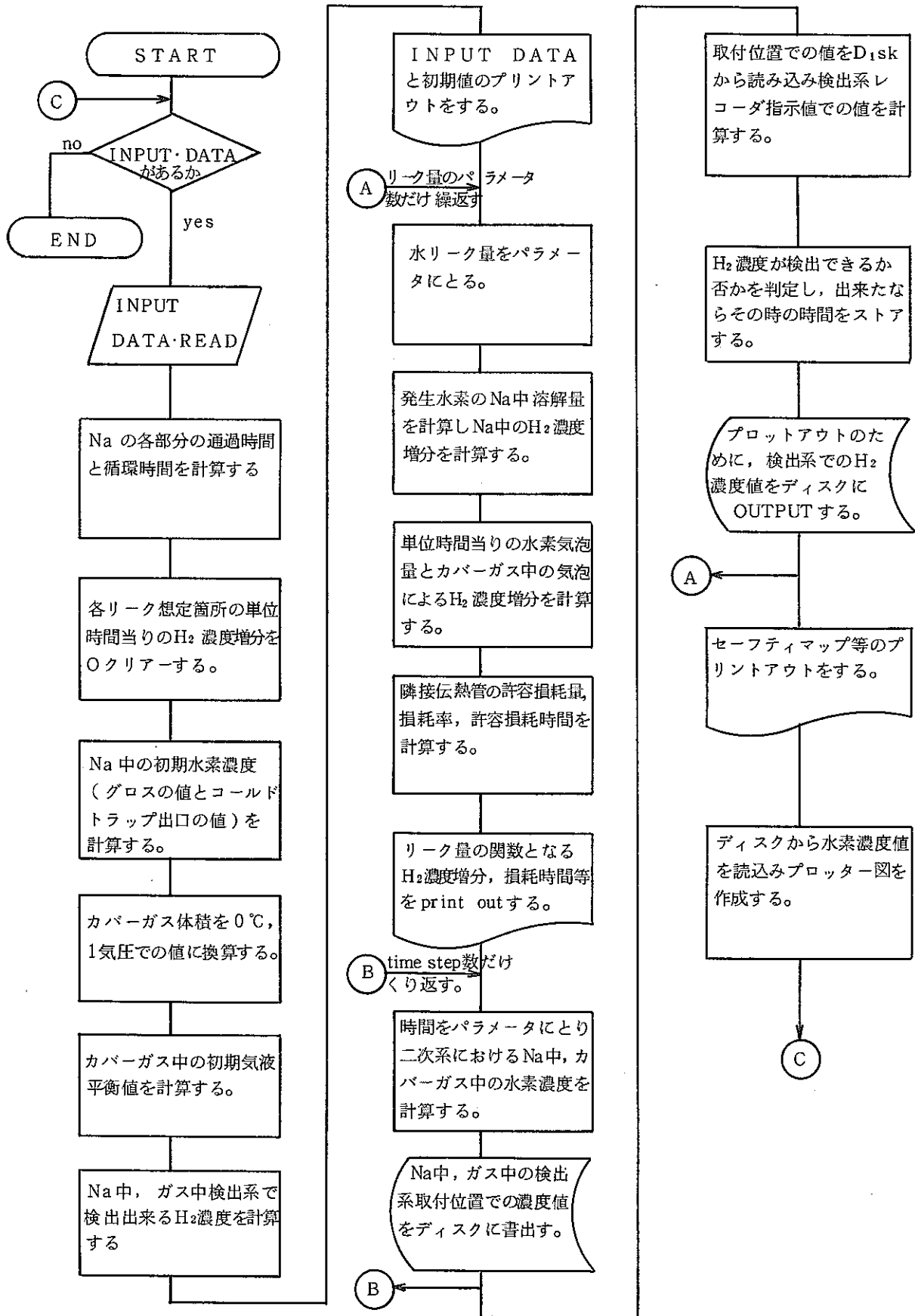


図 2.6 「SWAC-10MJ/1」のフローチャート

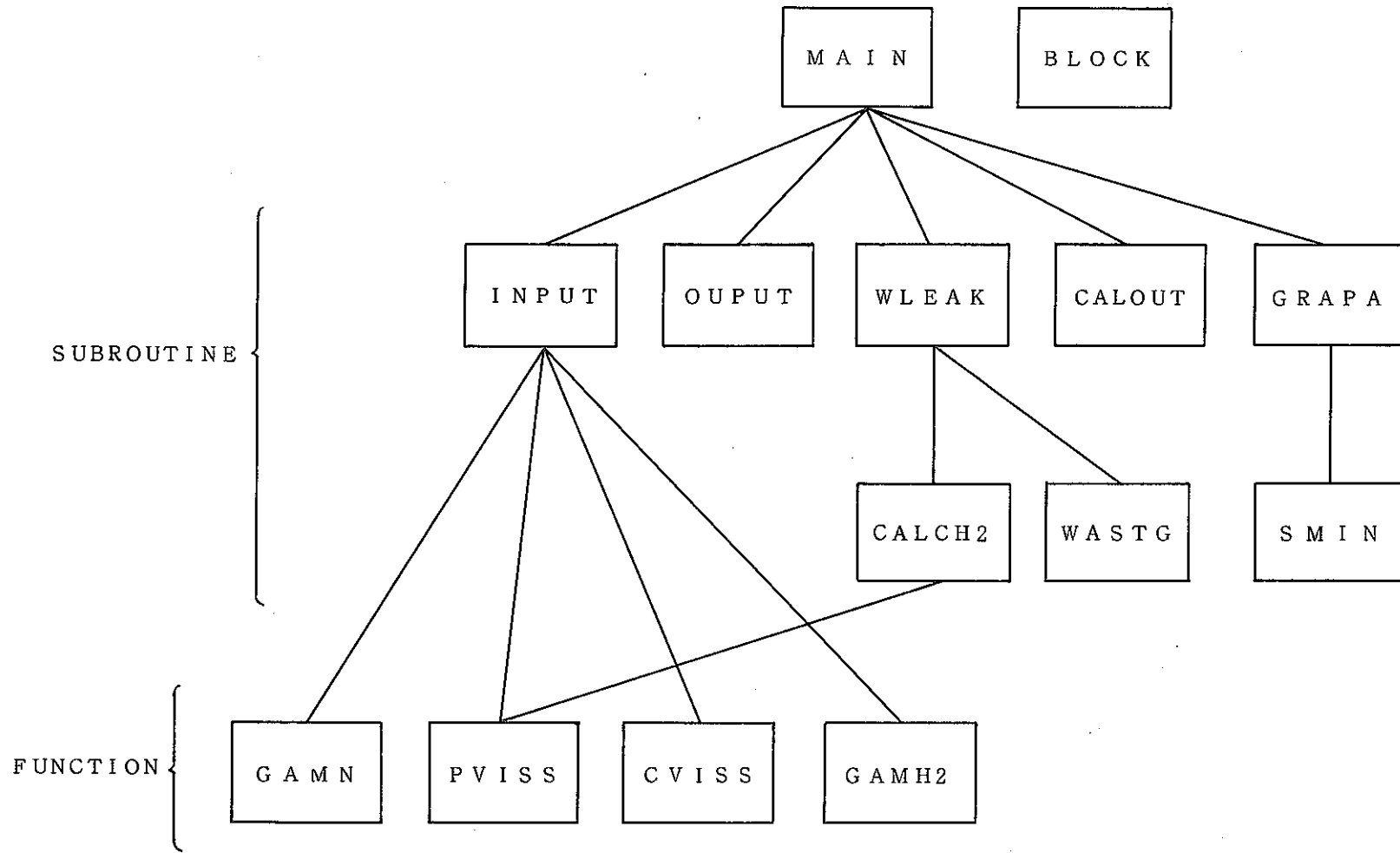


図 2.7 プログラム構成図

2.5 インプット形式

インプットは整数データ、タイトルデータ、実数データからなっている。

表 2.1 整数データ (1/3)

データ No.	整数データ FORMAT I 4			備 考
	データ カード No.	記 号	内 容	
1	1	I O P T A	計算モデル オプション もんじゅ=3	
2		L O C A	リーク位置の指定 SH伝熱部=1 EV伝熱部=3	
3	2	I P L T 1	セーフティ・マップを描くか? yes = 1 no = 0	
4		I P L T 2	リーク検出器応答性図を描くか? yes = 1 no = 0	
5		I P L T 3	= 0	本データは使用せず。
6	3	K A K S A N	水素拡散量データの与え方 = 1 (外部入力)	
7	4 *	J B	図 2.1 の計算体系の B 位置に Na 中検出系を 置くか? yes = 1 no = 0	
8		J E	" E 位置 "	
9		J G	" G 位置 "	
10		J J	" J 位置 "	
11		J O	" O 位置 "	
12		J P	" P 位置 "	

表 2.1 整数データ (2/3)

データ No	データ カードNo	記 号	内 容	備 考
13	4	J S H G - 1	図 2.1 の計算体系の S H のガス中検出系 1 を置くか? yes = 1 no = 0	
14		J S H G - 2	図 2.1 の計算体系の S H のガス中検出系 2 を置くか? yes = 1 no = 0	
15		J E V G - 1	図 2.1 の計算体系の E V のガス中検出系 1 を置くか? yes = 1 no = 0	
16		J E V G - 2	図 2.1 の計算体系の E V のガス中検出系 2 を置くか? yes = 1 no = 0	
17		J S U G	= 0	本データは使用せず
18		J Q	= 0	"
19		J T	= 0	"
20		J R H G	= 0	"
21		J C T	= 0	"
