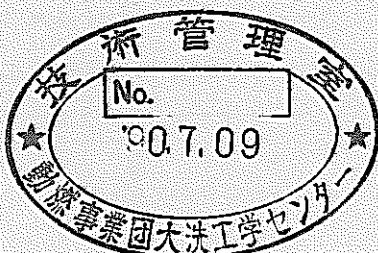


ナトリウム-水反応解析コードSWACSの改良と検証



1989年5月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 89-087
<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>	
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
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

ナトリウム-水反応解析コードSWACSの改良と検証

浜田広次・鈴木道博** 姫野嘉昭*

要　旨

蒸気発生器(SG)における大リーク・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は、有液面型である原型炉SGを対象に開発が行われてきた。このコードに大型炉SG体系での解析機能を持たせ、また評価精度の向上を図る事を目的として、同コードの改良が現在進められている。

大型炉SGの一つのオプションとしては無液面型SGの採用が考えられる。この場合には、有液面型SGに比べ相対的に厳しくなると予想される初期スパイク圧・圧力波伝播の評価が安全設計上で重要となる。そこで本報告書では、SWACSの構成要素の一つである初期スパイク圧・圧力波伝播計算モジュールを対象に、無液面型SG向けのコード改修と試験データによる検証を行った結果を記述する。

主な改造は、接液型ラップチャディスク(RD)解析機能の追加と気液界面移動モデル(BTM)の採用である。前者ではシングル及びダブルのRDについて、有限要素法解析によるディスクの変形や流体とディスクの相互作用下での伝播圧力波形を解析可能とした。後者では、反応部や圧力開放系へBTMを採用する事で、従来の解析モデル上の制約を排除し物理現象の詳細シミュレーションや長時間計算を可能とした。検証は、米国のLLTR試験^(6,7)やPEPT試験^(8,9)のデータで行い、シングル及びダブルのRD破裂時刻やそこでの圧力波形、更に無液面体系内を伝播する圧力波形について、試験と解析との良い一致を得た。

今回の改造により、無液面型SG体系における初期スパイク圧・圧力波伝播の正確な計算が可能となり、SWACSは大型炉(無液面型)SG用の安全設計解析コードとしても十分適応可能であることの見通しが得られた。

* 大洗工学センター 安全工学部 プラント安全工学室

** 茨城ソフトウェア開発(株)

Modification and Validation of the SWACS code for Large Steam Generators

H. Hamada*, M. Suzuki**, Y. Himeno*

ABSTRACT

For the safety design of the SGs (steam generators) for the prototype fast breeder reactor, the computer code "SWACS" was developed to analyze the pressure/fluid-flow phenomena during the large scale sodium water reaction accidents. The SGs have cover gas space at their top. Follow to the development, the modification was added to the code to improve an accuracy of the calculated pressure wave propagation and to make the code applicable to the SGs having non cover gas space that is one of the design option of SGs for a demonstration fast breeder reactor.

With the SGs having non cover gas space, the initial pressure spike and propagated pressure would become relatively high. Thus, it is required to calculate those pressure wave more accurately than before. The report presents the modification and validation of the code in regard to the calculations of the initial pressure spike and the propagated pressure.

The modification of the code includes implementation of the detailed rupture disk response models for a single and a double membranes type rupture disks and that of the boundary tracking model (BTM). The former enables the code to calculate the disk-fluid interaction using the finite element. The latter enables the code to simulate the physical phenomena more accurately for a longer time during a sodium-water reaction. After the modification, the code was validated by test results from LLTR (Large Leak Test Rig at ETEC) and PEPT (Pressure Effluence System Performance Test Rig at PNC). Reasonable agreement between the calculated and tests results are obtained.

The results of the present study showed that the modified SWACS accurately calculates the pressure wave propagation for the SGs having non cover gas space. Thus, one can conclude that the code is applicable to any types of large SGs.

* FBR Plant Safety section, Safety Engineering Division, O-arai
Engineering center, PNC

** Ibaraki Software development, Inc.

目 次

I 緒論	1
II コードの改良	2
1. コードの基本構成と改造箇所	2
2. 反応部の気泡成長モデルの改良	3
2.1 旧モデル	3
2.2 界面移動モデルの拡張	9
3. ラプチャディスクモデルの改良	18
3.1 旧モデル	18
3.2 ラプチャディスクモデルの移植	18
4. 放出系配管の界面移動モデル開発	21
4.1 旧モデル	21
4.2 界面移動モデルの組み込み	21
III 検証	29
1. LLTR試験による検証	29
1.1 装置の概要	29
1.2 試験の概要	29
1.3 検証計算モデル	30
1.4 検証結果	30
1.5 まとめ	35
2. PEPT試験による検証	36
2.1 装置の概要	36
2.2 試験の概要	37
2.3 検証計算モデル	37
2.4 検証結果及びまとめ	38
IV 結論	60
V 参考文献	62
VI 謝辞	64
APPENDIX-1 入力データの説明	65
APPENDIX-2 気液界面の流速計算	75

List of Figures

Fig. 2.1	SWACS基本構成図	22
Fig. 2.2	SWACS改良の概要	23
Fig. 2.3	球・柱モデルからパンケーキモデルへの移行	24
Fig. 2.4	界面移動モデルの概念	24
Fig. 2.5	界面近傍のメッシュ計算(1)	25
Fig. 2.6	界面近傍のメッシュ計算(2)	25
Fig. 2.7(a)	多分岐境界の計算法(分岐点への流入)	26
Fig. 2.7(b)	多分岐境界の計算法(多分岐点境界)	26
Fig. 2.7(c)	多分岐境界の計算法(特性曲線の足)	26
Fig. 2.8	特性曲線と左右境界の概念	27
Fig. 2.9	界面移動計算・ケース1	27
Fig. 2.10	界面移動計算・ケース2	27
Fig. 2.11	界面移動計算・ケース3	28
Fig. 2.12	界面移動計算・ケース4	28
Fig. 2.13	界面移動計算・ケース5	28
Fig. 3.1	LLTR試験装置鳥瞰図	39
Fig. 3.2	LLTR試験装置系統図	40
Fig. 3.3	LLTR試験水リーク発生位置	41
Fig. 3.4	LLTR試験装置ネットワークモデル図	42
Fig. 3.5	LLTR試験入力水リーク率	43
Fig. 3.6(a)	1枚目ラプチャディスクの変形挙動	44
Fig. 3.6(b)	2枚目ラプチャディスクの変形挙動	44
Fig. 3.7	ラプチャディスク部での圧力波形	45
Fig. 3.8	ラプチャディスク間でのガス圧力	45
Fig. 3.9	SG出口部での圧力波形	46
Fig. 3.10	SG上部プレナム部での圧力波形	46
Fig. 3.11	SG下部プレナム部での圧力波形	47
Fig. 3.12	放出系配管入口での圧力波形	47

Fig. 3.13	放出系配管内の界面移動距離	48
Fig. 3.14	初期スパイク圧長時間計算の例	48
Fig. 3.15	PEPT試験装置鳥瞰図	49
Fig. 3.16	PEPT試験装置系統図	50
Fig. 3.17	PEPT試験装置ネットワークモデル図	51
Fig. 3.18	PEPT試験反応点の入力圧力波形	52
Fig. 3.19	PEPT試験ループ内伝播圧力波形	53

List of Tables

Table 3.1	ラプチャディスクの主要諸元	54
Table 3.2	LLTR試験条件及び試験結果の概要	55
Table 3.3	LLTR試験装置の主要諸元	56
Table 3.4	ラプチャディスク作動時刻の比較	57
Table 3.5	発生最高圧力波高値	57
Table 3.6(a)	PEPT試験装置の主要仕様（その1）	58
Table 3.6(b)	PEPT試験装置の主要仕様（その2）	59

I 緒論

SWACS (Sodium-Water Reaction Analysis Code System) は、設計基準事故時の蒸気発生器（以下、SGと略す）とそれを含む原子炉二次系の健全性評価のために、初期スパイク圧および準定常圧とそれらの伝播を解析するコード^(1, 2)である。すでに、SGの上部にカバーバス空間を有する有液面型SGに対しては、実験検証を終了し、「もんじゅ」SGの安全設計および安全評価に使用してきた。

近年、実証炉設計研究では、合理化を狙って蒸発器と過熱器を一体化した一体貫流型の採用⁽³⁾が指向されいる。既に同型で上部にカバーガス空間を有する有液面型の設計案については安全評価を行った^(4, 5)が、この他にSGの軸方向長短縮のためにカバーガス空間を削除した無液面型SGの設計案もある。無液面型では、ナトリウム自由液面での伝播圧力の緩和機能が無いために、事故時の初期スパイク圧が相対的に高くなる^(4, 5)。また、既存のSWACSには無液面型SGに特有な液中ラップチャディスク設置の圧力開放系に対する解析機能は十分でなく、その過渡圧力とその伝播特性を物理的に正確に評価することができない。そこで無液面型SGへの適応等も含め、より広範な機能を備えた解析ツールを提供する目的で同コードの改造を行った。

改造では、液中ラップチャディスクでしかもディスクが1枚の場合と2枚の場合のいずれも取り扱えるようなモデルを移植した。また、これまでラップチャディスク破裂後の計算を大気開放と仮定していたが、放出系配管での高速放出ナトリウム流モデルを、今回新たにBTM (Boundary Tracking Model) で解析可能とすることで、ダンプタンクまでの過渡圧力変化も解析できるようにした。この他、事故初期におけるSG内の発生水素気泡の急膨張とそれ伴う圧力発生のBTM計算モデルを拡張することで、より長い時間の初期スパイク圧・圧力波伝播も解析が行えるようにした。

改造コードは、米国エネルギー省がRI社で行ったLLTR (Large Leak Test Rig) 試験^(6, 7)および動燃で実施したPEPT試験（水中火薬による模擬試験）のシリーズI試験^(8, 9)からのデータで検証を行った。

本報では、II章でコードの改造を、III章で検証を、IV章で結論を述べる。なお、改造コードの入力データ説明書はAppendix-1に付した。

II コードの改造

本章では、最初の1節でコードの基本構成と今回の改造箇所を、2節でその内のSG内のナトリウム-水反応部に於ける気泡成長モデルの改良を、3節で液中ラップチャーディスクモデルの改良を、4節で放出系配管系の過渡圧力変化を評価するための放出ナトリウム流に界面移動モデルを適用するための改良について述べる。

1 コードの基本構成と改造箇所

SWACSコードは、その基本構成をFig. 2.1に示すように、次の解析機能を持った4つの計算モジュールから成る。

SWAC11： 水噴出率計算モジュール

SWAC57： 初期スパイク圧計算モジュール

SWAC5K： 圧力波伝播計算モジュール

SWAC13： 準定常圧計算モジュール

図中の破線で囲んだSWAC57Rが今回改造を行って開発した新バージョンである。特に、破線で囲んだSWAC57Pは、後述する反応部のExtra-Pipe内に限りBTM計算を可能とした一つ前のバージョンである。図中網掛けで示したのが今回新たに開発または移植した計算モジュールであり、放出系のシングルラップチャーディスク解析(RDSNGL)、ダブルラップチャーディスク解析(RDDOBL)、そして気液界面移動モデル(HBOUNM)である。

今回のコード改良・移植箇所を、原子炉二次系と関連付けながら説明したのがFig. 2.2である。図中、右上が気泡成長モデルを、右下がラップチャーディスクモデルを、左下が放出系配管モデルを示す。

2 反応部の気泡成長モデルの改良

2.1 旧モデル^(1, 2, 10, 11)

(1) 概要

ナトリウム－水反応では、伝熱管からの漏洩水が周囲のナトリウムとの化学反応によって水素気泡を生成する。設計基準事故規模の大量な水流出を伴う大リークでは、生成される水素量も多く、その際に生成される水素気泡は極短時間の内にナトリウム中で膨張して圧力波を発生させる。この圧力波は「初期スパイク圧」と呼ばれ、コードでは「気泡成長モデル」により反応部での気泡成長又は気泡の急速な膨張過程と発生圧力波の解析を行う。

旧バージョンであるSWAC57Pでは、気泡成長を扱うのにFig. 2.2の右上の図中の左に示す2つの物理モデルをオプションとして使用できる。このモデルでは、ナトリウム－水反応時の初期段階では生成された気泡が球形で成長すると仮定した「球・柱モデル」を使用し、反応部の気泡径が予め与えられた球座標上の最外周メッシュ点に達するまで計算を継続する^(1, 2)。次の段階では、球モデルの気泡とその周囲の状態量を座標変換により球形モデルからExtra-Pipeと名付けた仮想配管内に移し、以降は仮想配管内の計算を継続する（このモデルを「パンケーキモデル」と呼ぶ）。なお、球・柱モデル内での気泡成長計算には、気液界面の移動を考慮したモデルであるBTMを用いており、Extra-Pipe内での気泡成長計算ではFBM (Fixed Boundary Model)かBTMのどちらかをオプションとして計算可能としていた。しかしながら、解析モデルの複雑さからこれまでのExtra-Pipe内のBTM計算では、気泡界面が仮想配管端部に達した時点で計算を強制的に停止させているため、旧モデルでは計算可能な時間に上限があり、これが解析上の制約となっていた。

(2) 物理モデル

① 球・柱モデル部計算

(a) 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。

$$P_G \cdot Q_G = n \cdot R_0 \cdot T_G \quad (2-1)$$

$$n = \frac{F}{0.018} \int_0^t q_w dt \quad (2-2)$$

ここで、 Q_G は気泡体積、 F は H_2/H_2O モル転換比、 q_w は水噴出率であり、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(2-1)式を、以下で述べる水撃方程式の(2-3)、(2-4)式と連立させることにより求める。

(b) 1次元水撃方程式

圧縮性を考慮した1次元流体の運動方程式、連続の式を次のように表わす。

• 1次元の球座標領域

$$-\frac{1}{g} \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial r} \right) u = \frac{\partial H}{\partial r} \quad (2-3)$$

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

• 1次元の柱座標領域

$$-\frac{1}{g} \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \right) u = \frac{\partial H}{\partial x} - \sin \varphi + \left(\frac{f}{d} + \frac{\zeta}{L} \right) \frac{u |u|}{2g} \quad (2-5)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \right) H = -\frac{c^2}{g} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2-6)$$

但し球座標は、初期スパイク圧計算に於いて反応点近傍のみに適応する。

(2-3)～(2-6)式は、境界条件を与えて特性曲線法により解かれる^(1, 2)。

② パンケーキモデル部計算

球・柱モデル計算からパンケーキモデル計算に切り替わると、こんどは特定の Extra-Pipeと呼ばれる配管内でのみ気泡界面の移動計算が可能となる。但し、気泡は時間とともに膨張し界面が移動してきても、気泡界面が他の境界（分岐点、断面積変化点等）を乗り越えて移動することはできない。

(a) 球・柱モデルからパンケーキ・モデルの移行

Fig. 2.3に示すように、球・柱モデルで取り扱っていた各座標点の諸量を、パンケーキ状気泡を含む直線座標系に移し替えねばならない。仮定として、気泡は等温の理想気体として扱っているので、移し変えに際しては、気泡の圧力と体積を保存させる。座標系の切り替え時には、球の中心座標をExtra-Pipeへ移し気泡体積を保存するため、パンケーキ部の高さは次式で定まる。

$$\frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \pi r_1^3 \right) = Ah_1 \quad (2-7)$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \pi r_2^3 \right) = Ah_2 \quad (2-8)$$

ただし、 h_1 、 h_2 はそれぞれ、上半球、下半球に相当する側のパンケーキ高さである。

(b) 基礎式（特性方程式）

解くべき基礎式は、一次元の運動量と質量保存式であり、柱座標表示式の(2-5), (2-6)式を書き改めると、次の(2-9), (2-10)式となる。

$$u_t + uu_x + gH_x - g\sin\varphi + \frac{f}{2d} u|u| = 0 \quad (2-9)$$

$$H_t + uH_x + \frac{c^2}{g} u_x = 0 \quad (2-10)$$

(2-9), (2-10)の基礎式より特性方程式を導出すると次式となる。

$$F du + (a\zeta_+ - u) dH + k \cdot dt = 0 \quad (2-11)$$

$$F du + (a\zeta_- - u) dH + k \cdot dt = 0 \quad (2-12)$$

ただし、

$$F = -\frac{c^2}{g} \quad (2-13)$$

$$a = u^2 - c^2 \quad (2-14)$$

$$k = \frac{c^2}{g} \left[g \sin \varphi - \frac{f}{2d} u |u| \right] \quad (2-15)$$

である。この時特性曲線の傾きは、次式

$$\zeta_+ = \frac{1}{u+c} \quad (2-16)$$

$$\zeta_- = \frac{1}{u-c} \quad (2-17)$$

となる。尚、特性方程式及びその導出方法の詳細については SWACS マニュアル^(1,2)、メモ^(10,11)等を参照のこと。

(c) 上部・下部側気泡界面

上半球、下半球をパンケーキモデルに移し替えた後の上部・下部気泡界面での計算法は両半球とも同様となる。そのため、ここでは下半球側の計算法について以下で説明する。

(i) 界面の移動速度の計算

Fig. 2.4 に界面移動モデルの概念を示す。界面の移動速度 (u_m) は、特性方程式 (2-11) を差分化した次式によって解くことができる。

$$F_N (u_m - u_s) + (a\zeta_- - u)_N \cdot (H_m - H_s) + K_s \Delta t = 0 \quad (2-18)$$

ただし

$$x_M = x_N + u_N \cdot \Delta t \quad (2-19)$$

$$x_S = x_N - \frac{\Delta t}{(\zeta_+)_N} \quad (2-20)$$

$$u_S = u_N + (u_C - u_N) \cdot \left(\frac{x_S - x_N}{\xi \cdot \Delta x} \right) \quad (2-21)$$

$$H_S = H_N + (H_C - H_N) \cdot \left(\frac{x_S - x_N}{\xi \cdot \Delta x} \right) \quad (2-22)$$

である。ここで H_M は気泡圧であり既知量となる。

(ii) 界面近傍のメッシュでの計算

・特性曲線の足と気泡界面が交差しない場合

このケースを Fig. 2.5 に示す。気泡界面が特性曲線の足と交差しない場合の計算は、通常の内部点の計算と同じであり特性方程式 (2-11), (2-12) を差分化した次式を連立して解く。

$$F_C (u_P - u_R) + (a\zeta_+ - u)_C (H_P - H_R) + k_P \cdot \Delta t = 0 \quad (2-23)$$

$$F_C (u_P - u_S) + (a\zeta_- - u)_C (H_P - H_S) + k_S \cdot \Delta t = 0 \quad (2-24)$$

(2-23), (2-24) 式から流速 (u_P)、圧力 (H_P) が以下のように求められる。

$$u_P = \frac{1}{2} \left\{ (u_R + u_S) + \frac{g}{c} (H_R - H_S) + \frac{g}{c^2} (k_R + k_S) \Delta t \right. \quad (2-25)$$

$$H_P = \frac{1}{2} \left\{ \frac{c}{g} (u_R - u_S) + (H_R + H_S) + \frac{1}{c} (k_R - k_S) \Delta t \right. \quad (2-26)$$

・特性曲線の足と気泡界面が交差する場合

このケースをFig. 2.6に示す。ここでは特性曲線の足がW点で気泡界面に接しているため、P点の計算にはP-WとP-Sに沿った特性曲線で考える。まず、W点の圧力は気泡圧力で既知のため、W点の流速(u_w)が先に求まる。W点の流速はW点とT点を結ぶ特性曲線に沿った特性方程式を差分化することによって次式で求められる。

$$u_w = u_T - \frac{1}{F_N} \left\{ (a\zeta_c - u)_N (H_N - H_T) + k_N \cdot (\phi \Delta t) \right\} \quad (2-27)$$