22		5	I P R I N T	各検出位置での濃度変化をプリントアウトするか? yes = 1 no = 0
23	L E A K N O		プリントアウトしたいリーク率に対応する I D A L 番号の指定 ( I P R I N T = 1 のときのみ有効)	I D A L 番号は B L O C K D A T A の D A L R のデータ番号である。
24	I P U T		濃度変化のプリントアウトの間隔を何秒ごとにするか? ( I P R I N T = 1 のときのみ有効)	

注) \*検出位置の指定箇所は最大 6 とする。



表 2.1 整数データ (3 / 3)

データ No	データ カードNo	記 号	内 容	備 考
25	6	I P A I	水素のナトリウム中への溶解割合 外部入力で与える = 1 計算式から求める = 0	
26		J S L F	セルフウェステージによるリーク孔拡大 考慮する = 1 考慮しない = 0	
27		I T A L O W	許容損耗肉厚データの与え方 = 1 (外部入力)	
28		I C B G	カバーガス中の初期バックグラウンド水素濃度 外部入力で与える = 1 計算式から求める = 0	初期ならし運転時は外部入力 で与える。通常時は計算 式から求める。

表 2.2 タイトルデータ

データ No	タ イ ト ル デ ー タ			FORMAT	備 考
	データ カードNo	記 号	内 容	A 4	
1	7	T I T L E (1 ~ 4)	ケ ー ス 番 号		4 A 4
2		T I T L E (5 ~ 16)	ケ ー ス タ イ ト ル		1 2 A 4

表 2.3 実数データ (1 / 8)

データ No	実 数 デ ー タ			FORMAT	備 考
	データ カードNo	記 号	内 容	E 1 2. 0	
1	8	F S H	Na流量 (ton/hr)		
2		F R H	= 0		本データは使用せず。
3		F C T	コールドトラップ流量 (ton/hr)		
4		F O V E R	EVオーバーフロー流量 (ton/hr)		
5		F S U R G E	= 0		本データは使用せず。
6	9	A T F	計算時間 (最大値 = 2000) (秒)		

表 2.3 実数データ (2 / 8)

データ No.	データ カードNo.	記 号	内 容	備 考
7	10	S T N A	N a 中検出器感度 (アラーム設定) (%)	対バックグラウンドレベル
8		S T G A S	ガス中検出器感度 (アラーム設定) (%)	"
9	11	E T A C T	コールドトラップ純化効率 (-)	
10		T C T	コールドトラップ運転温度 (°C)	
11	12	T H O T	N a ホットレグ温度 (°C)	
12		T C O L D	N a コールドレグ温度 (°C)	
13		T M I D L	N a ミドルレグ温度 (°C)	
14	13	D D O (1)	= 0 (任意の値)	本データは使用せず
15		D D O (2)	= 0 ( " )	"
16		D D O (3)	= 0 ( " )	"
17		S I G M A (1)	= 0 ( " )	"
18		S I G M A (2)	= 0 ( " )	"
19		S I G M A (3)	= 0 ( " )	"
20	14	P W (1)	= 0 ( " )	"
21		P W (2)	= 0 ( " )	"
22		P W (3)	= 0 ( " )	"
23		S T (1)	= 0 ( " )	"
24		S T (2)	= 0 ( " )	"
25		S T (3)	= 0 ( " )	"
26	15	S T A (1)	= 0 ( " )	本データは使用せず
27		S T A (2)	= 0 ( " )	
28		S T A (3)	= 0 ( " )	

表 2.3 実数データ

(3/8)

データ No	データ カードNo	記 号	内 容	備 考
29	16	A (1)	SHの伝熱面積 $(m^2)$	
30		A (2)	= 0	本データは使用せず。
31		A (3)	EVの伝熱面積 $(m^2)$	
32		SSE2 (1)	SHの伝熱管単位面積当りの水素拡散量 ( $\varphi - H_2 / cm^2 \cdot S$ )	
33		SSE2 (2)	= 0	本データは使用せず。
34		SSE2 (3)	EVの伝熱管単位面積当りの水素拡散量 ( $\varphi - H_2 / cm^2 \cdot S$ )	
35	17	SSK1 (1)	= 0 (任意の値)	本データは使用せず。
36		SSK1 (2)	= 0 ( " )	"
37		SSK1 (3)	= 0 ( " )	"
38		SSK2 (1)	= 0	"
39		SSK2 (2)	= 0	"
40		SSK2 (3)	= 0	"
41	18	ACRS (1)	SHコイル部Na側流路断面積 $(m^2)$	
42		ACRS (2)	= 0	本データは使用せず。
43		ACRS (3)	EVコイル部Na側流路断面積 $(m^2)$	
44		DEEP (1)	水リーク点位置のNa分配孔からの深さ (SHで水リーク発生時) $(m)$	
45		DEEP (2)	= 0	本データは使用せず。
46		DEEP (3)	水リーク点位置のNa分配孔からの深さ (EVで水リーク発生時) $(m)$	
47	19	TAUI (1)	SHの伝熱管の許容損耗肉厚 $(mm)$	
48		TAUI (2)	= 0	本データは使用せず。

表 2.3 実数データ (4/8)

データ No	データ カードNo	記 号	内 容	備 考
49		T A U I (3)	EVの伝熱管の許容損耗肉厚 (mm)	
50	20	P G (1)	SHのカバーガス圧力 (ata)	
51		P G (2)	= 0	本データは使用せず。
52		P G (3)	EVのカバーガス圧力 (ata)	
53		T G (1)	SHのカバーガス温度 (°C)	
54		T G (2)	= 0	本データは使用せず。
55		T G (3)	EVのカバーガス温度 (°C)	
56	21	V G (1)	SHのカバーガス体積 (m <sup>3</sup> )	
57		V G (2)	= 0	本データは使用せず。
58		V G (3)	EVのカバーガス体積 (m <sup>3</sup> )	
59	22	C O G (1)	SHのカバーガス中初期水素濃度 (VPPm) (ICBG = 1 のときのみ有効)	
60		C O G (2)	= 0	本データは使用せず。
61		C O G (3)	EVのカバーガス中初期水素濃度 (VPPm) (ICBG = 1 のときのみ有効)	
62		C O G (4)	= 0	本データは使用せず。
63	23	T S H U T (1)	SHのシャ断時間 (sec) (オペレータの判断時間も含む)	
64		T S H U T (2)	= 0	本データは使用せず。
65		T S H U T (3)	EVのシャ断時間 (sec) (オペレータの判断時間も含む)	
66	24	T B U B (1)	SHのカバーガス部水素気泡の混合時間遅れ (SHで水リーク発生時) (sec)	
67		T B U B (2)	= 0	本データは使用せず。

表 2.3 実数データ (5/8)

データ No.	データカードNo.	記号	内容	備考
68		T B U B (3)	EVのカバーガス部水素気泡の混合時間遅れ (EVで水リーク発生時) (sec)	
69	25	T E Q U (1)	SHのカバーガス部気液平衡到達への混合時間遅れ (sec)	
70		T E Q U (2)	= 0	本データは使用せず。
71		T E Q U (3)	EVのカバーガス部気液平衡到達への混合時間遅れ (sec)	
72		T E Q U (4)	= 0	本データは使用せず。
73	26	T A R (1)	SHカバーガス検出系内の水素輸送時間 (sec)	
74		T A R (2)	= 0	本データは使用せず。
75		T A R (3)	EVカバーガス検出系内の水素輸送時間 (sec)	
76		T A R (4)	= 0	本データは使用せず。
77		T A R (5)	= 0	"
78		T A R (6)	= 0	"
79	27	T S T A Y (1)	図2.1の計算体系のB位置のNa中検出系内の水素輸送時間 (sec)	Ni膜拡散計算時のむだ遅れ時間を含める。
80		T S T A Y (2)	" E位置 " (sec)	"
81		T S T A Y (3)	" G位置 " (sec)	"
82		T S T A Y (4)	" J位置 " (sec)	"
83		T S T A Y (5)	" O位置 " (sec)	"
84		T S T A Y (6)	" P位置 " (sec)	"

表 2.3 実数データ

(6/8)