次に、P点とW点の結ぶ特性曲線に沿った次式の特性方程式の差分式(2-28)、P点とS点の結ぶ特性曲線に沿った次式の特性方程式の差分式(2-29)が成り立つ。

$$F_c (u_P - u_w) + (a\zeta_c - u)_c (H_P - H_w) + k_w \cdot (\phi \Delta t) = 0 \quad (2-28)$$

$$F_c (u_P - u_s) + (a\zeta_c - u)_c (H_P - H_s) + k_s \cdot \Delta t = 0 \quad (2-29)$$

(2-28), (2-29)式を連立して解くことで、流速(u_P)、圧力(H_P)が以下のように求まる。

$$u_P = \frac{1}{2} \left\{ (u_w + u_s) + \frac{g}{c} (H_w - H_s) + \frac{g}{c^2} (\phi k_w + k_s) \Delta t \right\} \quad (2-30)$$

$$H_P = \frac{1}{2} \left\{ \frac{c}{g} (u_w - u_s) + (H_w + H_s) + \frac{1}{c} (\phi k_w - k_s) \Delta t \right\} \quad (2-31)$$

2.2 界面移動モデルの拡張⁽¹²⁾

(1) 概要

前述したように、これまでのBTM計算ではモデル上の制約が存在し、気液界面が境界近傍（分岐点、断面積変化点、仮想配管の終端部等）に近づくと強制的に計算を停止させていた。今回の改良では、忠実な物理現象のモデル化とより長い計算時間の実現を達成するために、新たにBTMモデルを拡張し、界面が境界を移動できる新モデルを開発した。その結果、気泡境界が仮想配管からSGの上部・下部配管の分岐点まで移動した場合でも解析の継続が可能となった。この概念図をFig. 2.2右上の括弧内の第3番目に示す。

配管分岐点での気泡界面の移動は、想定される物理現象を考慮して複数のケースを忠実に模擬できるようにする必要がある。しかし、計算の継続にともない分岐点近傍の配管内で気液界面数が2つ以上となるケースもモデル上は想定され、この場合には解析及び計算の継続が非常に困難になる。そのような場合には、配管内の界面数を2つ以下に変更するか、あるいは分岐点に接する一部の配管について界面の境界移動を強制的に停止させることで計算を継続させるようにした。このような強制的な変更は、圧力波伝播現象に関しては解析結果にさほど大きな影響を与えないものと考える。

(2) 物理モデルの説明

Extra-Pipe内での気泡界面が境界点（Extra-Pipeの終端）に達した時点でこれまで計算が停止していたのを改良し、気泡界面が境界点を越えて他の配管へ移動できるようにした。今回の対象とした境界は多分岐境界であり、実際の解析モデル上は分岐数に制限されないものの、計算コード上は3分岐まで適応可能なようにしている。尚、配管内の気泡界面の移動については、従来のパンケーキモデル（Extra-Pipe内の計算）を使用しており、新たに開発したのは気泡界面が分岐を越えるモデルの取り扱いである。以下では、このモデルの計算法について述べる。

① 多分岐境界の計算法

Fig. 2.7(a)に示すn分岐の接合点を考える。新しい時刻での流速(u_{pi})は、分岐に流れ込む方向を正にとると、連続の式より次式が成り立つ。

$$\sum_{i=1}^n A_i \cdot u_{pi} = 0 \quad (2-32)$$

ただし、 A_i ：流路断面積(m^2)， u_{pi} ：流速(m/s)， $i = 1 \sim n$ である。

添字(w_i)は境界点より伸びた特性曲線の終端の足での状態量を示し、 ϕ_i は終端の点における時間比を表わすものとする(Fig. 2.7(b), (c)参照)と、 i が1からnの場合について以下の式が成り立つ。

$$A_i u_{pi} = A_i \left\{ u_{wi} - \frac{g}{c_i} [H_p - H_{wi}] - \left[\frac{f_i}{2d_i} |u_{wi}| + g \sin \varphi_i \right] (\phi_i \Delta t) \right\} \quad (2-33)$$

(2-32), (2-33)式は $n+1$ 個の連立方程式であり、未知数 H_p と u_{pi} についてこれを解くと次式となる。

$$H_p = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \left\{ u_{wi} + \frac{g}{c_i} H_{wi} - \left[\frac{f_i}{2d_i} |u_{wi}| + g \sin \varphi_i \right] (\phi_i \Delta t) \right\}}{\sum_{i=1}^n A_i \frac{g}{c_i}} \quad (2-34)$$

$$u_{pi} = u_{wi} - \frac{g}{c_i} [H_p - H_{wi}] - \left[\frac{f_i}{2d_i} |u_{wi}| + g \sin \varphi_i \right] (\phi_i \Delta t) \quad (2-35)$$

ちなみに、 $i = 1$ （盲端）の時

$$H_p = H_{w1} - \frac{c_1}{g} (u_{p1} - u_{w1}) - \frac{c_1}{g} \left[\frac{f_1}{2d_1} |u_{w1}| + g \sin \varphi_1 \right] (\phi_1 \Delta t) \quad (2-36)$$

$$u_{p1} = 0 \quad (2-37)$$

となり $u_{p1} = 0$ の流速一定条件となることが示される。実際の多分岐境界計算は、(2-34), (2-35)式を解くことで、時刻 $t + \Delta t$ での未知量である H_p と u_{pi} が得られるわけであるが、この式を解くためには、 ϕ_i , H_{wi} , $|u_{wi}|$ の値を事前に求めておく必要がある。これらの求め方は以下で説明する。

②圧力波伝播の特性方程式

これ以降の式の展開では、計算の表記法を簡単にするため、圧力波伝播の特性方程式を以下のように簡略化して書く。(Fig. 2.8参照)

$$\Delta u + \frac{g}{Ic} \Delta H + f(u) \Delta t = 0 \quad (2-38)$$

$$\Delta x = (u + Ic) \Delta t \quad (2-39)$$

但し、 $f(u) = f / 2d \cdot u + u - g \cdot \sin \alpha$ としている。式中に現われる I は ± 1 をとるフラグである。 $I = 1$ の場合は (+) の特性曲線についての式で、気液界面の右側に境界が存在する"右境界"の場合に用いる。 $I = -1$ の場合は (-) の特性曲線についての式で、気液界面の左側に境界が存在する"左境界"の場合に用いる。

③気泡界面の移動による特性曲線の足の計算

気泡界面が分岐を越える際には、右側気泡界面と左側気泡界面のケースを想定することができ、両者共に特性曲線の足の傾きと流れの方向が違う以外は、物理的に全く同等である。従ってここでは、左側気泡界面について幾つかのパターンに分類し、その各々について特性曲線の足の計算法を記述する。但し以下の計算式では、 I のフラグを変えることで左・右境界の式が各々得られる。

尚、あるケースに於いては、未知である P 点の圧力 (H_P)、流速 (u_{P+}) を陰に用いて計算を実施している。この場合の実際の計算時には、最初に現在時刻 t における P 点の圧力、流速を初期値として計算し、その結果として得られる P 点の値を逐次更新・反復計算していくことで、最終的に Δt 秒後の P 点の値が求まるようにした。

(a) ケース 1

このケースを Fig. 2.9 に示す。特性曲線の足 S 点について、以下の連立方程式が成り立つ。

$$x_c - x_s = (u_s + Ic) \Delta t \quad (2-40)$$

$$\frac{x_s - x_c}{x_n - x_c} = \frac{u_s - u_c}{u_n - u_c} \quad (2-41)$$

$$\frac{x_s - x_c}{x_n - x_c} = \frac{H_s - H_c}{H_n - H_c} \quad (2-42)$$

(2-40), (2-41)式を連立して解くと、S点の座標(x_s)と流速(u_s)が以下のように求まる。

$$u_s = \frac{(x_c - x_n) u_c + (u_n - u_c) \Delta t \cdot Ic}{(x_c - x_n) + (u_c - u_n) \Delta t} \quad (2-43)$$

$$x_s = x_c - (u_s + Ic) \Delta t \quad (2-44)$$

更に(2-42)式を用いれば、S点の圧力(H_s)が以下のように求まる。

$$H_s = H_c + \frac{x_s - x_c}{x_n - x_c} (H_n - H_c) \quad (2-45)$$

このケースでは、 $\phi_i = 1$, $H_{w_i} = H_s$, $u_{w_i} = u_s$ を与える。

(b) ケース 2

このケースはFig. 2.10に示す。特性曲線の足W点について、以下の連立方程式が成り立つ。ただし、W点の流速(u_w)は未知なので近似的に $u_w \approx u_n$ として考える。

$$x_w = x_n + u_n (1-\phi) \Delta t \quad (2-46)$$

$$x_c - x_w = (u_n + Ic) \phi \Delta t \quad (2-47)$$

(2-46), (2-47)式を連立して解けば、W点の時間比 ϕ と座標 X_w が以下のように求まる。

$$\phi = \frac{x_c - x_n - u_n \Delta t}{Ic \Delta t} \quad (2-48)$$

$$x_w = x_n + \frac{u_n}{Ic} \{ (x_n - x_c) + (Ic + u_n) \Delta t \} \quad (2-49)$$

W点の流速(u_w)を求めるには、T点の流速(u_T)、座標(x_T)、圧力(H_T)を先に求めなければならない。T点については次式が成り立つ。

$$x_w - x_T = (u_T - Ic)(1-\phi) \Delta t \quad (2-50)$$

$$\frac{x_T - x_c}{x_n - x_c} = \frac{u_T - u_c}{u_n - u_c} \quad (2-51)$$

$$\frac{x_T - x_c}{x_n - x_c} = \frac{H_T - H_c}{H_n - H_c} \quad (2-52)$$

この(2-50),(2-51)式より、T点の流速(u_T)と座標(x_T)を求める。

$$u_T = \frac{(u_n - u_c) \{ (x_w - x_c) + (1-\phi) \Delta t Ic \} + (x_n - x_c) u_c}{(x_n - x_c) + (u_n - u_c)(1-\phi) \Delta t} \quad (2-53)$$

$$x_T = x_w - (u_T - Ic)(1-\phi) \Delta t \quad (2-54)$$

従って、(2-52)式よりT点の圧力(H_T)が求まる。

$$H_T = H_c + \frac{x_T - x_c}{x_n - x_c} (H_n - H_c) \quad (2-55)$$

W点の圧力(H_w)は気泡圧力なので既知量である。その時、W点の流速(u_w)については次式が成り立つ。

$$u_w - u_T - \frac{g}{Ic} (H_w - H_T) + f(u_T)(1-\phi) \Delta t = 0 \quad (2-56)$$

従って、W点の流速(u_w)は次式で与えられる。

$$u_w = u_T + \frac{g}{Ic} (H_w - H_T) - f(u_T)(1-\phi) \Delta t \quad (2-57)$$

このケースでは、 $\phi_i = \phi$, $H_{wi} = H_w$, $u_{wi} = u_w$ となる。

(c) ケース 3

このケースを Fig. 2.11 に示す。特性曲線の足 W 点については、ケース 2 の場合と同様に、(2-46), (2-47) 式の連立方程式が成り立ち、W 点の時間比 ϕ は (2-48) 式、座標は (2-49) 式で求めることができる。

T 点については次式の連立方程式が成立つ。

$$x_w - x_c = (u_T - Ic)(\phi - \phi) \Delta t \quad (2-58)$$

$$\phi = \frac{u_T - u_p}{u_c - u_p} = \frac{H_T - H_p}{H_c - H_p} \quad (2-59)$$

T 点の時間比 ϕ , 壓力 (H_T), 流速 (u_T) は (2-58), (2-59) 式より得られ、以下となる。

$$u_T = \frac{(X+Y) \pm \sqrt{X-Y + \sqrt{1+4Z/(X-Y)^2}}}{2} \equiv u_T(u_p) \quad (2-60)$$

$$H_T = H_p + (H_c - H_p)\phi \equiv H_T(u_p, H_p) \quad (2-61)$$

$$\phi = \frac{u_T - u_p}{u_c - u_p} \equiv \phi(u_p) \quad (2-62)$$

但し、 $X \equiv u_p + \phi(u_c - u_p)$, $Y \equiv Ic$, $Z \equiv \frac{(x_w - x_c)(u_c - u_p)}{\Delta t}$ であり、

(±) の符号は、 $I = 1$ のとき (-) を、 $I = -1$ のとき (+) をとする。

W 点の圧力 (H_w) は気泡圧力なので既知量である。ケース 2 と同様にして W 点の流速 (u_w) は求まり、次式となる。

$$u_w = u_T + \frac{g}{Ic}(H_w - H_T) - f(u_T)(\phi - \phi) \Delta t \\ \equiv u_w(u_p, H_p) \quad (2-63)$$

このケースでは、 $\phi_i = \phi$, $H_{wi} = H_w$, $u_{wi} = u_w$ である。

(d) ケース 4

Fig. 2.12 に示す図において、X 点での時間比 ϕ_x は、次式

$$x_c = x_N + u_N(1 - \phi_x) \Delta t \quad (2-64)$$

より求められ、

$$\phi_x = 1 - \frac{x_c - x_N}{u_N \Delta t} \quad (2-65)$$

で表せられる。S点における座標(x_s)、圧力(H_s)、流速(u_s)は、ケース1と同様にして求まり、

$$u_s = \frac{(x_N - x_B)u_N + (u_B - u_N)\Delta t \cdot Ic}{(x_N - x_B) + (u_N - u_B)\Delta t} \quad (2-66)$$

$$x_s = x_N - (u_s + Ic) \Delta t \quad (2-67)$$

$$H_s = H_N + \frac{x_s - x_N}{x_B - x_N} (H_B - H_N) \quad (2-68)$$

となる。このケースでは、 $\phi_i = 1$ 、 $H_{ui} = H_s$ 、 $U_{ui} = U_s$ を与える。

(e) ケース5

このケースをFig. 2.13に示す。特性曲線の足x点での時間比 ϕ_x は、前述の(2-65)式で示されるから、近似的にx点の流速を u_M と等しいとすると、M点の座標 x_M は

$$x_M = x_c + u_M \phi_x \Delta t \quad (2-69)$$

となる。L点に対する時間比 ψ 、流速(u_L)、圧力(H_L)は次式の連立方程式

$$x_M - x_c = (u_L - Ic)\psi \Delta t = u_M \phi_x \Delta t \quad (2-70)$$

$$\frac{\psi}{\phi_x} = \frac{u_L - u_P}{u_M - u_P} = \frac{H_L - H_P}{H_x - H_P} \quad (2-71)$$

から求まり、

$$\phi = \frac{u_M \phi_x}{u_L - Ic} \quad (2-72)$$

$$U_L = \frac{(u_P + Ic) \pm |u_P - Ic| \cdot \sqrt{1 + \frac{4u_M(u_M - u_P)}{(u_P - Ic)^2}}}{2} \quad (2-73)$$

$$H_L = H_P + \frac{\phi}{\phi_x} (H_x - H_P) \quad (2-74)$$

となる。 (\pm) の符号は、 $I = -1$ のとき (-) を、 $I = 1$ のとき (+) をとる。

M点での圧力 (H_M) は気泡圧で既知量であるから、流速 ($u_M \approx u_X$) は (2-57)式と同様に次式で求める。

$$u_M = u_L + \frac{g}{Ic} (H_M - H_L) - f(u_L) \phi \Delta t \quad (2-75)$$

W点の座標 (x_W) 及び時間比 ϕ は、以下の方程式

$$x_W = x_C + u_X (\phi_X - \phi) \Delta t \quad (2-76)$$

$$x_C - x_W = (u_X + Ic) \phi \Delta t \quad (2-77)$$

より得られ、

$$\phi = - \frac{u_X \phi_X}{Ic} \quad (2-78)$$

$$x_W = x_C + \frac{u_X (u_X + Ic) \phi_X \Delta t}{Ic} \quad (2-79)$$

となる。近似的に $u_W \approx u_M$ と考えれば、このケースでは、 $\phi_i = \phi$, $H_{W,i} = H_W$, $u_{W,i} = u_W$ を与える。

④ 境界近傍での気液界面流速 (u_m) の計算

BTM計算では、境界近傍での気液界面の流速 (u_m) の計算も必要となる。ここでも幾つかのケースに分類し、各々について計算しているが、これについてはAPPENDIX-2で述べる。

3 ラプチャディスク・モデルの改良

3.1 旧モデル

旧モデルであるSWAC57Pでは、予め圧力開放板破裂値を入力パラメータで設定しておき、ラプチャディスクに対する印可圧がこの値以上になるとディスクを破裂させるという単純なモデルを採用していた。ここでは、ラプチャディスク接合点の圧力がディスクの破裂設定圧に達するまでは特別な計算は行わず、通常の盲端として取り扱う。接合点圧力が破裂設定圧を越えた場合にはディスクが破裂しナトリウムが流出するが、その際にはそこでの圧損係数を考慮し、ラプチャディスク下流は大気開放（開放系圧力）であるものとして計算を継続している。

3.2 ラプチャディスクモデルの移植

圧力開放系としての接液型ラプチャディスクの採用は、無液面型蒸気発生器に特有な項目の一つである。接液型の場合には、ナトリウム－水反応部からの伝播圧力波が直接ディスクへと作用し、ディスクの変形を生じさせる。ディスクの変形による圧力波への影響は大きいものと考えられるため、伝播圧力波によるディスクの変形を考慮し流体とディスクの相互作用下における計算が可能なように、圧力波伝播解析モデルを新たに開発することが必要となる。

具体的には、米国・A N L (Argonne National Laboratory) の開発した計算コード： SWAAM-II の中の "Rupture Disk Response Module" を動燃所有のコード SWAC57P にカップリングした。組み込むべき計算モジュールは大きく 3 つに分かれており、各モジュールの名称及び機能は以下の通りである。

(1) "RDONE" 計算モジュール

現 "SWAC57P" のラプチャディスク部解析モデルとほぼ同等な簡易計算モデルである。但し RDONE は、ラプチャディスク破裂後の計算に圧損係数を考慮していないため、このモジュールについてはカップリングのメリットは少ない。

(2) "RDTWO" 計算モジュール

1枚のラプチャディスクについて、流体（ナトリウム）とディスクの相互作用を有限要素法により弾・塑性解析する。

(3) "RDOUBL" 計算モジュール：

2枚のラプチャディスクについて、流体（ナトリウムあるいは気体）とディスクの相互作用を有限要素法により弾・塑性解析する。2枚のラプチャディスク間には気体が充填されており、1枚目のディスク（接液部）は"RDTWO"とほぼ同様な解析を行う。2枚目のディスクは、ディスク間へのナトリウム流入に伴うディスク間気体の圧縮効果によって、それが変形し破裂する様な解析モデルとなっている。

これらの各モジュールは、SWAC57Pにカップリングするさい混乱を避けるため、各々"RDZERO", "RDSNGL", "RDDOUBL"とモジュール名を変えてい。但し、"RDZERO"の計算モジュールにおいては、SWAC57Pオリジナルのラプチャディスク解析モデルをそのまま使用した。以下においては、新たに追加した2つの解析モデルの概要を説明する。

① シングルラプチャーディスクモデル (RDSNGL)

ラプチャディスクは流体と接しているため、圧力波伝播解析では流体とディスクの相互作用を考慮する。このモジュールは、流体の状態、具体的には以下の式で与える C_1 と C_2 の値、により、ディスクと流体の相互作用を計算する。

(キャビテーションのない場合)

$$P = C_1 + C_2 * V \quad (2-80)$$

$$V = f(P) \quad (2-81)$$

(キャビテーションのある場合)

$$P = \text{cavitation pressure} \quad (2-82)$$

$$V = f(P) \quad (2-83)$$

f は非線形関数で、 P と V は各々圧力とディスクの変位速度である。既知の圧力によるディスクの応答、つまり $V = f(P)$ 、は有限要素法により計算される。しかし、流体／ディスクの相互作用を計算する時には圧力と変位速度は未知となるため、両者を求める際には、繰り返し計算手法により上述した式を満足させる P と V の組合せとして解を求める。