データ No.	データ カードNo.	記 号	内 容	備 考
85	28	T S T A Y (7)	= 0	本データは使用せず。
86		T S T A Y (8)	= 0	"
87		T S T A Y (9)	= 0	"
88	29	T A L M	Na 中検出器のNi 膜センサーの1次遅れ応答 の時定数 (sec)	
89		T G A L M	ガス中検出器のNi 膜センサーの1次遅れ応答 の時定数 (sec)	
90	30	B E T A	Na 中検出系の検出率 ( - )	1.00
91		B E T A G	ガス中検出系の検出率 ( - )	1.00
92		A L F A	= 0	本データは使用せず。
93	31	D L G T H	リーク点からターゲット管間の距離 (mm)	
94		U B U B	水素気泡の上昇速度 (m/s)	
95		P H A I	水素のNa 中溶解割合 ( - ) (IPAI = 1のときのみ有効)	
96		C E L G	セルフウェステージにより自己拡大したリーク 孔からの増大リーク率の倍率 ( - ) (JS LF = 1のときのみ有効)	
97		G N W G	L/D = 150となる時のリーク率 (ウェステージ率が零となるリーク率) (g/s)	L = DLGTH (mm) D = リーク孔径 (mm)
98		C G P H I	カバーガス中に混入した水素の実質溶解割合 ( - )	
99	32	V 1	図2.1の計算体系のSHへの配管部 区分(A-B)のNaインベントリー (m <sup>3</sup> )	
100		V 2	" SH " " (B-C) "	

表 2.3 実数データ

(7/8)

データ No.	データ カードNo.	記 号	内 容	備 考
101	32	V 4	図 2.1 の計算体系の SH への配管部 区分 (D'-E) の Na インベントリ ( $m^2$ )	
102		V 5	" SH からの配管部 " (E-F)	
103		V 6	" EV への配管部 " (F-G)	
104		V 7	" EV " (G-H)	
105	33	V 9	" EV " (I'-J)	
106		V 1 0	" コールドレグ配管部 " (J-K)	
107		V 1 1	" " (K-L)	
108		V 1 2	" ポンプ " (L-K)	
109		V 1 3	" コールドレグ配管部 " (M-N)	
110		V 1 4	" " (N-O)	
111	34	V 1 5 - 1	" IHX コールドレグ配管 " (O-O')	
112		V 1 5 - 2	" IHX 本体 " (O'-P')	
113		V 1 5 - 3	" IHX ホットレグ配管部 " (P'-P)	
114		V 1 6	" ホットレグ配管部 " (P-A)	
115		V 2 1	= 0	本データは使用せず。

表 2.3 実数データ

(8 / 8)

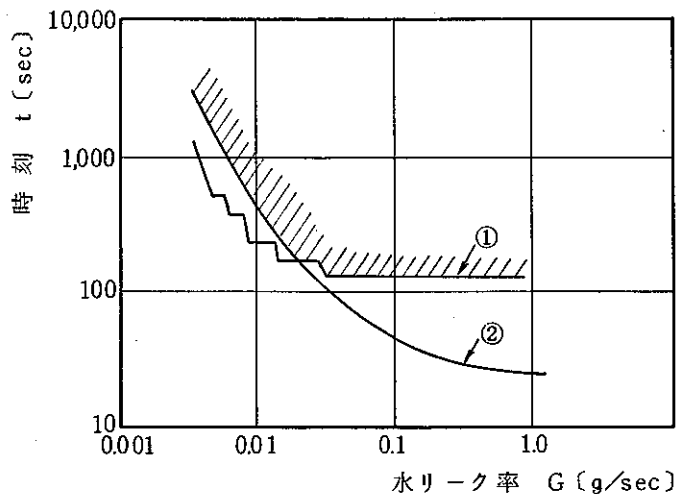
データ No.	データ カートNo.	記 号	内 容	備 考
116	34	V 2 2	= 0	本データは使用せず。
117	35	V 2 4	= 0	"
118		V 2 5	= 0	"
119		V 3 1	図2.1の計算体系のEVオーバーフロー配管 区分(H-U)のNaインベントリ ( $m^3$ )	
120		V 3 2	= 0	本データは使用せず。
121		V 3 3	図2.1の計算体系のEVくみあげ系配管 区分(V-G)のNaインベントリ ( $m^3$ )	
122		V 4 1	図2.1の純化系のコールドトラップ入口側配 管部 区分(K-W)のNaインベントリ ( $m^3$ )	
123		36	V 4 2	" " 出口側配 管部 区分(W-L) "
124	V 5 1		= 0	本データは使用せず。
125	V 5 2		= 0	"
126	H C (1)		図2.1のSHにおけるNa分配孔からヘリカル コイル下端までの深さ区分(C-D') ( $m$ )	
127	H C (2)		= 0	本データは使用せず
128	H C (3)		図2.1のEVにおけるNa分配孔からヘリカル コイル下端までの深さ 区分(H-1') ( $m$ )	
129 } 134	37		DALR(1) } DALR(6)	計算する水リーク率 ( $g/s$ ) ≠ 0
135 } 140		38	DALR(7) } DALR(12)	" ≠ 0
141 } 146	39		DALR(13) } DALR(18)	" ≠ 0
147 } 152		40	DALR(19) } DALR(24)	" ≠ 0
153	41		DALR(25)	" ≠ 0



## 2.6 アウトプット

プロッターによる作図は以下の通りである。

### (1) セーフティマップの作成

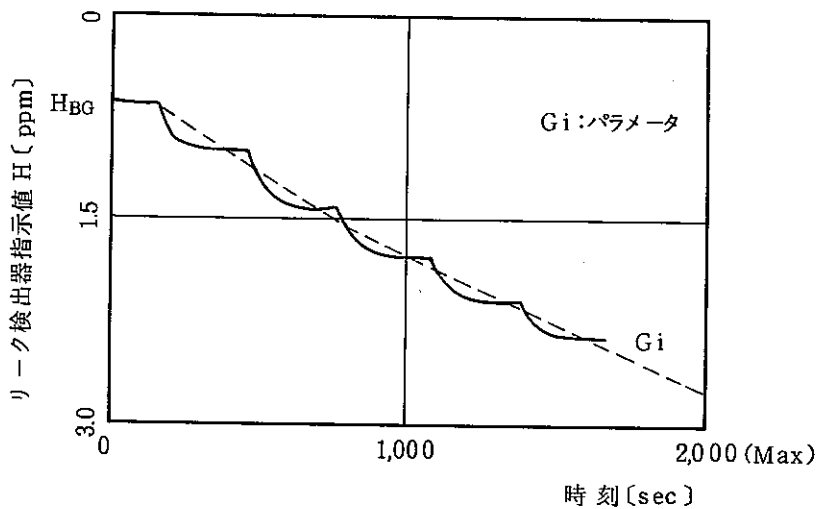


① 反応停止時間

② 許容損耗時間

斜線部分は、ウェスージにより隣接伝熱管が破損する領域を示し、この限界線②以下に①の小リーク検出系による反応停止曲線がある場合には、2次破損へのリーク事故の拡大伝播を未然に防止することが可能である。

### (2) リーク検出器応答特性図作成



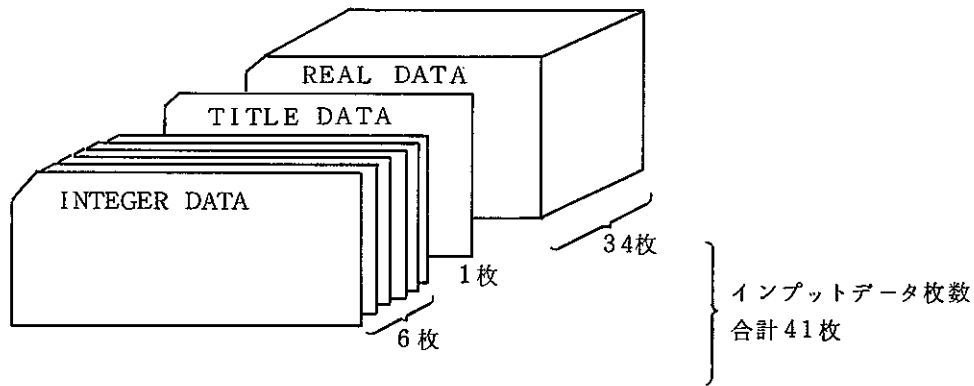
HBG: バックグラウンド水素濃度

Gi: 水リーク率

## 2.7 データ作成要領

本計算コードではケースごとに変更されるデータとあまり変更されないことがないデータと、2種に区別している。前者はデータカードから読み込むことにより定義し、後者はコード中で、BLOCK DATAとして定義している。

### (1) インプットデータカードの配列



### (2) BLOCK DATAで定義するデータ

リーク検出器応答特性図のプロッターグラフの100%の目盛り [PPM] ……

Na 中 Ni センサー検出器 DFUL 2 (5)

ガス中 Ni センサー " DFUL 3 (5)

DFUL 2 / 0.2, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 /

DFUL 3 / 100, 250, 500, 2500, 1000 /

プロットするリーク量の番号の指定 …… NGP (5)

NGP / 5, 11, 15, 20, 23 /

### 3. テスト計算

#### 3.1 テスト計算の概要

本テスト計算の系統区分図（計算体系図）を図 3.1 に示し、各区分のナトリウムインベントリーを表 3.1 に示す。

リーク検出計は Na 中検出計の過熱器（SH）および EV の出口配管の E 点、および J 点に、ガス中検出計が各 SG のカバーガスに各々 1 系統づつ設置されているものとする。

本テスト計算では検出性能に焦点をあて、SG 停止時間（オペレータ判定、操作時間およびブローダウン時間の和）を考慮しない場合のセーフティ・マップ例を示す。

以下に計算条件、計算結果、所要計算時間について述べる。

表 3.1 2 次ナトリウム系のインベントリー 単位 (m<sup>3</sup>)

記号	内 容	数 値
V <sub>1</sub>	系統区分 A ~ B	1 8.8 5
V <sub>2</sub>	B ~ C	5.3 7
V <sub>4</sub>	D' ~ E	9.4 1
V <sub>5</sub>	E ~ F	6.2 7
V <sub>6</sub>	F ~ G	6.2 7
V <sub>7</sub>	G ~ H	6.7 0
V <sub>9</sub>	I' ~ J	9.1 1
V <sub>10</sub>	J ~ K	7.7 9
V <sub>11</sub>	K ~ L	0.5 5
V <sub>12</sub>	L ~ M	1.3 7
V <sub>13</sub>	M ~ N	5 2.7 6
V <sub>14</sub>	N ~ O	5 2.7 6
V <sub>15-1</sub>	O ~ O'	5 2.7 6
V <sub>15-2</sub>	O' ~ P'	2 2.0
V <sub>15-3</sub>	P' ~ P	1 8.8 5
V <sub>16</sub>	P ~ A	1 8.8 5
V <sub>31</sub>	H ~ U	3 0.0
V <sub>33</sub>	V ~ G	1 0.0
V <sub>41</sub>	K ~ W	0.1 7
V <sub>42</sub>	W ~ L	0.1 7