このラップチャディスクは時間とともに変形し、ディスク中央がナイフに接するか、ディスク中心部の変位がある設定値に達すると、ラップチャディスクは完全開口し、その後は開放端として計算を継続する。

② ダブルラップチャーディスクモデル (RDDOBL)

前述したようにダブルラップチャディスクは、ディスク間の空間をガスで満たした2枚のラップチャディスクで構成されている。1枚目ラップチャディスク（接液部）は、ディスク間のガス圧の影響が十分無視できるものと考えられるため、3.2①の項で説明したシングルラップチャディスクモデルとほぼ同様の解析モデルで計算を行う。

1枚目ラップチャディスクの破裂後は、ナトリウムの流入によりディスク間のガスは理想気体として圧縮され、その圧力が2枚目ラップチャディスクへと作用する。ガスは圧縮性であり、ディスクの変形はさほどガス圧に影響しないため、ガスと2枚目ラップチャディスクの相互作用は考慮しない。2枚目ディスクの中心部がある設定値に達した時にディスクは完全開口する。

4 放出系配管の界面移動モデル開発

4.1 旧モデル

旧モデルでは、放出系配管内、即ちラプチャディスク下流域、でのモデル化はかなり簡略化されたものであった。つまり、ラプチャディスク部での伝播圧力波がその設定圧以上となるとディスクが破裂し、その後はラプチャディスク以降を圧力一定条件（大気開放）の1分岐モデルとして取り扱っていた。

圧力一定条件の計算モデルはSWACSマニュアル、文献等を参照^(1,2)のこと。

4.2 界面移動モデルの組み込み

旧モデルに対して新モデルでは、放出系配管内の気液界面の移動も考慮して圧力波伝播計算を行えるようにした。放出系配管内の具体的な計算式は反応部のパンケーキモデル計算と同様であるため、ここではその説明を割愛する。なお、気泡界面での圧力・流量計算では圧力一定条件を与えて解くが、放出系下流側界面については入力値としての背圧を、放出系上流側界面（これは反応部の水素気泡界面が放出系配管部にまで到達している場合に相当する）としては、反応部の水素気泡圧をその界面に与えるものとする。

但し、気液界面が移動しダンプタンクにまで達した以降は、BTM計算モデルから通常ナトリウム配管モデルの取り扱いとし、配管とダンプタンクの接合点を圧力一定条件で計算する。

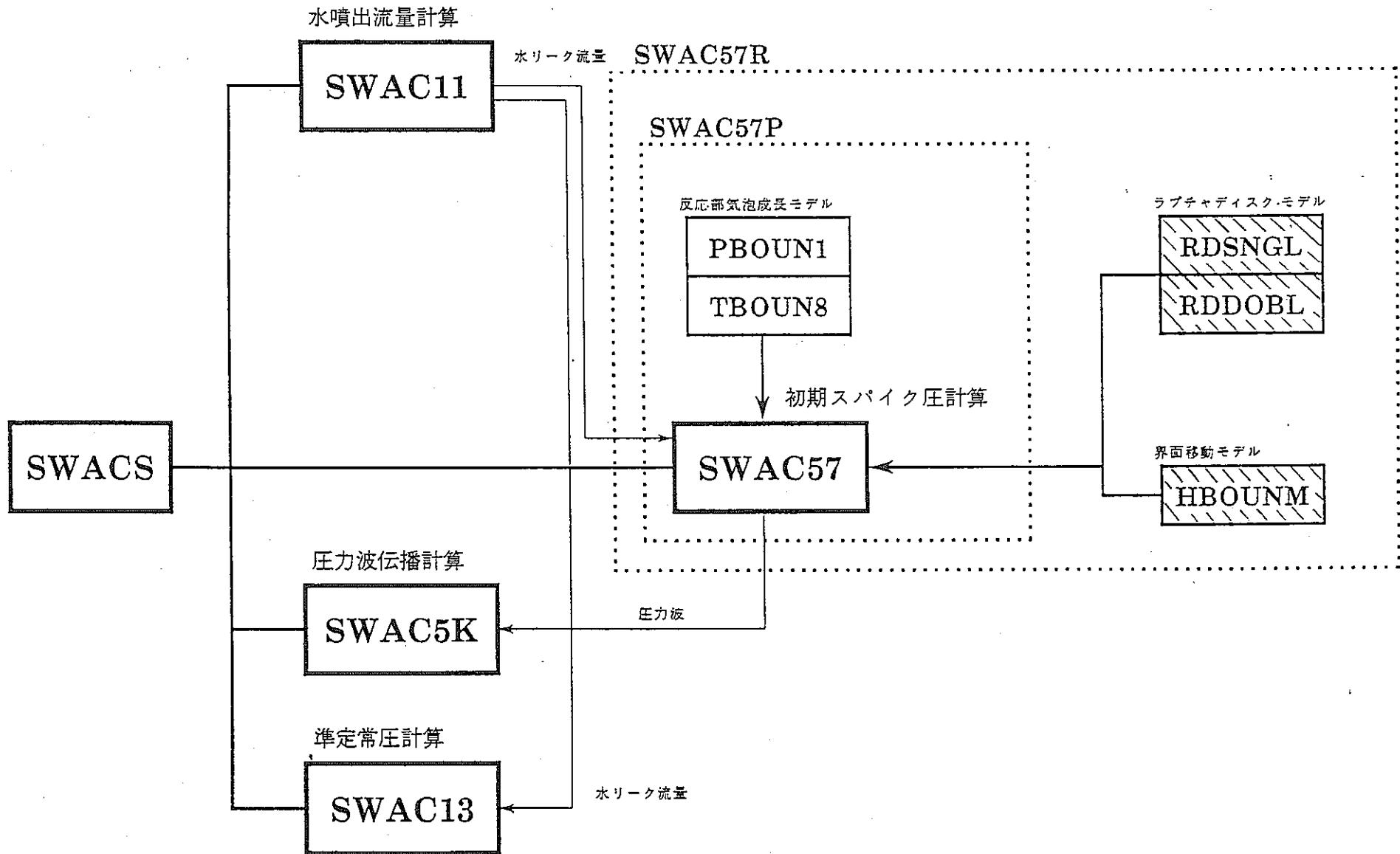


Fig. 2.1 SWACS 基本構成図

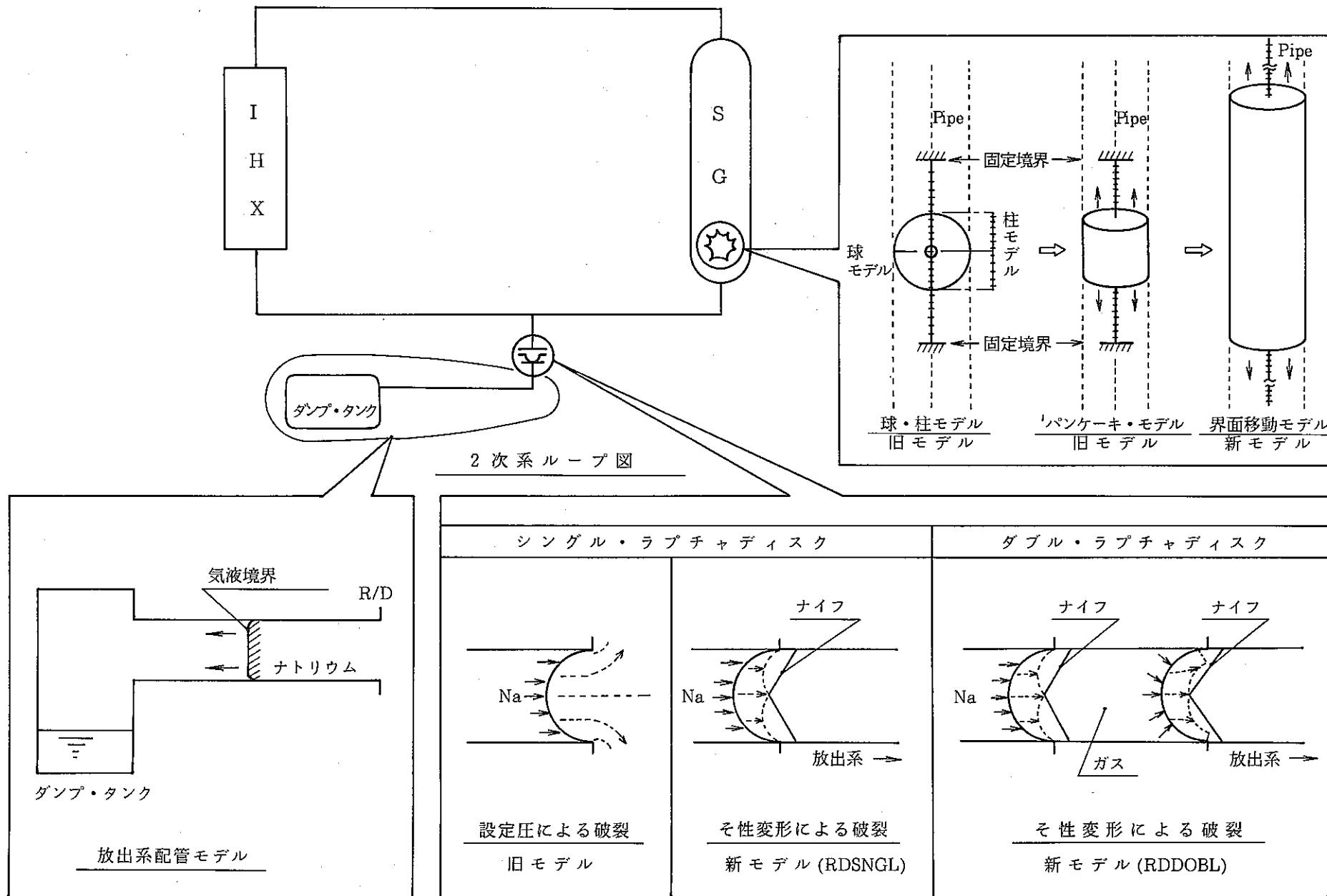


Fig. 2.2 SWACS 改良の概要

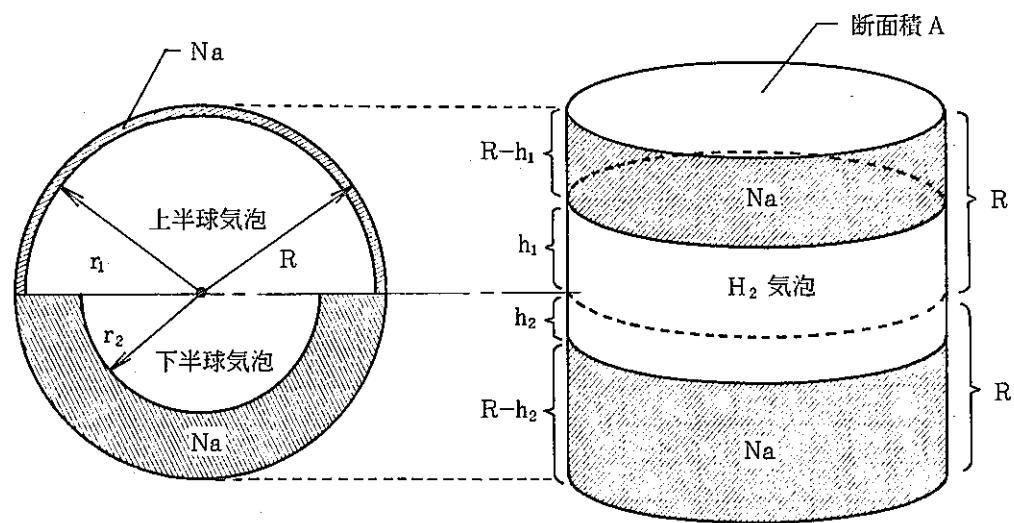


Fig. 2.3 球・柱モデルからパンケーキモデルへの移行

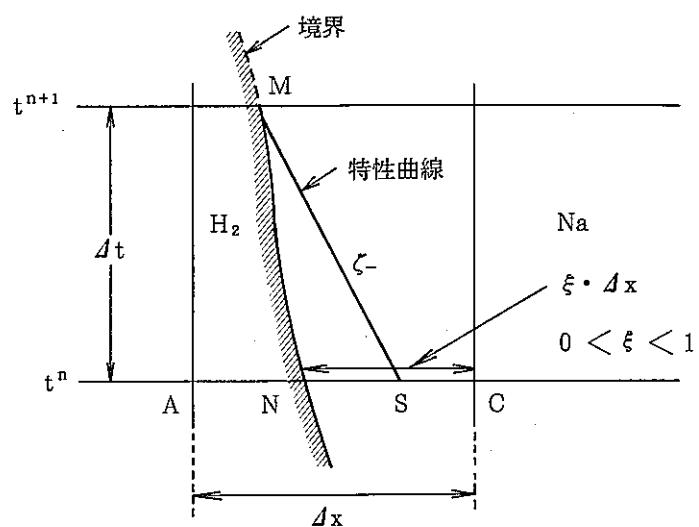


Fig. 2.4 界面移動モデルの概念

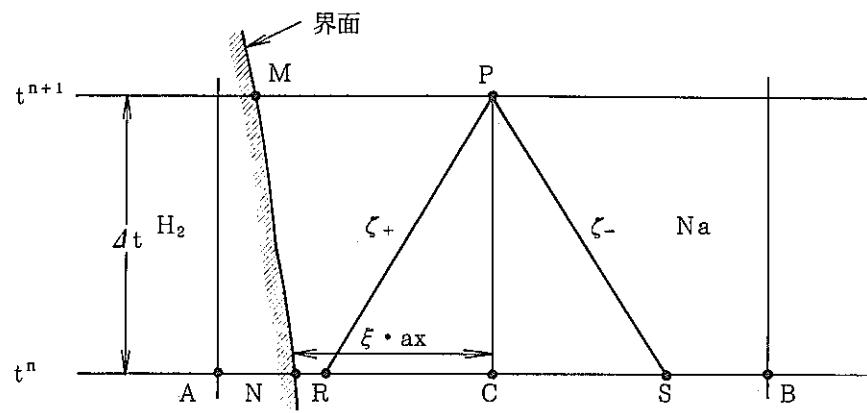


Fig. 2.5 界面近傍メッシュ計算(1)

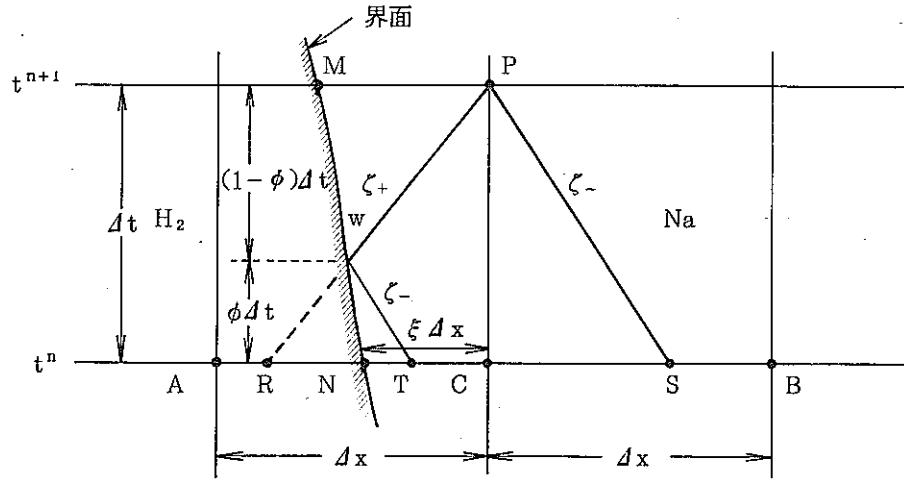


Fig. 2.6 界面近傍のメッシュ計算(2)

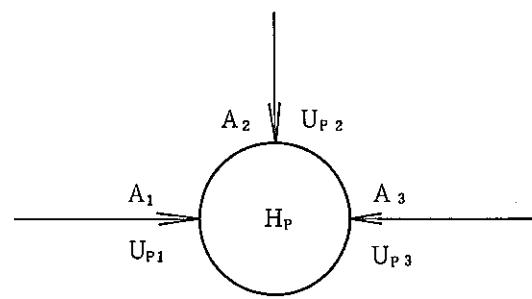


Fig. 2.7 (a) 多分岐境界の計算法（分岐点への流入）

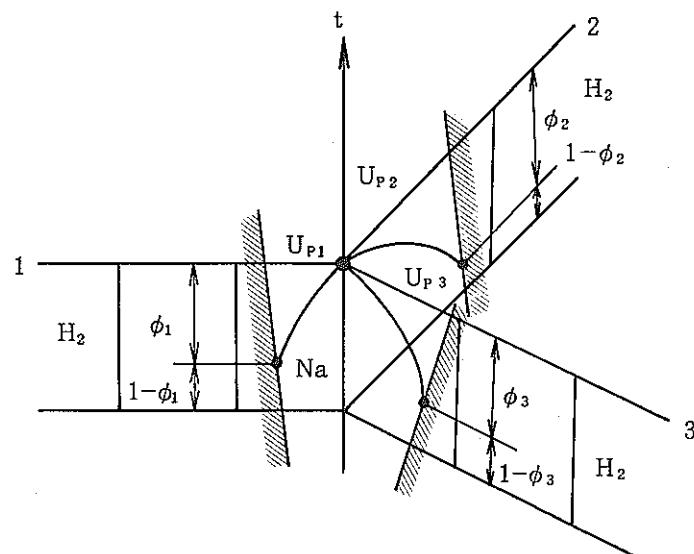


Fig. 2.7 (b) 多分岐境界の計算法（多分岐点境界）

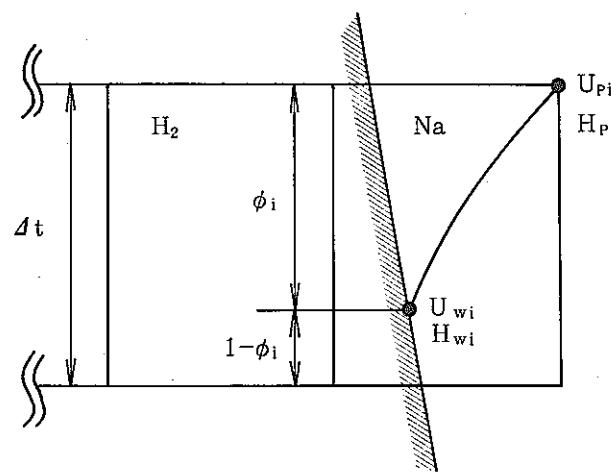


Fig. 2.7 (c) 多分岐境界の計算法（特性曲線の足）

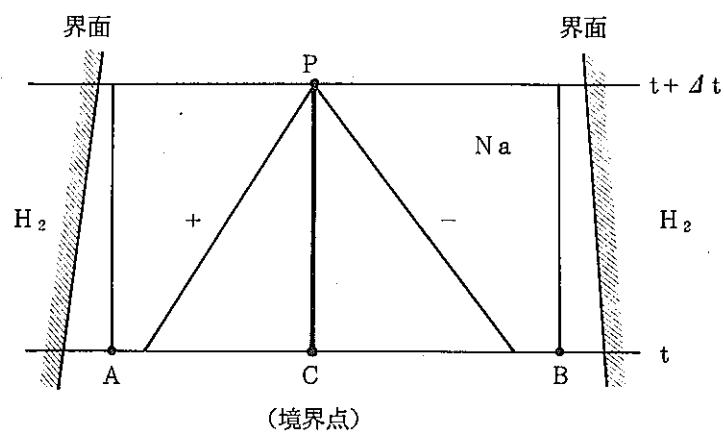


Fig. 2.8 特性曲線と左右境界の概念

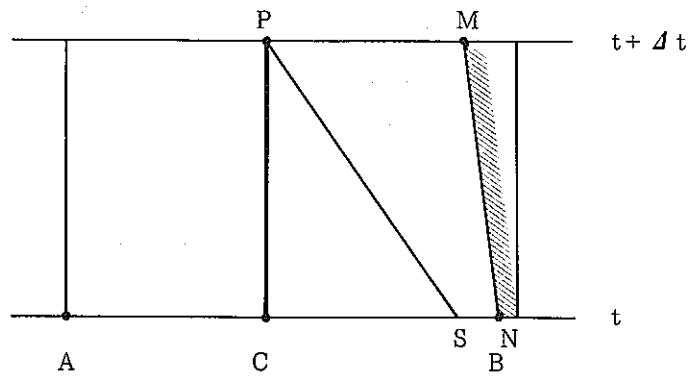


Fig. 2.9 界面移動計算・ケース 1

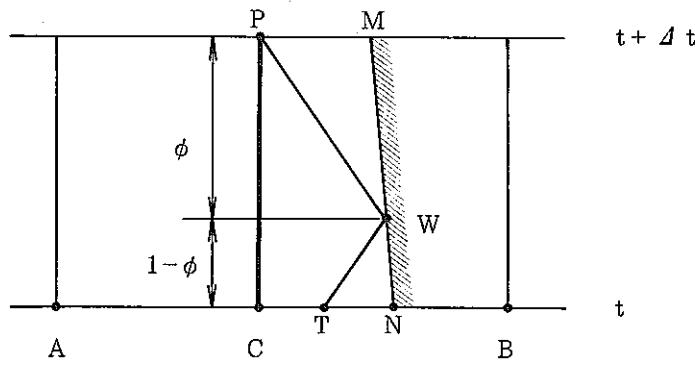


Fig. 2.10 界面移動計算・ケース 2

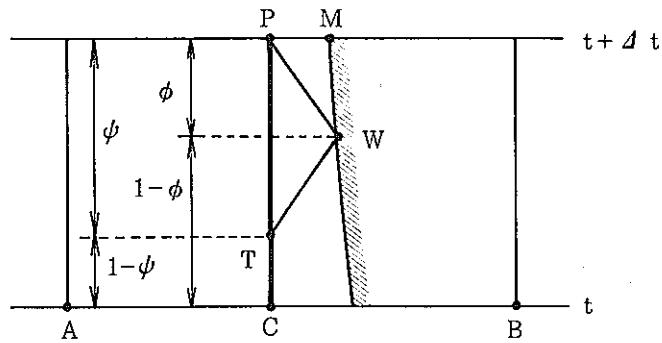


Fig. 2.11 界面移動計算・ケース 3

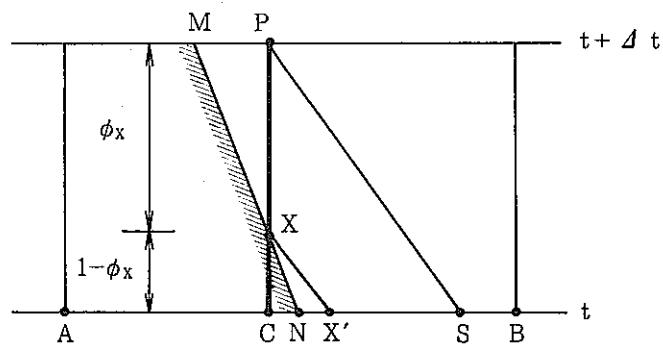


Fig. 2.12 界面移動計算・ケース 4

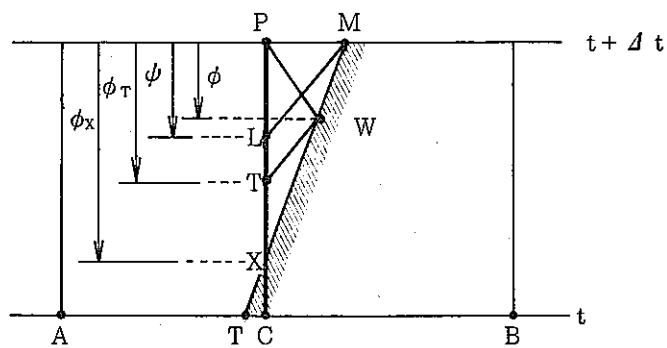


Fig. 2.13 界面移動計算・ケース 5

III 検証

1 LLTR試験による検証

LLTR (Large Leak Test Rig) は、米国エネルギー省が Rockwell International 社の ETEC に製作した大型試験装置であり、この装置で 1976～1980 年にかけて CRBRP 用の SG に対する大リーク試験⁽¹⁰⁾が行われている。本コードのラプチャディスクモデルの検証には、この試験のデータを使用した。

1.1 装置の概要

装置の鳥瞰図を Fig. 3.1 に、また系統図を Fig. 3.2 にそれぞれ示す。試験ループは SG、反応生成物収納タンクおよびそれらを連結する配管系から成る。SG には直管型の伝熱管が取り付けてあり全長約 10.2m である。放出系としては、SG の上部と下部にそれぞれ 20B 相当の配管が設置されているが、上部のそれは盲栓が施されておりこの試験では使用されていない。下部の放出系配管のラプチャディスクは、破裂板の破裂方式が反転ナイフ形式、破裂板の枚数は 2 枚のダブル型であり、SG 本体から約 1.7m の距離に設置している。Table 3.1 に、ラプチャディスクの主要諸元を示す。

1.2 試験の概要

検証に引用したのは LLTR 試験シリーズ II の A-2 試験で、試験条件及び試験結果の概要を Table 3.2 に、装置の主要諸元を Table 3.3 に示す。この表に示す部材番号は、後述する計算モデル体系 (Fig. 3.4) の番号と対応している。

試験では、伝熱管 1 本両端ギロチン破損 (1 DEG) 相当の水リークを管束部の下端より 2/5 の高さで発生させている。水リーク発生位置を Fig. 3.3 に示す。

1.3 検証計算モデル

(1) 計算体系

LLTR試験装置 (Fig. 3.1) の計算モデルを Fig. 3.4 に示す。リーク点は LLTR試験と同じ位置の直管東部中部で、有効伝熱管部下端より $1/3$ の高さの点 (ノード 3) とした。ダブルラップチャディスク (RD-1) はノード 19 に対応する。RD-2 のラップチャディスクも計算モデルには組み込んでいるが、それは実際の試験で使用されていないので、その破裂設定圧を高くして盲端を模擬した。RD-1 に関する仕様諸元を Table 3.1 に示す。

検証計算には前章で述べた新モデルによる解析を実施した。即ち、ラップチャディスク破裂後、気液界面が放出系配管からダンプタンクに達するまでの領域と、反応部領域とを界面移動モデルにより解析する。

(2) 水リーク率

LLTR試験では、伝熱管体両端ギロチン破損 (1 DEG) 相当の水リーク率 (水リーク流量) をナトリウム中に注入している⁽⁶⁾。この試験で得られた水リーク率を本検証計算用の入力値とした。それを Fig. 3.5 に示す。

1.4 検証結果

SGでの大リーク事故時には、ナトリウム-水反応で発生する圧力（音響波動現象である初期スパイク圧や水素ガス蓄積に起因する準定常圧）が問題となる。無液面型 SG の場合には接液型ラップチャディスクの使用により、特に初期スパイク圧作用下でのラップチャディスク変形挙動（ラップチャディスク破裂時刻）と、それに伴う発生圧力（最大発生圧）の正確な評価が特に重要となる。

そこで、今回の検証においては、主にラップチャディスク破裂時刻及び発生圧力波形の相互比較により、SWACSコードに追加した新解析モデルの妥当性を検討する。それらを以下で述べる。

(1) ラプチャディスク部

・ラプチャディスクの過渡変化

解析で得られたラプチャディスクの過渡変化をFig. 3.6(a), (b)に示す。前者は直接ナトリウムと接した1枚目のラプチャディスクである。同図からはラプチャディスク中央部から変形が開始する様子がみられる。この現象は、配管内の圧力波伝播を一次元解析モデルで評価しまたラプチャディスクの変形を2次元解析モデルで評価しているため、圧力波進行方向と垂直なラプチャディスク面の先端（配管とラプチャディスクの接点に相当）から圧力波が作用していることに起因した現象である。

一方、Fig. 3.6(b)は2枚目のラプチャディスクの過渡変化を示すが、この場合には一枚目ラプチャディスク破裂後のナトリウム流入により、ラプチャディスク間のガス圧力が上昇し、全てのラプチャディスク面上にガス圧力が垂直に掛かるため、全体的にディスクの変形が生じている。

・ラプチャディスク破裂時刻

ラプチャディスクの破裂時刻をTable 3.4に示す。1枚目ラプチャディスク破裂時刻の実験と解析の比較からは、解析の方が僅か(3.85 msec)に早く破裂しているが、一致は良い。これは先にも述べたように、ラプチャディスクが実際の現象とは異なりその中央から変形を開始しているため破裂時刻が早まったもので、解析モデルに起因した現象と考える。

・ラプチャディスク部発生圧力

ラプチャディスク部上流ナトリウム側での圧力波形をFig. 3.7に示す。図は太い方から順に試験及び解析結果を表わし、試験結果はラプチャディスク部から十数cm程上流側に設置した圧力センサーの出力値を、また計算結果はFig. 3.4に示すネットワークモデルのラプチャディスク部ノード19の上流側における圧力を示している。

同図からは、1枚目ラプチャディスク破裂直後の圧力波形に違いが見られるが、これはラプチャディスク破裂時刻に関係した現象、つまり、ラプチャディスクの早期な破裂による減圧波の影響で、圧力波減衰が早まった結果と考える。それでもピーク圧に関しては、試験(32 kg/cm^2)と解析(

35 kg/cm^2) とで両者良い一致を示している。

1枚ラプチャディスク破裂後から2枚目ラプチャディスク破裂前までの圧力波形については、解析は試験結果より幾分過大評価となっているが、定性的一致は良い。

2枚目ラプチャディスクの破裂時刻については、解析の方が幾分 (4.69 msec) 早く作動しているものの、圧力波形についてはやはり一致がよい。

2枚目ラプチャディスク破裂時のピーク圧については、試験 (25.0 kg/cm^2) に比べ解析 (30.0 kg/cm^2) の方が約 20 % 程大きくなっている。この2枚目ラプチャディスク破裂時の高いピーク圧は、ナトリウムの流入によってガス空間が小さくなりガス圧が高くなつたことによる影響と考える。

・ラプチャディスク間のガス圧力

ラプチャディスク間のガス圧力波形を Fig. 3.8 に示す。1枚目ラプチャディスク破裂時刻 (8.89 msec) までは初期設定ガス圧力 (1.0 kg/cm^2) を示し、破裂後からナトリウムの流入によってガスが圧縮されるため圧力が高くなつてくる様子が見られる。50 msec 付近から圧力が急に高くなっているのは、1枚目ラプチャディスクがこの時までに完全開口し、多くのナトリウムが流入したことによって、ガス圧力が上昇したことに対応する。一方 50 msec 以前についてはさほど圧力上昇が見られないが、これはラプチャディスク破裂後に1枚目ラプチャディスクの弁開口度を考慮して徐々に弁が開くようにした解析モデルに原因している。尚試験では、ラプチャディスク間のガス圧力を測定していないため、実験との比較は行っていない。

(2) SG内

SG内の圧力波形を Fig. 3.9～Fig. 3.11 に示す。太い方から順に試験及び解析結果を示す。

Fig. 3.9 に示す SG 出口部の圧力波形は、ラプチャディスクに近いこともありそこでの圧力波形と相似形となっている。ピーク圧については、試験 (23 kg/cm^2) と解析 (23 kg/cm^2) との一致がよい。ラプチャディスク部の圧力波形でも示されるように、1枚目ラプチャディスク破裂後から2枚目ラプチャディスク破裂前までの圧力波の解析値は、過大評価となる。2枚

目ラプチャディスク破裂後の圧力波形については、解析では破裂直後に負圧となりキャビティが発生しているが、その後の圧力波はやや過大評価となるものの一致は良い。

SG上部プレナム部での圧力波形をFig. 3.10に示す。ピーク圧に関して試験($31\text{kg}/\text{cm}^2$)が解析($25\text{kg}/\text{cm}^2$)を多少上回っている点を除けば、圧力波形はこれまでと同様な傾向を示す。

SG下部プレナム部での圧力波形はFig. 3.11に示す。ここでは上部プレナム部の場合に比べて、ピーク圧に関しての試験($25\text{kg}/\text{cm}^2$)と解析($28\text{kg}/\text{cm}^2$)の一一致が良い。全体的な圧力波形はやはりやや過大評価ぎみとなる。

尚、SG上部・下部プレナム部とともに、ラプチャディスク部で見られたようなディスク破裂時の高いピーク圧の影響は余り顕著でないことがわかる。

(3) 放出系配管内

Fig. 3.12, 3.13には、今回新たにSWACSに追加した解析モデルを使用して得られた計算結果の一例を示す。前者は放出系配管入口部の圧力波形を示し、後者は放出系配管内の界面移動距離の時間的变化を示す。これらの物理量については実験的な測定が無いか、あるいは測定がかなり困難なため、解析との比較はできない。それ故ここでは、物理的な傾向を確認するにとどめる。

Fig. 3.12より、2枚目ラプチャディスクの破裂する約 60msec 以前では、圧力は放出系配管内での初期ガス圧力を示し一定値となるが、ラプチャディスク破裂後は圧力波評価点がナトリウムに覆われるためそこでのナトリウム側の伝播圧力波形が示されている。計算結果からは、ラプチャディスク破裂後に圧力波が急峻に減少し、恐らくそこでキャビティが発生していることが示される。この圧力波の減少はラプチャディスクの瞬時破損による減圧波の影響と考える。その後の圧力波形には大きな変化がみられず、ほぼ一定な値をとっている。

Fig. 3.13では、約 60msec のラプチャディスク破裂時刻の所で気液界面の急峻な移動が見られるが、これは解析モデル上の現象である。つまり、2枚目のラプチャディスクが破裂する直前に、ラプチャディスク間ガスとそ

この流入ナトリウムは圧縮を受け、同時にラプチャディスクは変形され、その変形に見合う分のガスとナトリウムの体積が増加する。この増加分の質量は、ノードに見立てたラプチャディスク部（モデル的には体積ゼロの一つの点に相当）に存在しているとしているため、それらの質量がラプチャディスクの破裂と同時に放出系配管内の入口に流入し、そこを満たすものとして計算を続行している。それ故、ラプチャディスク破裂時に瞬時なナトリウム移動が始まるものである。しかしその後は時間とともに、ゆるやかにナトリウムが移動していく。

(4) 長時間計算

最後に長時間計算（0～300 msec）の一例をFig. 3.14に示す。図は、SG出口部（ノード番号：17）における圧力波形を示す。従来の解析コードではナトリウム－水反応部の計算モデル上の制限により、早い時刻（反応部での気液界面がExtra-Pipeの終端部を越える直前、このケースでは182 msec近辺に相当）で計算がストップし長時間の計算が出来なかった。しかしこの図に示されるように、今回新たに導入した反応部での気液界面の境界移動モデルにより、初期スパイク圧解析での長時間計算（反応部の気液界面がExtra-Pipeの終端を越えた後）も可能となっている。

尚この図からは約127 msecを越えたところで圧力波形に乱れが生じているが、この乱れは反応部での球・柱モデル計算からExtra-Pipeモデル計算（パンケーキモデル計算）への切り換え時刻に対応しており、モデルの切り換えがスムーズに行われてない可能性を示している。解析上は余り好ましい現象ではないが、これは解析結果に特段大きな影響を及ぼすものでは無いと考える。とは言うものの、球・柱モデルからExtra-Pipeモデルへの切り換えについては、今後もう少し詳細に解析モデルを詰めていく必要はあると考える。

1.5 まとめ

LLTR試験結果と改修SWACSによる計算結果との比較検討を行い、SWACSへの追加解析モデルの妥当性を検討した。

ラプチャディスク部の解析機能追加に関しては、圧力波による接液型ラプチャディスクの変形挙動を考慮し、流体とラプチャディスクの相互作用下での圧力波伝播現象を解析できるようにした。その結果、解析では圧力波伝播により時々刻々と変形していくラプチャディスクの挙動が計算され、解析が物理的現象を正確に模擬できていることを確認できた。ラプチャディスク破裂時刻についての試験と解析結果の比較では、解析の方がTable 3.4に示すように幾分早く破裂しているものの、破裂時刻の一致は十分満足のいく結果となっている。ラプチャディスク部での圧力波形については、圧力波のピークとなる所が1枚目と2枚目のラプチャディスク破裂時刻に対応して2箇所現われる。解析による圧力波は、試験を幾分過大評価しているものの、Table 3.5に示すように、ピーク圧を含め全体的な一致は良い。解析での一枚目ラプチャディスク破裂直後に見られる急激な圧力減少はラプチャディスクの瞬時の変形に起因するものであるが、特に問題となる現象では無いと考える。

SG内上部、下部、出口部での圧力波形についても、全体的には試験結果を幾分過大評価しているが、ピーク圧、圧力波形に関しては良い一致を示しているものと考える。特徴的なこととして、SG上部、下部プレナム部での圧力波形にはラプチャディスク部やSG出口部で見られたような2枚目ラプチャディスク破裂時に発生するピーク圧の影響が見られない。

放出系配管については、従来の大気開放モデルを新たに、放出系配管からダンプタンクまでのナトリウム流動・圧力波解析が可能なよう改良した。ナトリウム流動・圧力波形については、試験データが無いため解析との比較は行えなかったが、物理的に妥当と考えられる計算結果が得られた。放出系配管内の気液界面移動距離についても、2枚目ラプチャディスク破裂直後にディスクの変形分に相当するナトリウムを瞬時に移動させている点を除けば、やはり物理的に妥当と考えられる計算結果を得た。

最後に、反応部計算モデルに気液界面の境界移動計算解析機能を持たせたことにより、初期スパイク圧解析においても長時間計算が可能となった。

2 PEPT試験^(8,9)による検証

高速増殖炉の蒸気発生器には有液面型と無液面型とがある。無液面型は有液面型のようなナトリウム自由液面での圧力波の散逸効果が期待できいため、伝播圧力波は有液面型に比べ、場所によっては波高値が相対的に高くなる事が予想される。

PEPT試験ではFBR実証炉設計例である2次冷却系の縮尺試験装置（水ループ）を製作し、低爆速火薬を用いてナトリウム－水反応による初期スパイク圧を模擬し、主に無液面型を対象に伝播圧力波を調べた。本試験データは、SWACSコードが無液面型解析ツールとしても十分適応可能なことの検証用データとして使用された。

2.1 装置の概要

試験装置はFBR実証炉設計例の2次主冷却系を模擬したもので、1/5スケールにて製作した。試験装置の鳥瞰図をFig. 3.15に示し、装置の系統図をFig. 3.16に示す。本装置は蒸気発生器（SG）、中間熱交換器（IHX）、膨張タンクおよび2次冷却系配管よりなる実証炉の2次系を模擬した部分と、空気分離器、真空ポンプ、循環ポンプ、配管、弁よりなる脱ガス部および試験体中にカバーガスを供給するための加圧部により構成されている。本装置の主要材料は炭素鋼であり、試験で発生させる最大圧力波高値40kg/cm²g（持続時間；20msec）に対応して、室温にて静圧40kg/cm²gに耐え得る構造とした。SGには反応点の位置を変えられるように、軸方向に3つのフランジ型の火薬搬入口（ハッチ）を設けた。また将来、内部構造物を挿入可能なようにSG上部はフランジ構造とした。IHXは実機の2次流路断面積を縮尺模擬した。各機器の主要項目をTable 3.6(a), (b)に示す。

2.2 試験の概要

PEPT試験シリーズIでは、SG内液面の有無、圧力開放系取付位置、SG内発生圧力波形等をパラメータとし、合計約30ケースの試験を実施した。ここで検証は主にSWACSコードの無液面体系での圧力波伝播解析能力の妥当性を確認する事を目的としているため、ループ内で付加的な誤差となると考えられる要因（主にキャビティ発生の要因）を排除した試験ケース（SB41）を検証データに引用した。よって今回の試験ケースでは、ループにはキャビティの発生に寄与すると考えられるラブチャディスク、Tピース、SG内構造物等を設置していない。