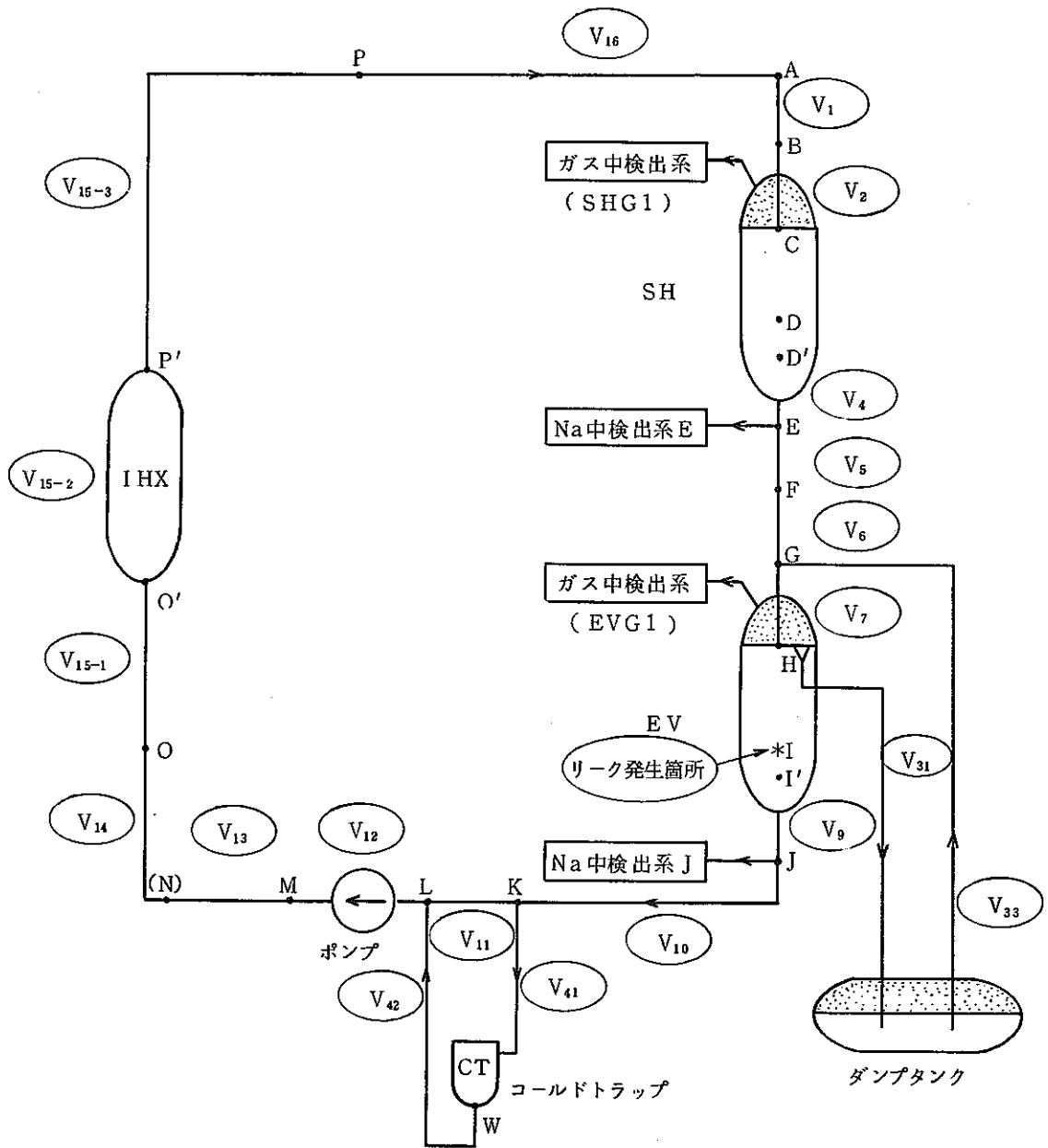


図 3.1 系統区分図 ( 計算体系 )

## 3.2 計算条件

本テスト計算での主な計算条件を以下に記す。

## (1) 運転条件

初期ならし運転状態とし、カバーガス内の水素濃度は高レベルとする。

Na ホットレグ温度	(505, °C)
Na コールドレグ温度	(325, °C)
Na ミドルレグ温度	(469.3 °C)
カバーガス温度 (SH)	(505 °C)
"          (EV)	(469.3 °C)
カバーガス圧力 (SH)	(1.936 ata)
"          (EV)	(2.368 ata)
Na 流量	(3730 ton/hr)
EV オーバフロー流量	(10 ton/hr)

## (2) リーク位置

EV コイル 部下部	(6.8 m)
(Na 分配孔から水リーク点までの深さ)	

## (3) 形状

カバーガス体積 (SH)	(29. m <sup>3</sup> )
"          (EV)	(26. m <sup>3</sup> )
コイル部 Na 側流路断面積 (SH)	(2.426 m <sup>3</sup> )
"          (EV)	(2.207 m <sup>3</sup> )

## (4) 許容損耗時間

リーク孔からターゲット管外面距離	(14.6 mm)
セルフウェステージによる増加リーク率の倍率	(4. -)
伝熱管の許容損耗肉厚 (EV)	(2.06 mm)
L/D が 150 に相当する水リーク率	(0.25 $\varnothing$ / s)

## (5) 初期ナトリウムバックグラウンド水素濃度

伝熱面積 (SH)	(580. m <sup>2</sup> )
"          (EV)	(1100. m <sup>2</sup> )
伝熱管単位面積当りの水素拡散量 (SH)	(0.0 $\varnothing$ - H <sub>2</sub> / cm <sup>2</sup> S)

伝熱管単位面積当りの水素拡散量 (EV)	( $2.0 \times 10^{-11}$ g/H <sub>2</sub> /cm <sup>2</sup> S)
コールドトラップ流量	(10 ton/hr)
コールドトラップ純化効率	(0.7 - )
コールドトラップ運転温度	(120. °C )
(6) ナトリウム中への水素溶解割合	(0.75 - )
(7) 検出器感度 (アラーム設定値)	
ナトリウム中検出器	(10 %)
カバーガス中検出器	(10 %)
初期カバーガスバックグラウンド水素濃度	(100 Vppm)
(8) 水素気泡の上昇速度 (一定)	(1 m/s)
(9) カバーガス中への水素混合遅れ時間	(10 sec)
上昇気泡との混合時間 (SH, EV)	(10 sec)
気液平衡到達への混合時間 (SH, EV)	(1 m/s)
(10) カバーガス中に混入した水素の実質溶解割合	(0.5 - )
(11) 検出系内の水素輸送時間	
ナトリウム中検出系 (E, J点)	(60 sec)
カバーガス中検出系 (SH, EV)	(40 sec)
(12) Ni膜拡散計算のむだ遅れ時間	(15 sec)
(13) 検出器応答の時定数 (Ni膜センサー)	
ナトリウム中検出器	(25 sec)
カバーガス中検出器	(25 sec)
(14) 検出系の検出率	
ナトリウム中検出器	(100 %)
カバーガス中検出器	(100 %)
(15) SG停止時間	(本テスト計算では考慮しない。)

### 3.3 計算結果

図 3.2 に SG 停止所用時間を考えない場合の計算結果をセーフティ・マップで示す。  
 約 0.25 g/s のリーク率を境に許容損耗時間曲線の傾向が異なっているのは、このリーク率以下の範囲ではセルフウェステージによるリーク孔拡大が生じるために、拡大後のリーク率のターゲットウェステージ率の方が初期リーク率のものよりも大きくなったためである。