尚試験では、SG本体下端より0.95mの高さで20kg/cm²gの圧力波を水中爆速火薬により発生させている。

2.3 検証計算モデル

(1) 計算体系

PEPT試験の計算モデルをFig. 3.17に示す。図の計算モデルでは、SG内やIHXは1本の配管で模擬した簡単な体系としている。反応点はSG本体下端より0.95mの高さとなっており、モデル上はノード番号：17に対応している。膨張タンクのガス圧は、実際の試験と同じく無加圧状態の0kg/cm²gとした。

(2) 発生圧力波形

PEPT試験では火薬によって圧力波を発生させている。この試験での反応部発生圧力波形をノード番号：17における入力値とした。本検証計算用の入力圧力波形をFig. 3.18に示す。

2.4 検証結果及びまとめ

試験と解析結果の圧力波形の比較をFig. 3.19に示す。図からは、SG内、ホットレグ、コールドレグとも伝播圧力波形は、よく一致している。SG上部配管については、やや過小評価となっているがピーク圧に関しては実験と解析の一一致は良い。IHX部については、解析結果の方が試験結果に比べ圧力波の立ち上がりが幾分早いが、ピーク圧および圧力波形は十分満足のいく結果となっている。

以上の試験・解析結果との比較から、SWACSコードの無液面体系での伝播圧力波解析能力の妥当性の確認という観点では、SWACSコードが無液面型SG体系にも十分適応可能であることが確認できた。

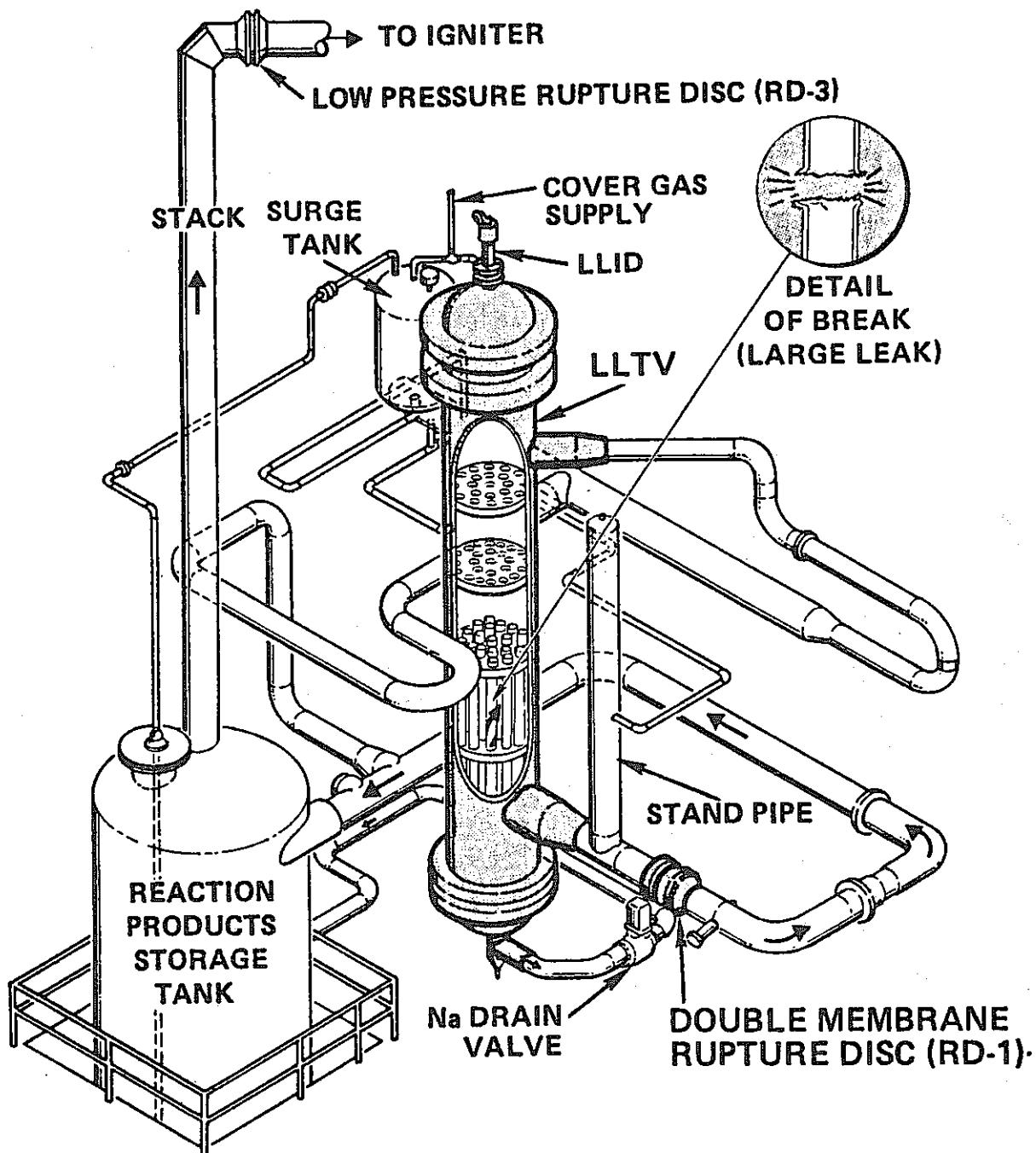


Fig. 3.1 LLTR試験装置鳥瞰図

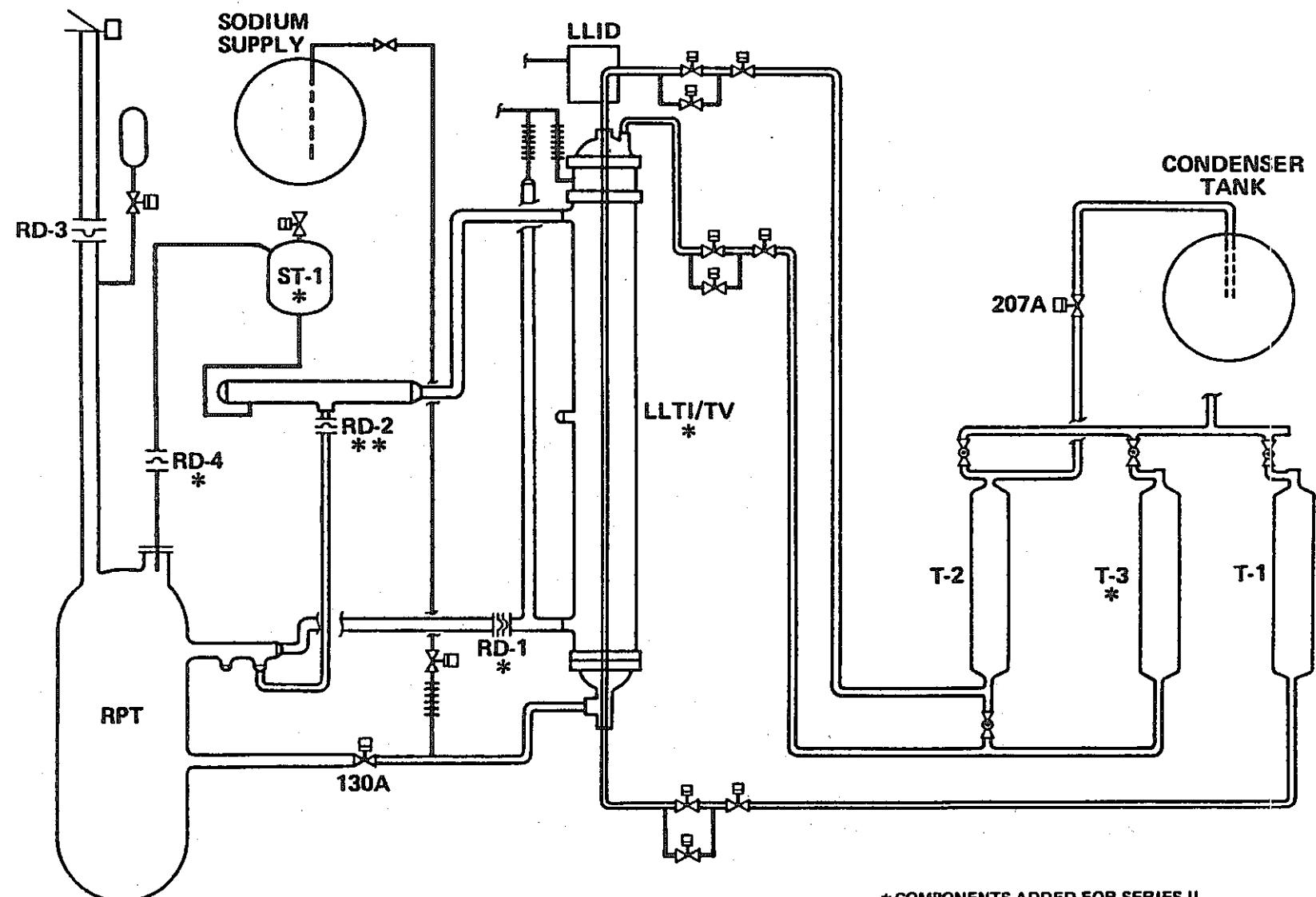


Fig. 3.2 LLTR試験装置系統図

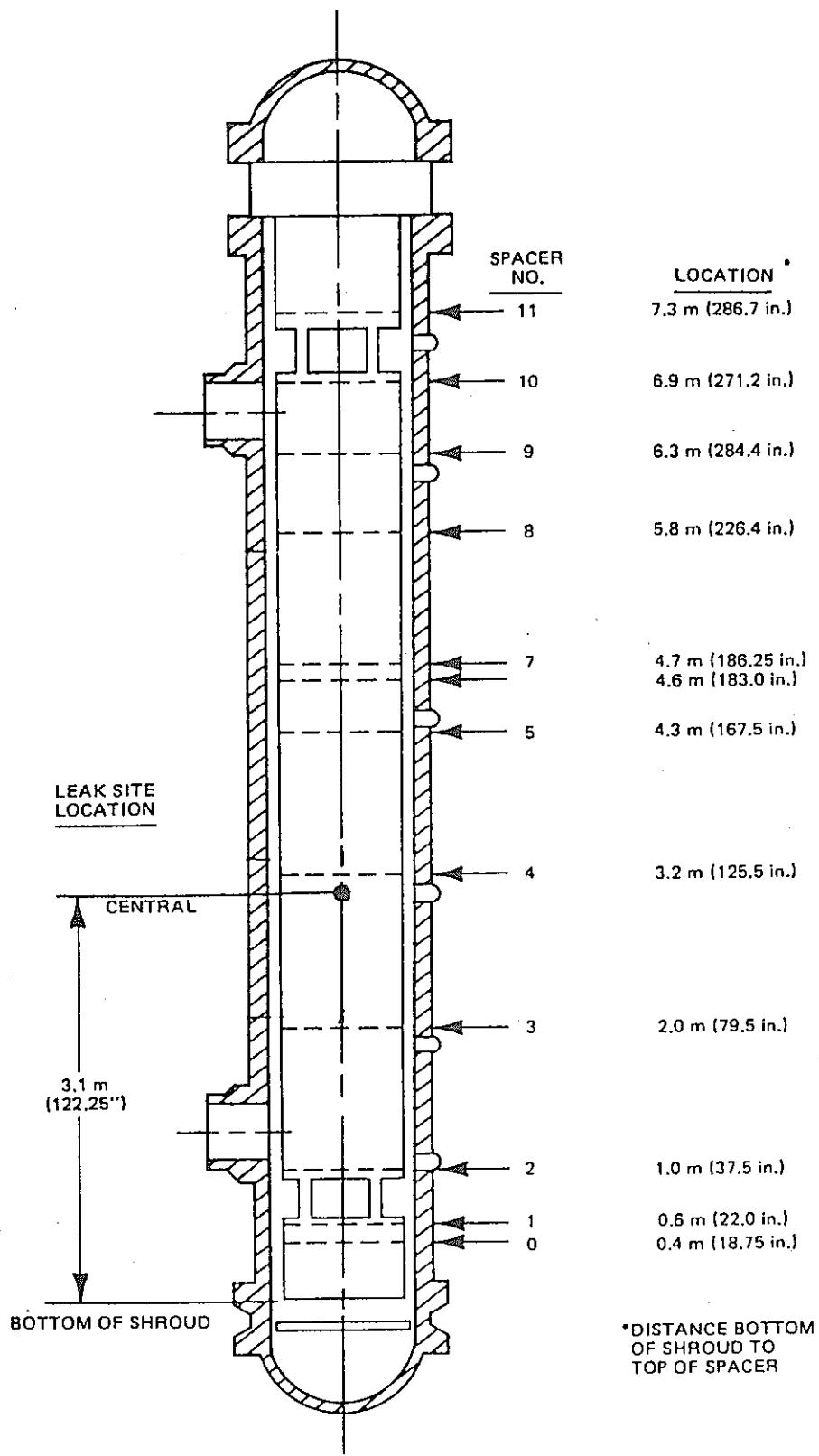


Fig. 3.3 LLTR試験水リーク発生位置

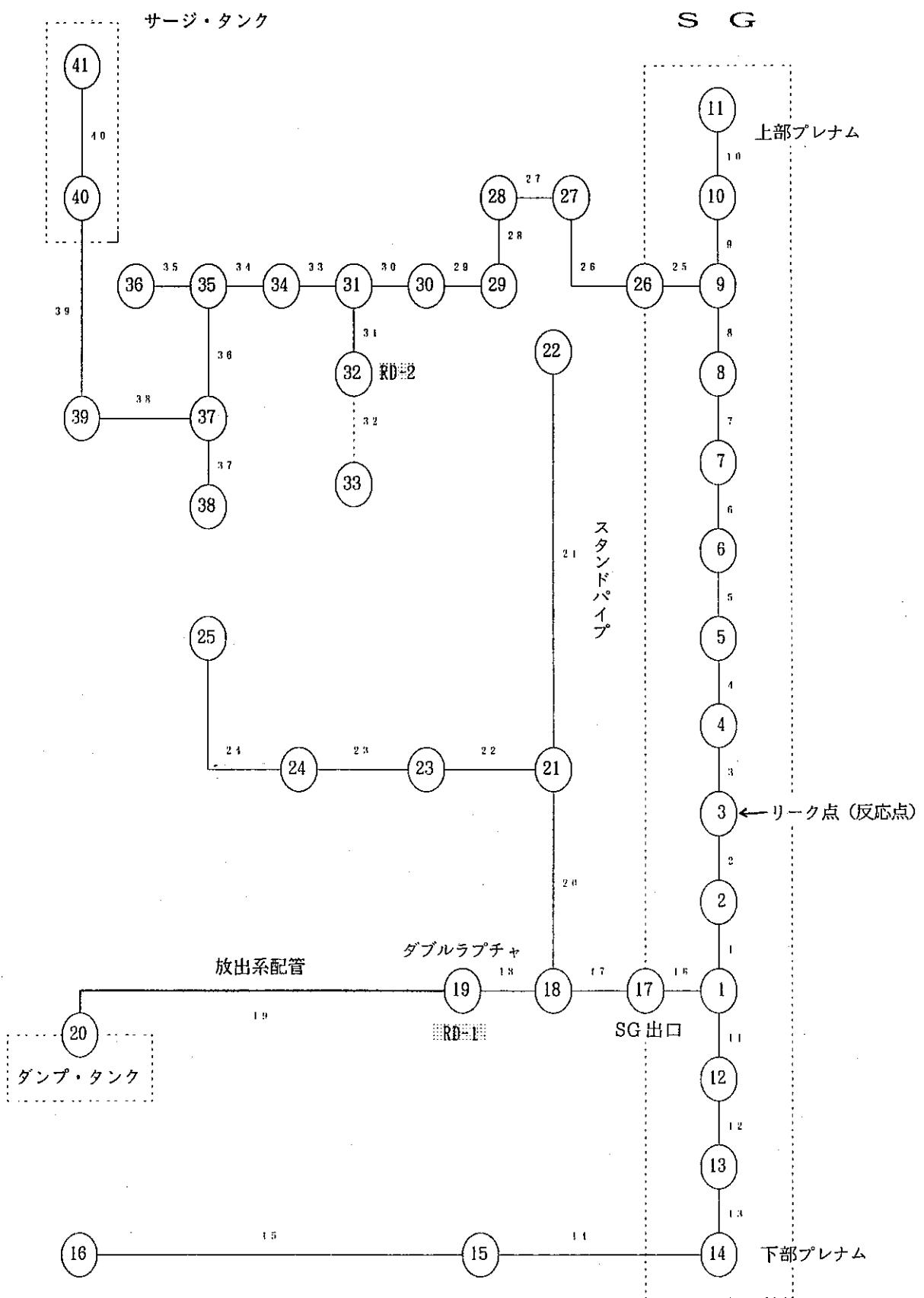


Fig. 3.4 LLTR試験装置ネットワークモデル図

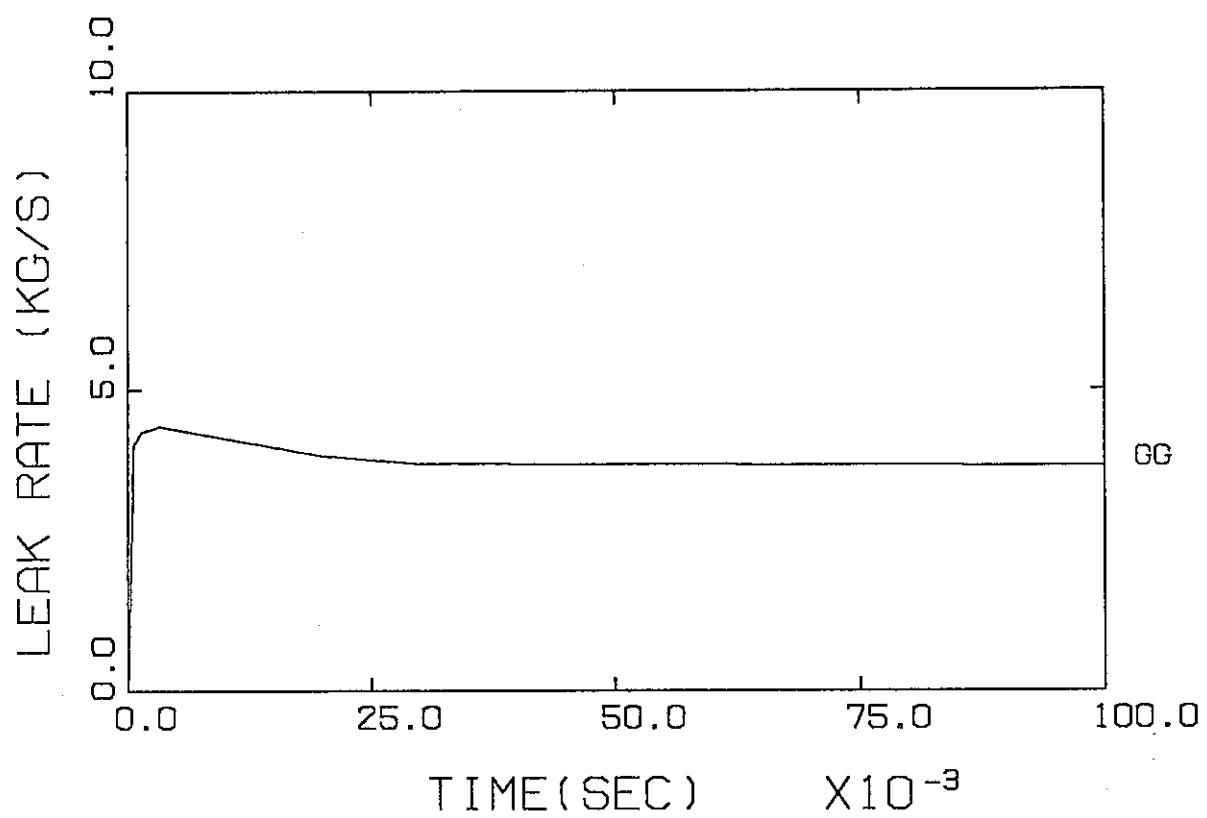


Fig. 3.5 LLTR試験入力水リーク率

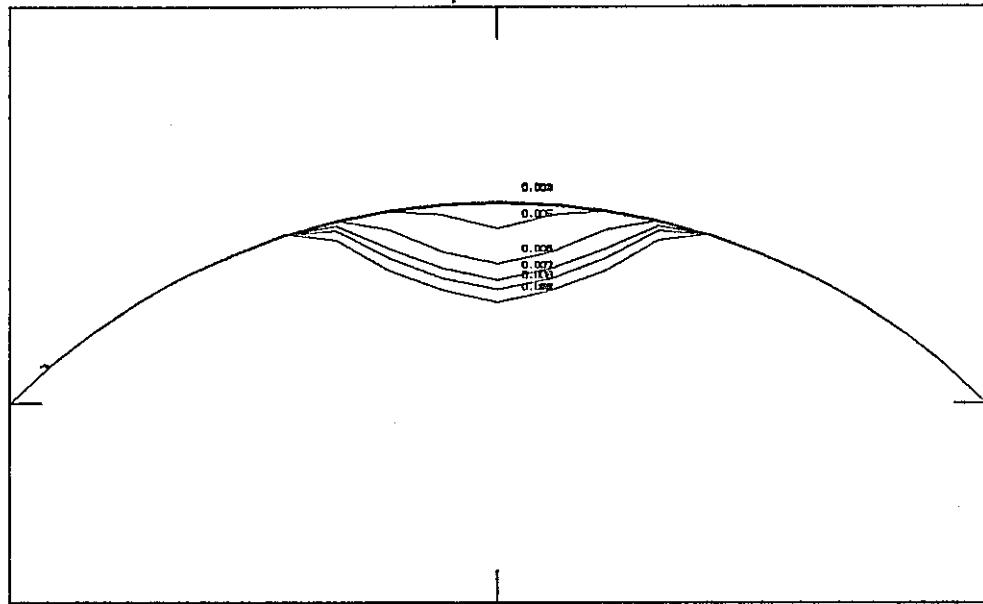


Fig. 3.6(a) 1枚目ラップチャディスクの変形挙動

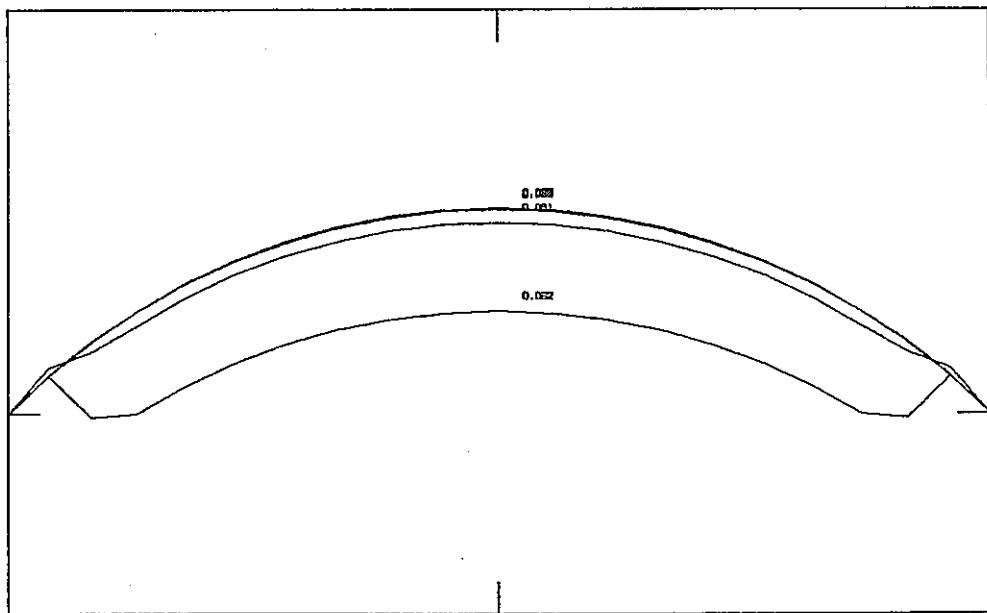


Fig. 3.6(b) 2枚目ラップチャディスクの変形挙動

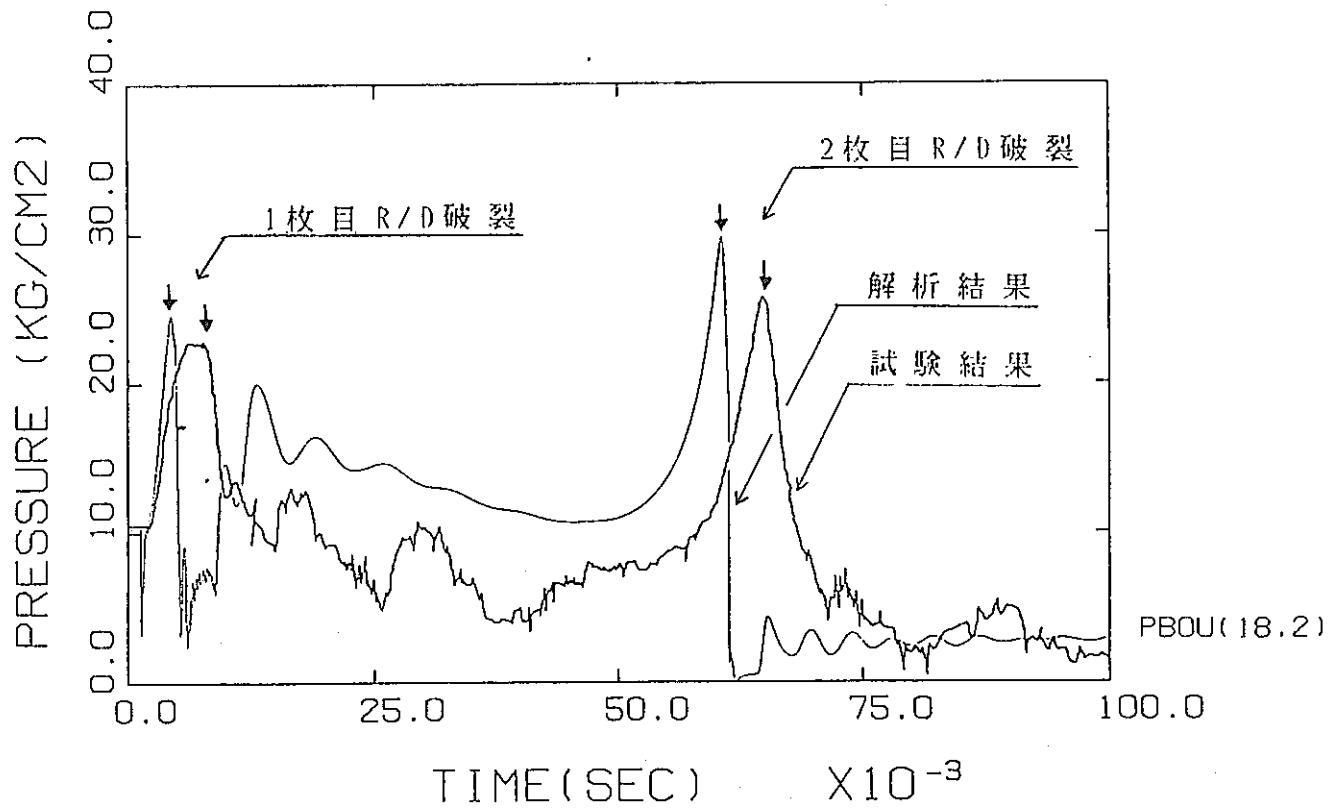


Fig. 3.7 ラプチャディスク部での圧力波形

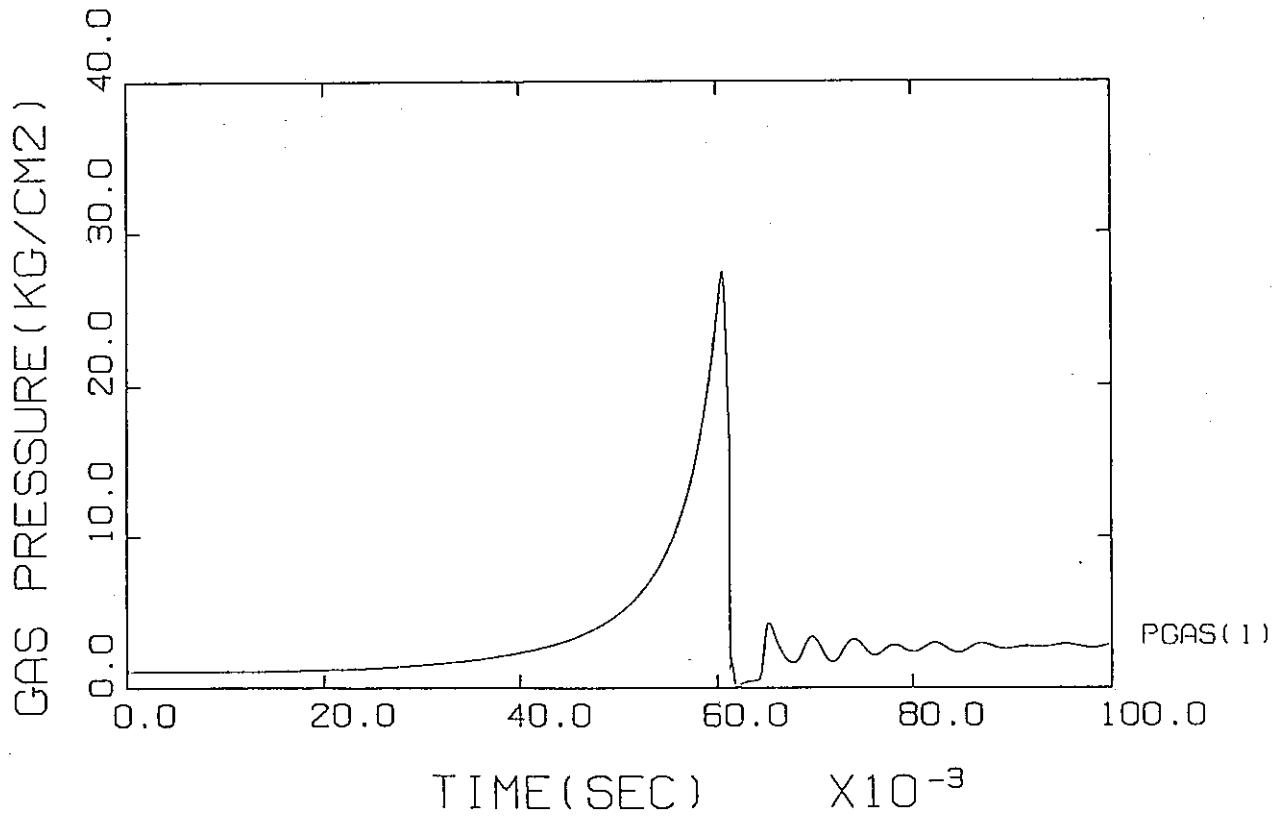