本セーフティ・マップから、リークジェットを受ける隣接伝熱管が破損される前に検出できる最大リーク率は次のとおりである。

Na 中検出系	EV 出口設置	1.5 g/s
	SH "	0.4 g/s
ガス中検出系	EV カバーガス設置	1.5 g/s
	SH "	0.5 g/s

上記リーク率よりも大きい範囲では隣接伝熱管の破損が発生する。

図 3.3 に E 点の Na 中検出器の水素濃度変化を示す。

### 3.4 所要計算時間

計算ステップ数 2000 の計算を行なうに要した時間は FACOM 230 で CPU 3分31秒であった。

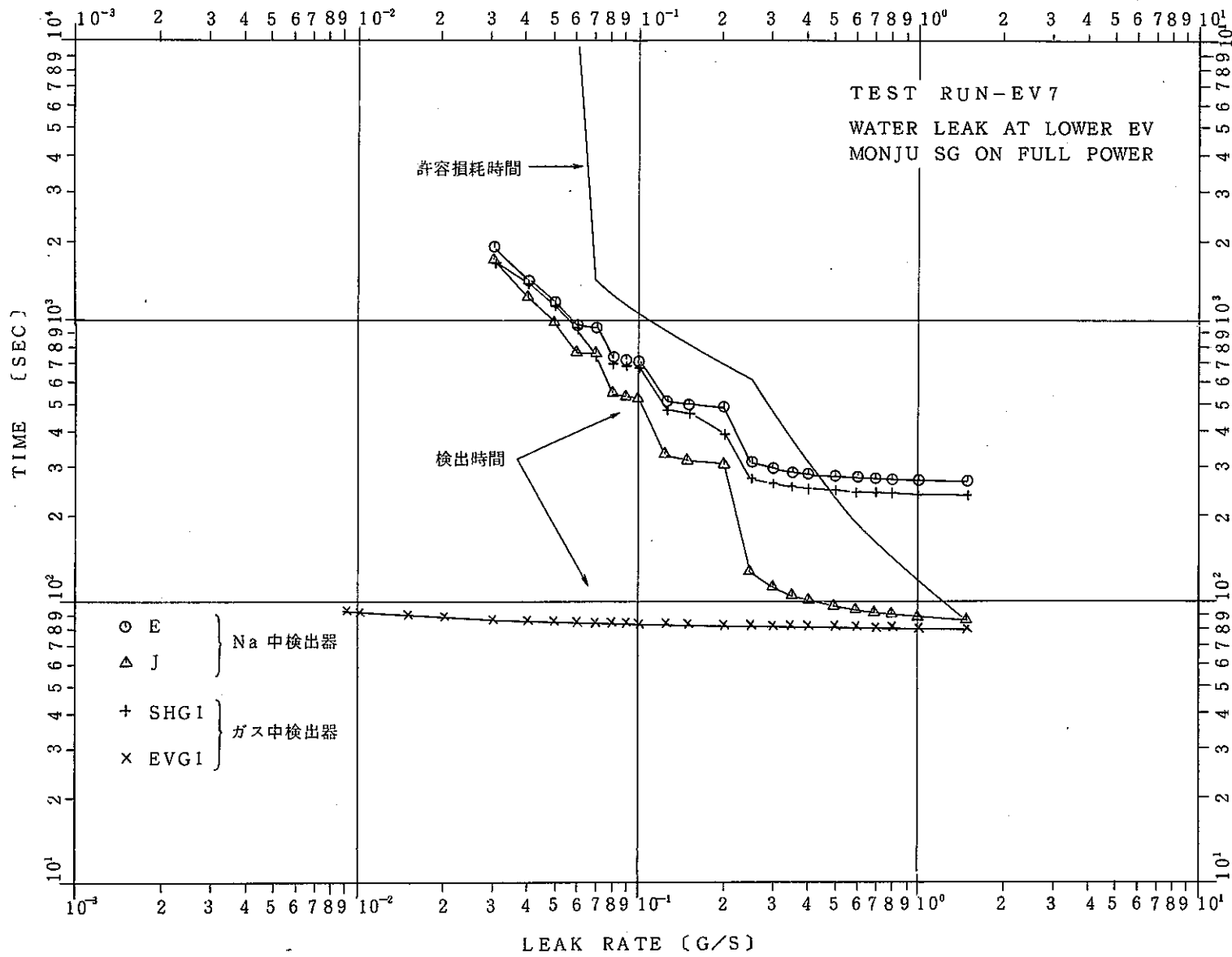


図 3.2 セーフティ・マップ



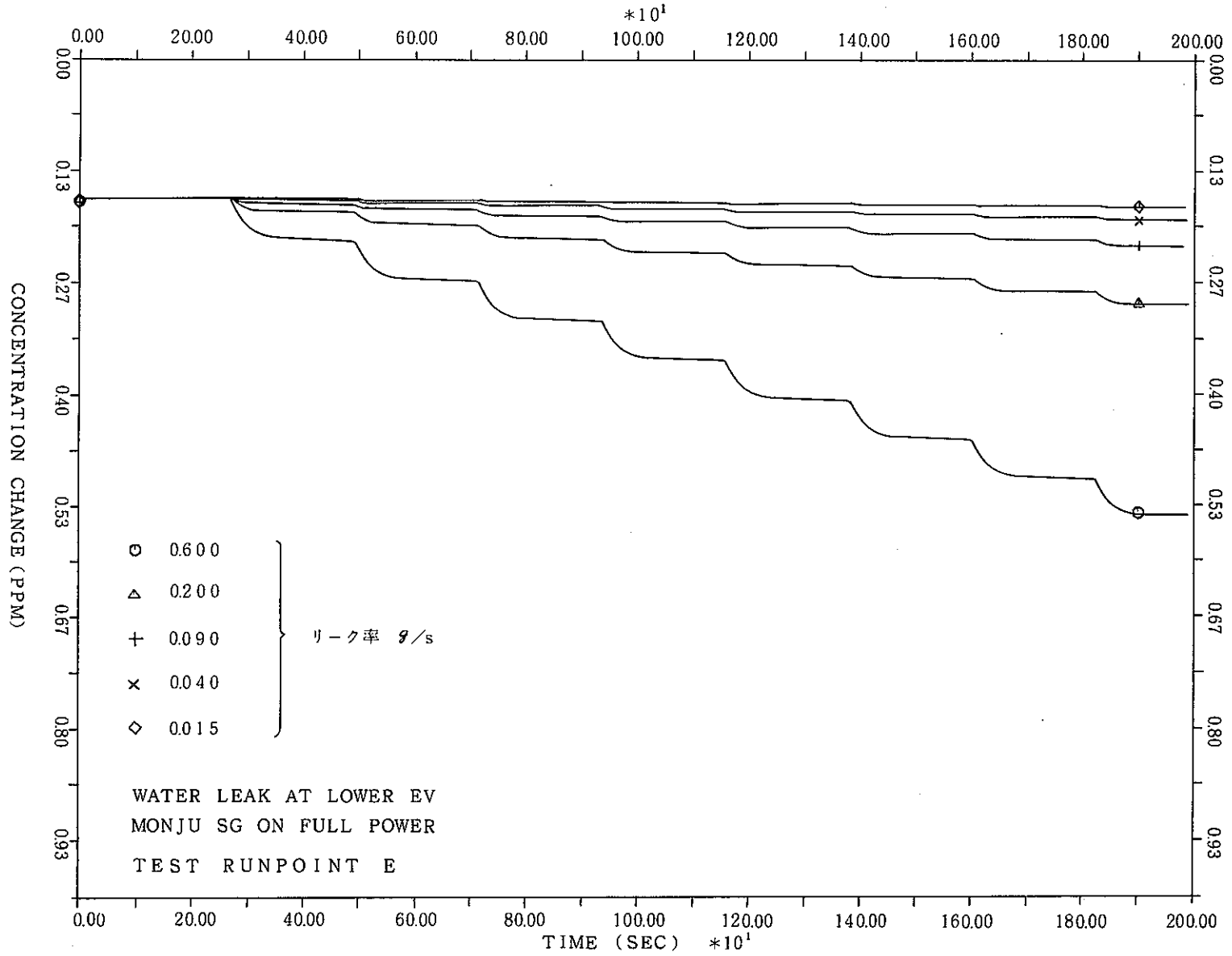


図 3.3 Na 中検出器の真空部の水素濃度変化 (E 点)

#### 4. あ と が き

50MWSGTF用に開発された蒸気発生器内小リーク事故解析コード「SWAC-10」を原型炉「もんじゅ」設計用に改造した。

今後、本計算モデルの実験検証を行なうために、既に実施されている50MWSGTFおよびSWAT-2での試験データと計算結果との比較検討が必要である。

また、カバーガス中水素検出に関連するカバーガス空間での水素の挙動、ガス中検出器特性を明らかにする実験も必要であろう。

終りにあたり、SWAC-10-MJ/1の原形であるSWAC-10コードは50MWSGTEの玉山清志氏らの担当により開発されたものであることを附記し、今回のコード改訂にあたり、SWAC-10コードに関する情報をこころ良く提供していただいたことに深く感謝の意を表します。

## 5. 参 考 文 献

(1) SJ206 77-29

蒸気発生器内小リーク事故解析コード「SWAC-10」の作成 三菱原子力工業株式会社  
1974年 (C-3592)

(2) J. A. Ford et al.

"Criteria for detection of small sodium water reactions in LMFBR SG"  
APDA 255 June 1970

(3) 鎌ヶ江, 橋口, 池本, 大内, 井上, 堀

"小リーク・ナトリウム水反応試験研究 第7報" (SN941 76-27) 1967年3月

(4) D. A. Greene

"Sodium-Water Wastage and Reactions Program Performed by general Electric  
in Support of the U.S.AEC LMFBR Steam Generator Development"  
IAEA Bensberg Meeting Report (1974)

(5) 日本機械学会Na-加熱蒸気発生器調査研究分科会

「高速増殖炉蒸気発生器の安全性, 信頼性向上に関する調査研究」  
SJ254 75-02 (1975)

(6) D. R. Vissers et. al