Fig. 3.8 ラプチャディスク間でのガス圧力

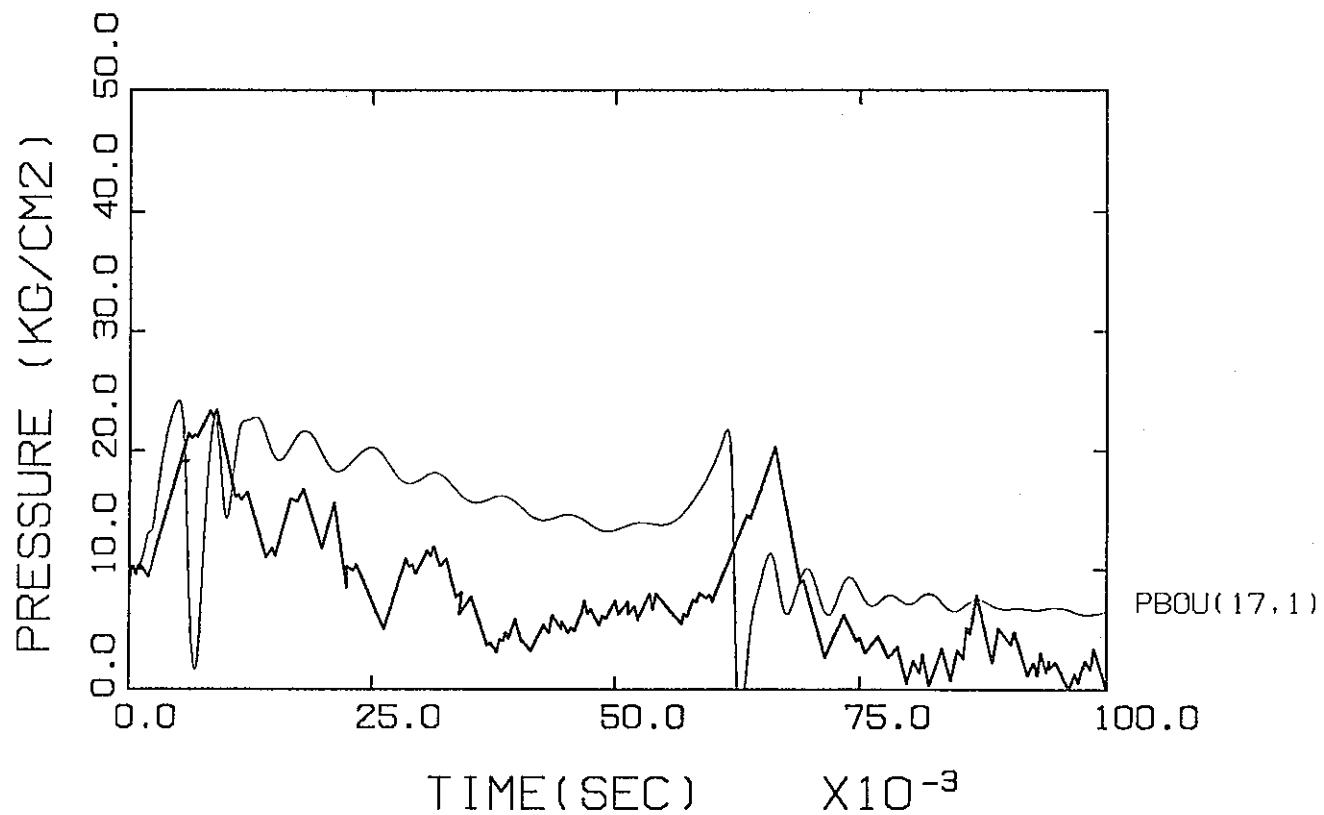


Fig. 3.9 SG出口部での圧力波形

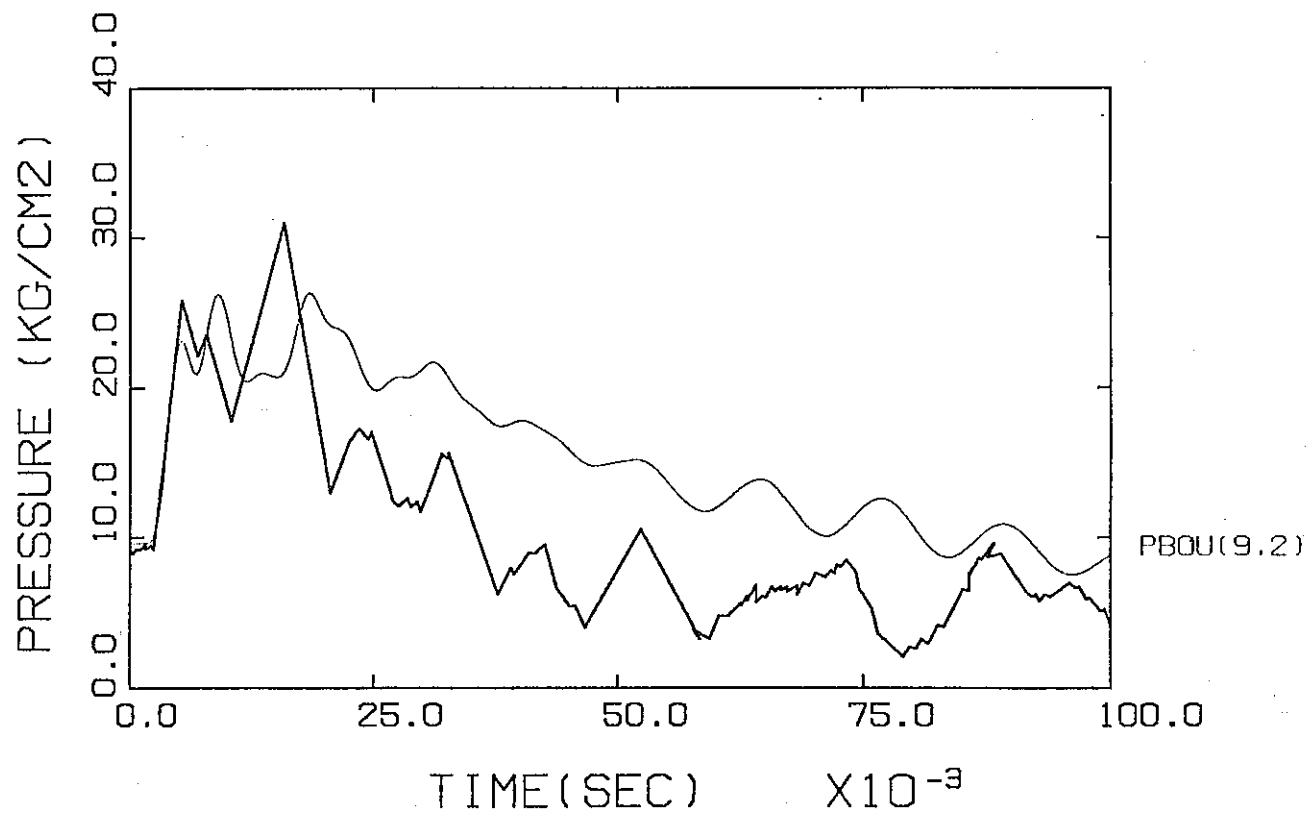


Fig. 3.10 SG上部プレナム部での圧力波形

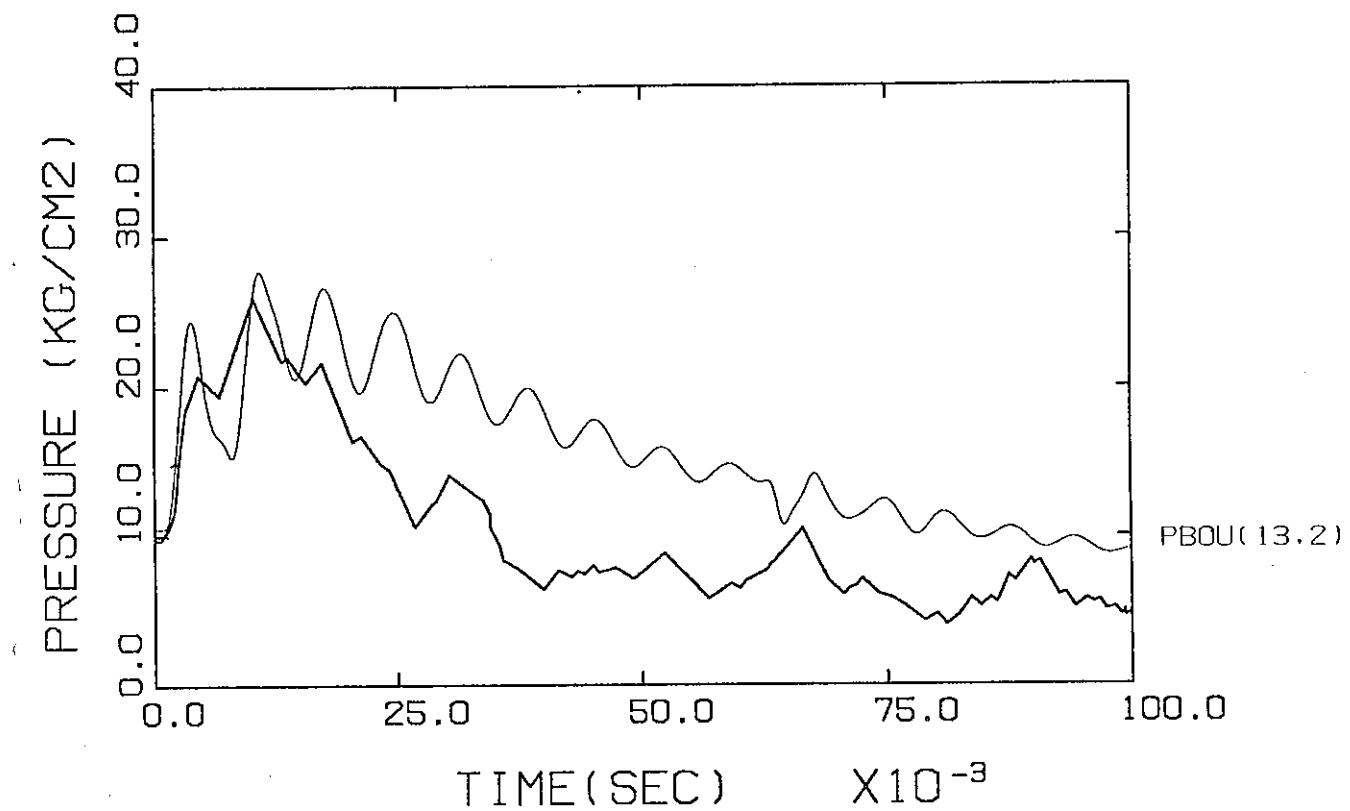


Fig. 3.11 SG下部プレナム部での圧力波形

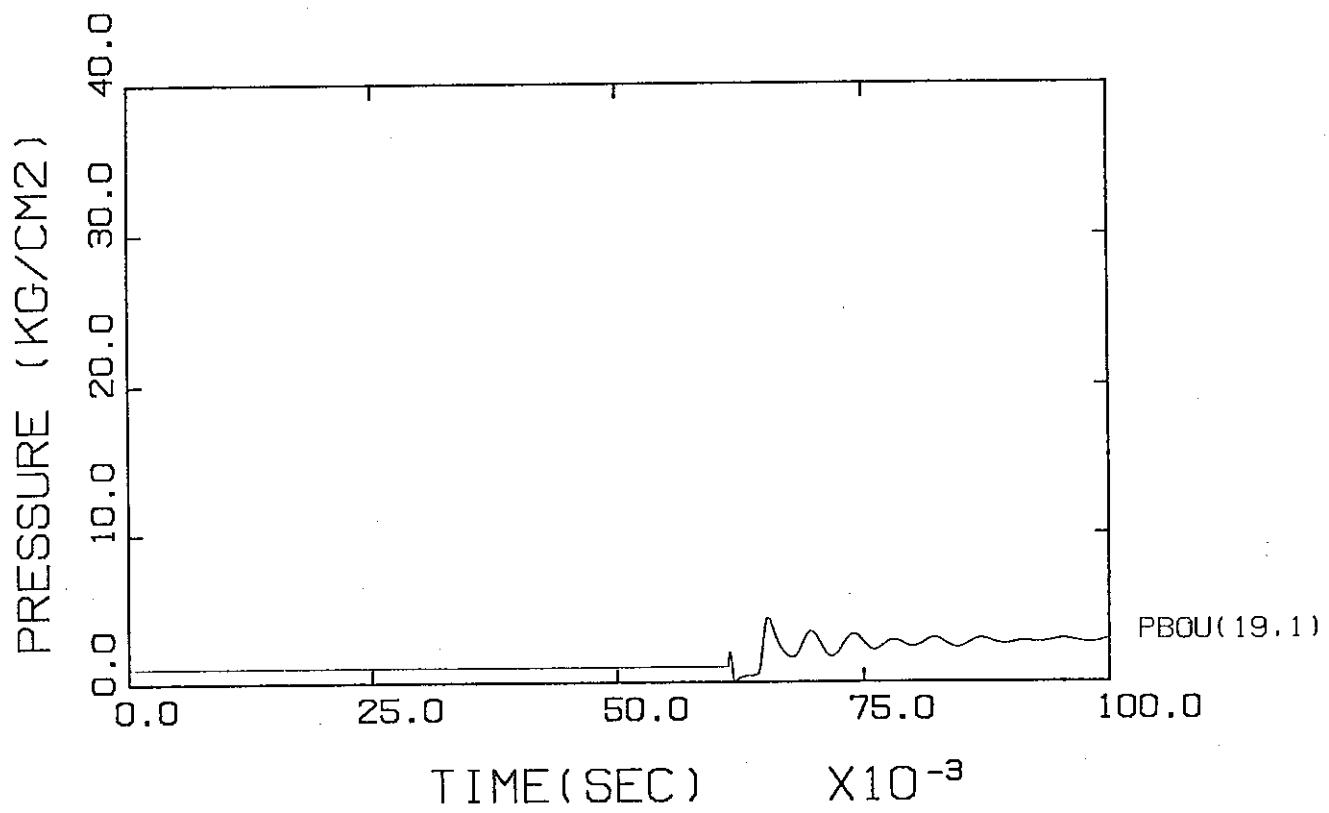


Fig. 3.12 放出系配管入口での圧力波形

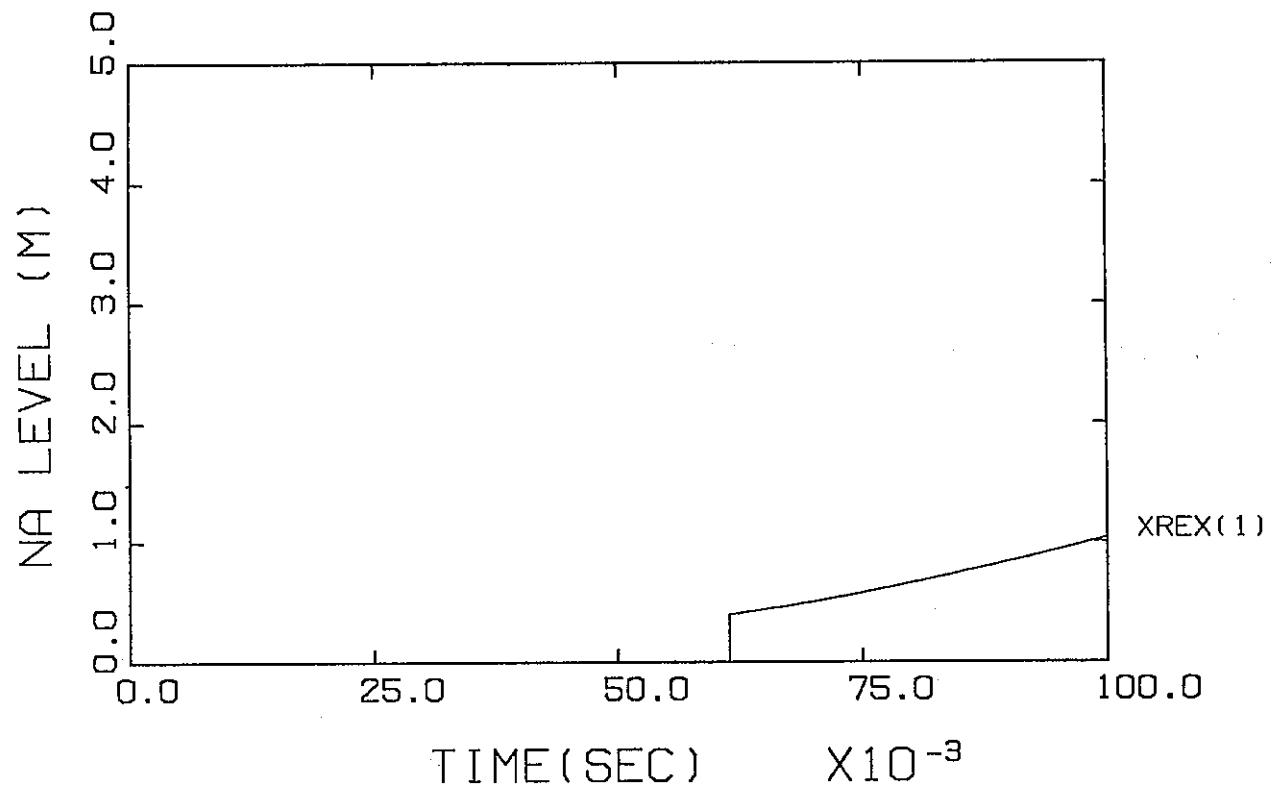


Fig. 3.13 放出系配管内の界面移動距離

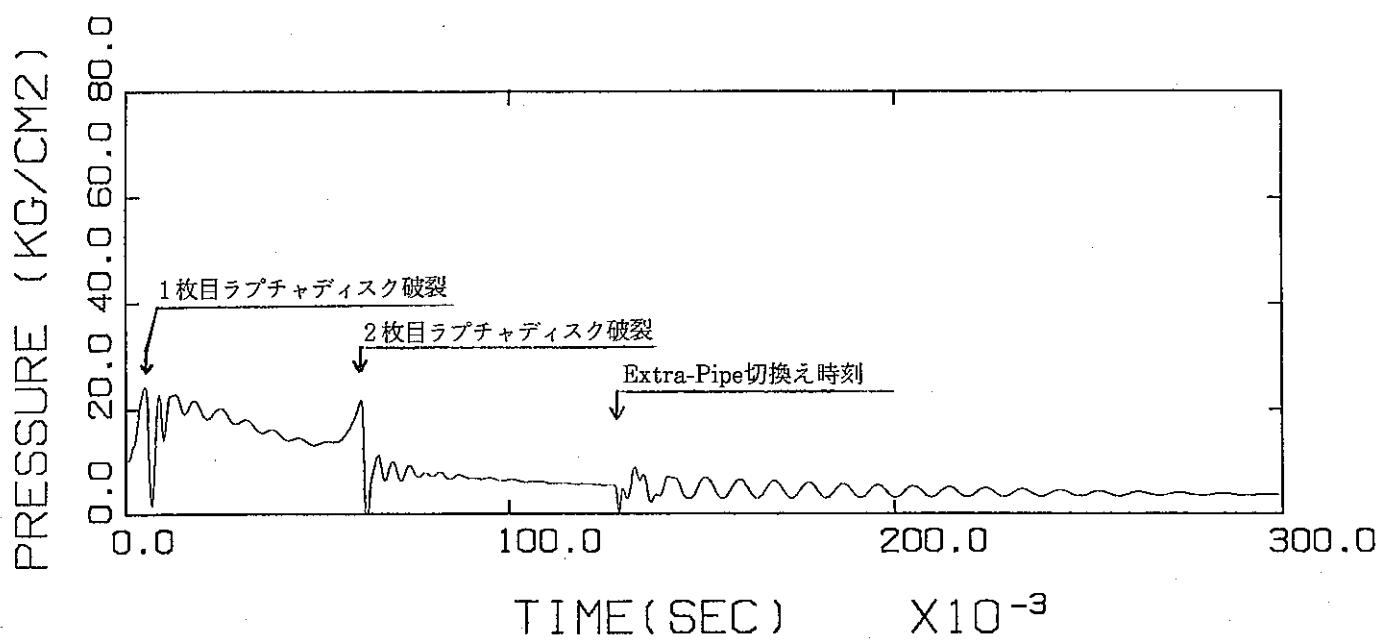


Fig. 3.14 初期スパイク圧長時間計算の例

P; Pressure
A; Acceleration
S; Strain

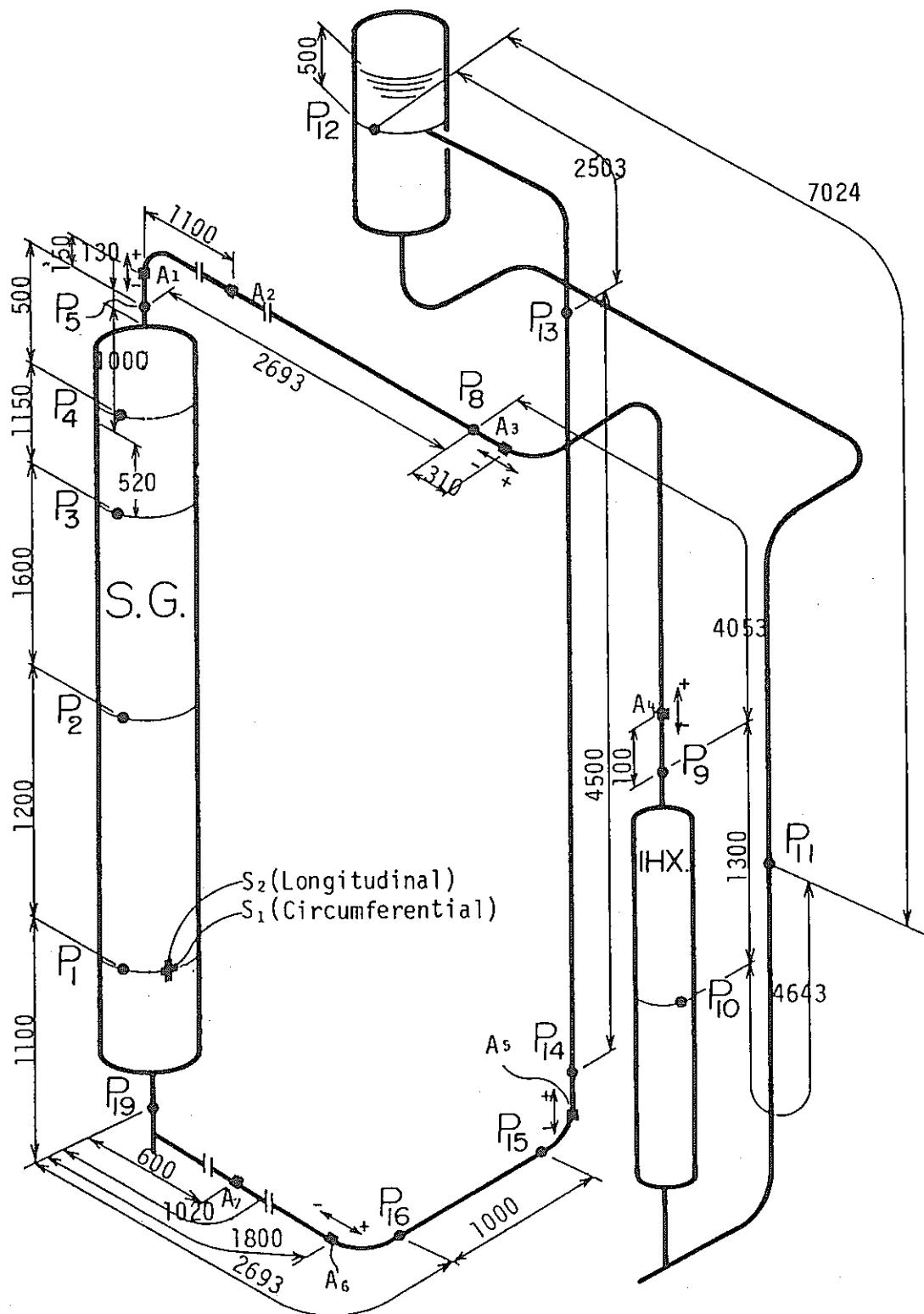
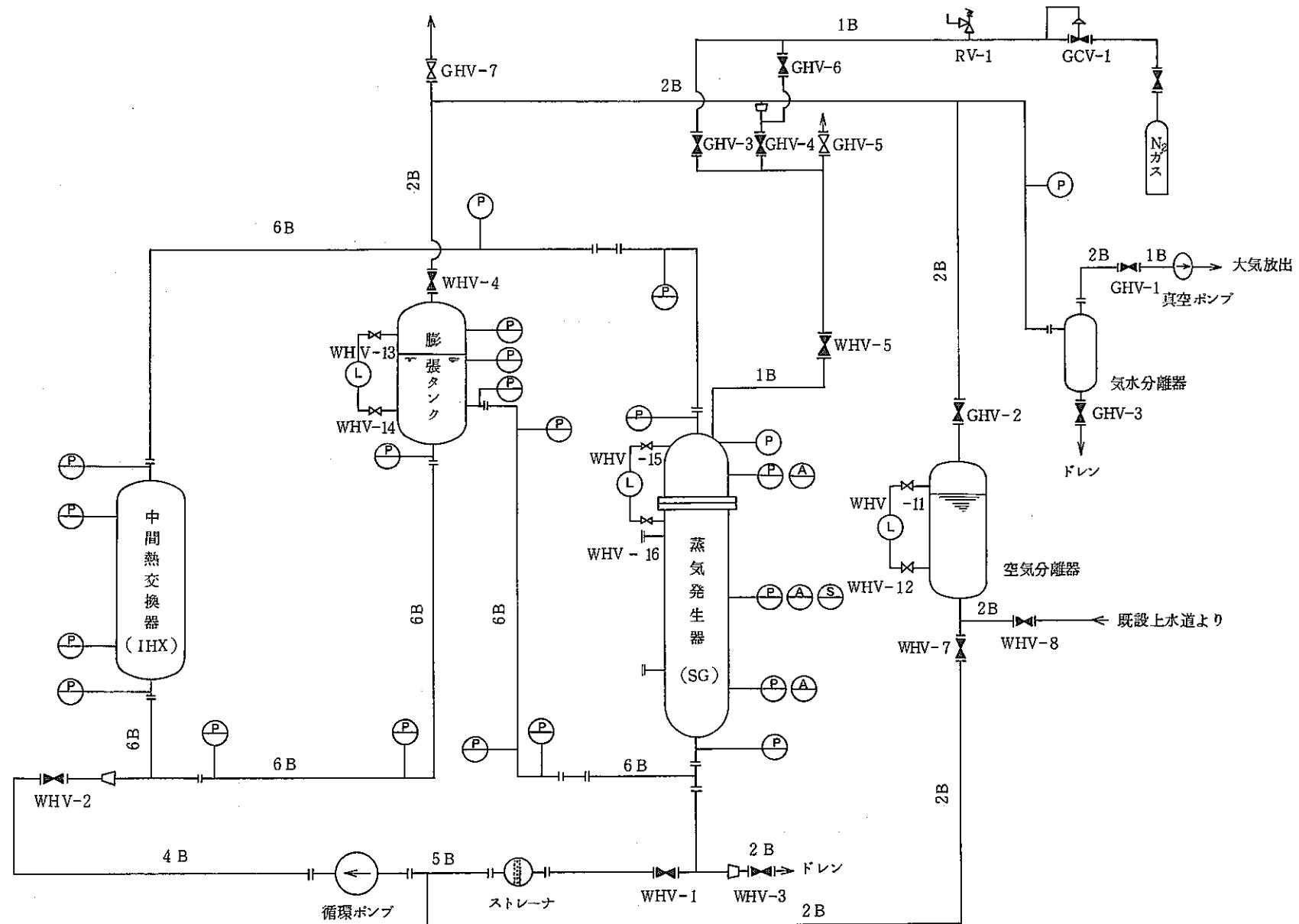