"A Hydrogen-Activity Meter for Liquid Sodium and its Application to Hydrogen  
Solubility Measurements" Nucl Technol. Vol 21 P235 March 1974

(7) 鎌ヶ江, 大後, 池本, 井上, 堀

"小リーク・ナトリウム水反応試験研究 第11報" (SN941 77-189) 1977年11月

6. 付 録

付表-1 インプットデータリスト (1/2) Shindo 1 / 2

3	3																	
1	0	0																
1																		
0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0			
0	0	0																
1	1	1	0															

TEST RUN-EV7	WATER LEAK AT LŌWER	EV	MŌNJU	SG ŌN	FULL PŌWER
3730.0	0.0	10.0	10.0	0.0	
2000.0					
10.0	10.0				
0.7	120.0				
505.0	325.0	469.3			
25.4	0.0	25.4	11.0	0.0	18.0
142.5	0.0	153.0	3.2	0.0	3.2
0.5	0.0	0.65			
580.0	0.0	1100.0	0.0	0.0	2.0
1.0 -12	0.0	2.0 -11	0.0	0.0	0.0
2.426	0.0	2.207	0.0	0.0	6.8
2.06	0.0	2.06			
1.936	0.0	2.368	505.0	0.0	469.3

-47-

-11

29.0	0.0	26.0			
100.0	0.0	100.0	0.0		
0.0	0.0	0.0			
10.0	0.0	10.0			
10.0	0.0	10.0	0.0		
55.0	0.0	55.0	0.0		
75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0
75.0	75.0	75.0			
25.0	25.0				
1.0	1.0	0.0			
14.6	1.0	0.75	4.0	0.25	0.5
18.85	5.37	9.42	6.273	6.273	6.70
9.11	7.79	0.55	1.37	5.276	5.276
5.276	2.20	18.85	18.85	0.0	0.0
0.0	0.0	3.00	0.0	1.00	0.17
0.17	0.0	0.0	5.0	0.0	7.0
1.5	1.0	0.8	0.7	0.6	0.5
0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.125
0.15	0.1	0.09	0.08	0.07	0.06
0.05	0.04	0.03	0.02	0.0015	0.01
0.009					