Fig. 3.15 PEPT試験装置鳥瞰図



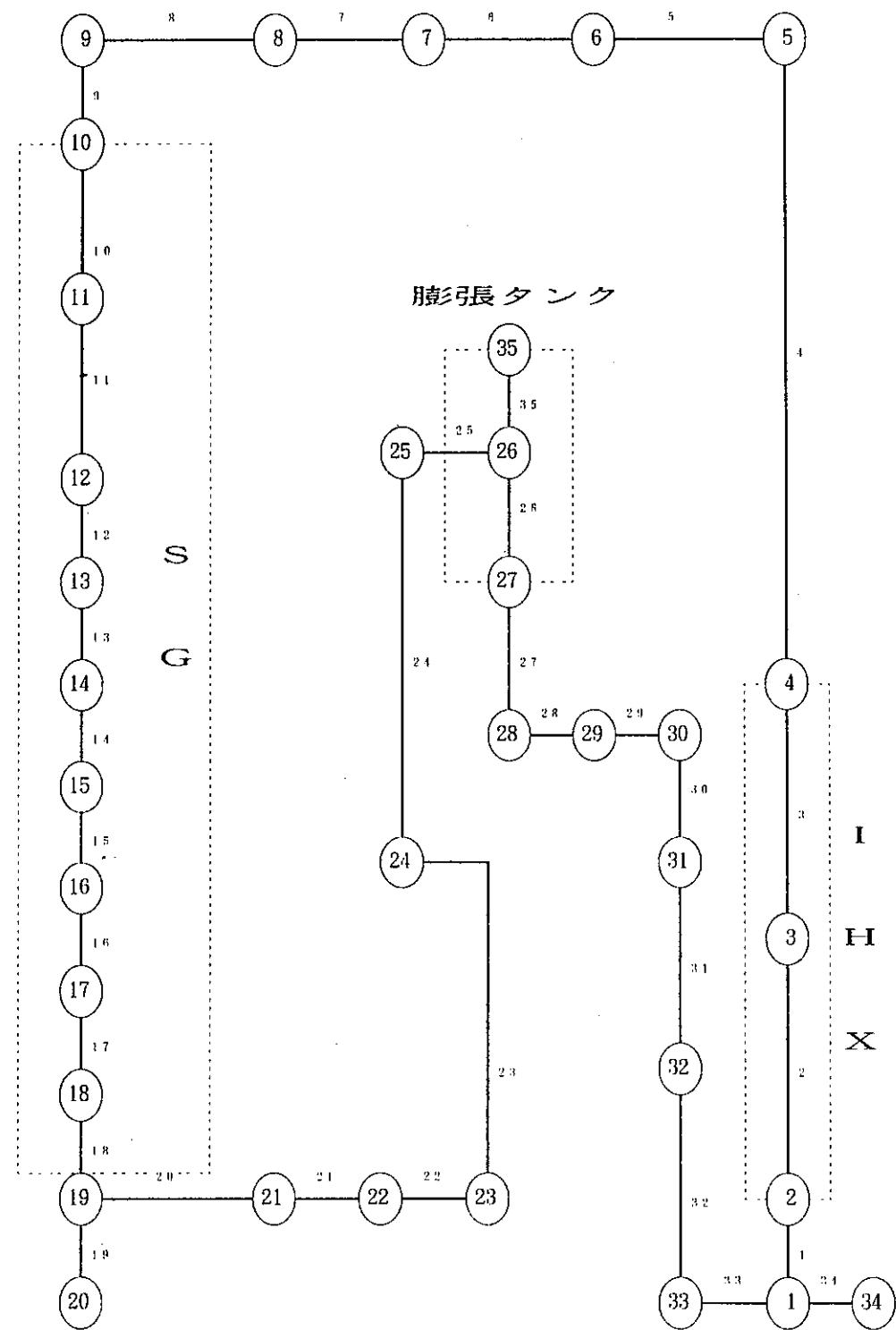


Fig. 3.17 PEPT試験装置ネットワークモデル図

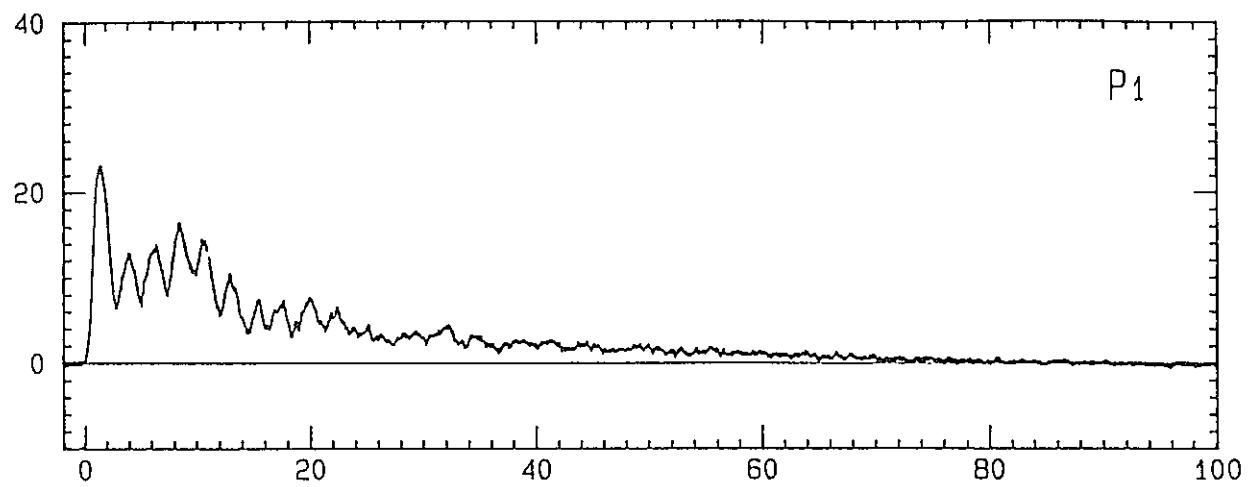


Fig. 3.18 PEPT試験反応点の入力圧力波形

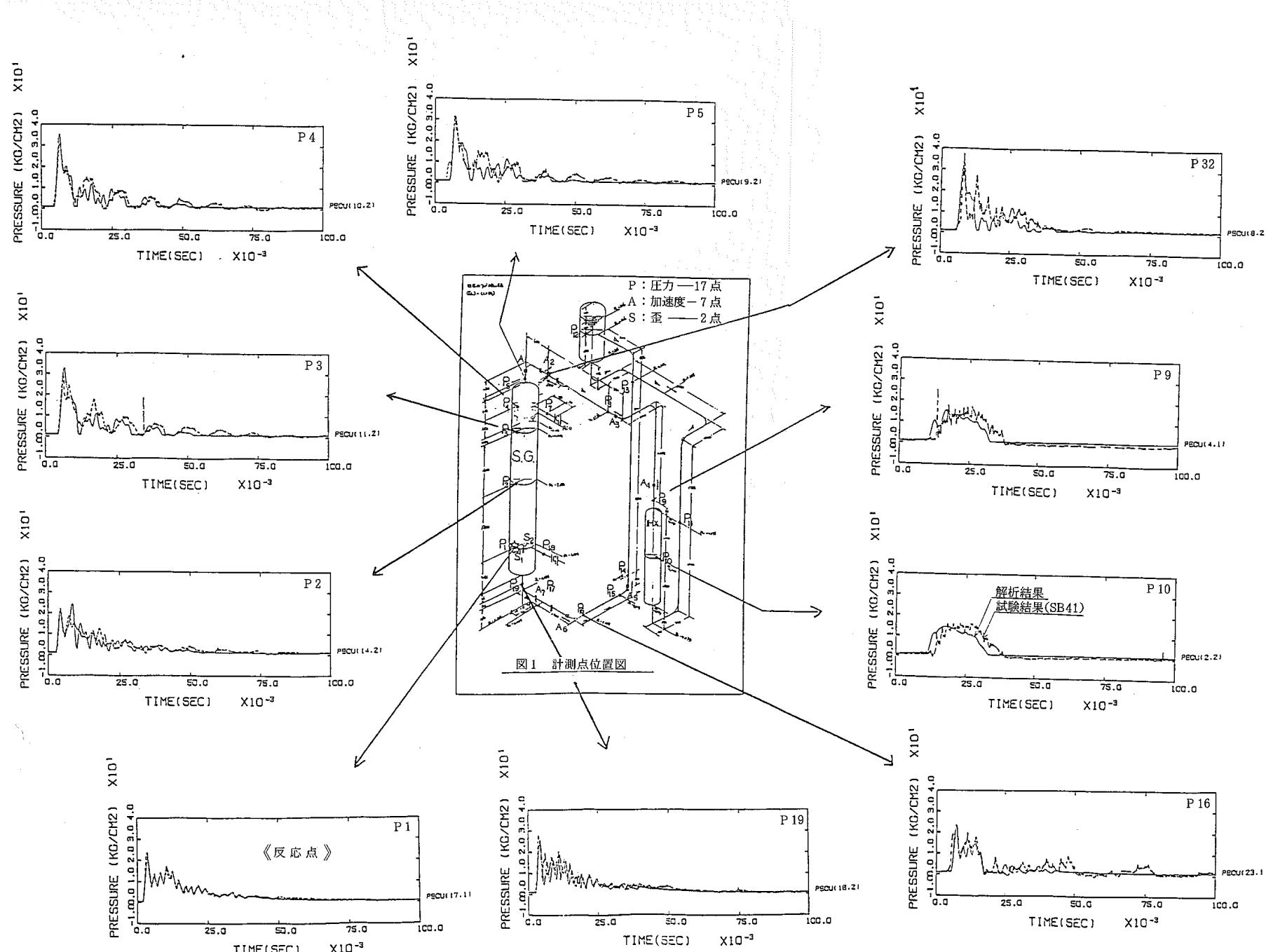


Fig. 3.19 PEPT試験ループ内伝播圧力波形

Table 3.1 ラプチャディスクの主要諸元

ラプチャディスクの曲率半径（1枚目）	0.332	m
"　　(2枚目)	0.332	m
ラプチャディスクの直径（1枚目）	0.457	m
"　　(2枚目)	0.457	m
ラプチャディスクの厚さ（1枚目）	1.524	mm
"　　(2枚目)	1.524	mm
ヤング率（1枚目）	20064.2	kg/mm ²
"　　(2枚目)	20064.2	kg/mm ²
ボアソン比（1枚目）	0.28	
"　　(2枚目)	0.28	
接線係数（1枚目）	200.642	kg/mm ²
"　　(2枚目)	200.642	kg/mm ²
ラプチャディスクの密度（1枚目）	8286.0	kg/m ³
"　　(2枚目)	8286.0	kg/m ³
ラプチャディスクの最大変位（1枚目）	0.0476	m
"　　(2枚目)	0.0476	m
ラプチャディスクの設計降伏点（1枚目）	36.868	kg/mm ²
"　　(2枚目)	36.868	kg/mm ²
ラプチャディスクの設計引っ張り強さ（1枚目）	65.309	kg/mm ²
"　　(2枚目)	65.309	kg/mm ²
ラプチャディスク間のガス圧力	1.0534	kg/cm ² a
2枚目ラプチャディスク後の背圧	1.0	kg/cm ² a
ラプチャディスク間のガス体積	0.0566	m ³
ラプチャディスク間のガス比熱比	1.670	

Table 3.2 LLTR試験条件及び試験結果の概要

Test No.	UNITS	A-2
Test Date		2/05/80
Leak Size (initial)		1-DEG
Leak Fluid		H ₂ O subcooled
Leak Location (Above Bottom of LLTI Shroud)	meters (inches)	3.11 (122.25) center tube
<u>PRETEST CONDITIONS</u>		
NA Temperature	°C (°F)	304. (580)
NA Pressure	MPa (PSIA)	0.96 (140)
Primary Tube H ₂ O Pressure	MPa (PSIA)	11.8 (1715)
Primary Tube Flow	Kg/sec (#/sec)	0.132 (~0.3)
Second ARY Tube Pressure	MPa (PSIA)	11.8 (1715)
<u>TEST RESULTS</u>		
Steady State Leak Injection Rate	kg/sec (#/sec)	(5.0) 2.3
Leak Injection Duration	seconds	40
Maximum Leak Site Pressure	MPa (PSIA)	2.7 (390)
Maximum Reaction Temperature	°C (°F)	1204 (2200)
Rupture Disc Burst Pressure (Upstream/Downstream)	MPa (PSIA)	2.27/2.56 (330/370)
Rupture Disc % Opening (Upstream/Downstream)	%	60/60
Time to Disc Rupture (Downstream)	seconds	0.062
<u>TUBE DAMAGE</u>		
Secondary Tube Leaks	No of Tubes	none
Tube Deformation, Maximum	mm (inches)	11.7 (0.46)
Tube Wastage (Secondary Tubes)	mm (inches)	0.1 (0.004)
<u>STACK EFFLUENT</u>		
Average Downwind Deposition Rate	mg NaOH/cm-day	3.1x10 ⁻⁵

Table 3.3 LLTR試験装置の主要諸元

No.	部材長さ(寸)	等価直径(寸)
1	0.71	1.1271
2	1.12	1.1271
3	0.66	1.1271
4	0.66	1.1271
5	0.92	1.1271
6	0.92	1.1271
7	0.56	1.1271
8	0.56	1.1271
9	1.21	1.1271
10	0.67	1.1271
11	0.26	1.1271
12	1.13	1.1271
13	0.67	1.1271
14	1.25	0.1830
15	1.00	0.1830
16	1.30	0.3876
17	1.09	0.3876
18	0.90	0.3876
19	0.20	0.0040
20	2.30	0.0334
21	3.20	0.0334
22	2.64	0.1170

No.	部材長さ(寸)	等価直径(寸)
23	2.64	0.1170
24	2.64	0.1170
25	1.19	0.4190
26	3.49	0.2340
27	3.49	0.2340
28	3.49	0.2340
29	2.29	0.3990
30	2.29	0.3990
31	0.38	0.3990
32	0.20	0.0040
33	1.30	0.3990
34	1.30	0.3990
35	0.31	0.3990
36	0.53	0.1170
37	0.15	0.1170
38	3.74	0.1170
39	3.74	0.1170
40	0.20	0.0040
41	1.99	1.0160
42		
43		
44		

Table 3.4 ラプチャディスク作動時刻の比較

	L L T R 試験	S W A C S 解析
1 枚目	7.81 msec	4.47 msec
2 枚目	66.0 msec	61.3 msec

Table 3.5 発生最高圧力波高値

単位 : kg/cm²・a

場 所	No.	S W A C S 解析	L L T R 試験
S G 上部プレナム	9	25.3	31.0
S G 下部プレナム	13	27.7	25.0
S G 出口	17	24.2	23.0
ラプチャディスク部	18	30.0	25.0

Table 3.6(a) PEPT試験装置の主要仕様（その1）

Items	Specifications	
1. Steam Generator		
Design Pressure	40 kg/cm ² .g	
Design Temperature	50°C	
Coolant	Water	
Material	SB 42	
Dimension	I/D 700×height 5150	
2. Intermediate Heat Exchanger		
Design Pressure	40kg/cm ² .g	
Design Temperature	50°C	
Coolant	Water	
Material	STPG 38	
Dimension	I/D 330×height 2500 (14B sch 40)	
3. Expansion Tank		
Design Pressure	40 kg/cm ² .g	
Design Temperature	50°C	
Coolant	Water	
Material	SB 42	
Dimension	I/D 700×height 1600	
4. Deaerator		
Design Pressure	Inner Pressure 2 kg/cm ² .g Outer Pressure 1 kg/cm ² .g	
Design Temperature	50°C	
Coolant	Water	
Material	SS 41	
Dimension	I/D 700×height 2000	

Table 3.6(b) PEPT試験装置の主要仕様（その2）

Items	Specifications
5. Secondary Loop	
Material	STPG 38
Outer Diameter×Thickness	165.2mm×7.1mm 6B sch 40
6. Pump	
Type	Single stage, Single suction, Volute
Head	10 m
Flow Rate	2.5 m³/min
Diameter	Suction : 125 mm Discharge : 100 mm
Revolution	1480 rpm
Rated Power	5.5 kW
7. Vacuum Pump	
Type	Oil Type
Discharge Rate	320 ℥ /min
Vacuum Pressure	2.7×10^{-2} Pa
Rated Power	0.75 kW
Revolution	1200 rpm
Diameter	suction 1 B exhaust 1½ B

IV 結 論

大リーグ・ナトリウム-水反応時の初期スパイク圧・圧力波伝播計算モデルへの機能追加を行い、米国LLTR試験およびPEPT試験結果と解析結果の比較検討を行い、本コードへの機能追加モデルの妥当性の検証を行った。改造の主な内容を以下に記す。

(1) ラプチャディスク解析モデルの組込み

従来のシングルラプチャディスク解析(RDZERO)に、圧力波によるラプチャディスクの弾・塑性変形を考慮し、流体とディスクの相互作用下における圧力波挙動を解析するモデル(RDSNGL)を組込んだ。

新たな機能として、ダブルラプチャディスクの取り扱いを可能とした。ここでは、2枚のラプチャディスクの変形を考慮し、流体及びディスク間ガスの相互作用下における圧力波挙動を解析できるモデル(RDDOBL)を組んだ。

(2) 界面移動モデルの開発

従来のBTM計算法を高度化し、気泡界面が分岐点や断面積変化などの境界を移動できるようにした。

更に放出系配管をもモデル化できるようにし、放出系配管内での界面移動計算モデル(HBOUNM)を組んで、圧力波伝播も解析できるようにした。

以上の改造を行いコードの検証をした。次にその結果を要約する。

(3) ラプチャディスク解析モデルについて

ラプチャディスク破裂時刻についての比較では、解析の方が幾分早く破裂しているものの、破裂時刻の一致は十分満足のいく結果となっている。ラプチャディスク部での圧力波形については、圧力波

のピークとなる所が1枚目と2枚目のラプチャディスク破裂時刻に対応して、2箇所現われる。解析による圧力波は、試験を幾分過大評価しているものの、ピーク圧を含め全体的な一致は良い。ラプチャディスクの変形挙動については、解析では圧力波伝播により時々刻々と変形していくラプチャディスクの挙動が計算され、解析が物理現象を矛盾なく模擬できていることを確認できた。

(4) 界面移動モデルの開発について

(a) 放出系配管内のナトリウム流動、圧力波形、気液界面移動距離については、試験データが無いため解析との比較は行えなかつたが、物理的に妥当と考えられる計算結果が得られた。

(b) ナトリウム－水反応部計算モデルに気液界面の境界部移動解析機能を持たせたことにより、初期スパイク圧解析においても長時間の計算が可能となった。

(c) 無液面体系を伝播する圧力波の検証では、試験と解析で圧力波形やピーク圧のよい一致が得られたことから、解析コードが無液面型SG体系にも十分適応可能であることが確認できた。

V 参考文献

- (1) 三宅, 進藤, 佐藤, 「大リーグ・ナトリウム-水反応解析コード
- SWACS / REG 3 - (概要説明書)
- 大リーグ・ナトリウム-水反応解析(第3報・改訂版) -」,
PNC SN952 79-19, 1979年9月
- (2) 三宅, 進藤, 佐藤, 「大リーグ・ナトリウム-水反応解析コード
- SWACS / REG 3 - (使用説明書)
- 大リーグ・ナトリウム-水反応解析(第7報) -」,
PNC SN952 79-20, 1979年9月
- (3) 「要素技術設計研究(Ⅱ)大型化に関する設計研究に伴う設備設計役務(2)
- 2次熱輸送系設備等 -」, PNC SJ2124 86-009(2), 1986年3月
- (4) 田辺, 鈴木, 「無液面型及び有液面型蒸気発生器の大リーグ・ナトリウム-
水反応事象評価 - 大リーグ・ナトリウム-水反応解析(第15報) -」,
PNC SN9410 87-037, 1987年4月
- (5) 田辺, 鈴木, 橋本, 「無液面型及び有液面型蒸気発生器の大リーグ・
ナトリウム-水反応事象評価(Ⅱ) - 大リーグ・ナトリウム-水反応解析
(第16報) -」, PNC SN9410 88-068, 1988年4月
- (6) "U.S. PAPERS for the SECOND JOINT U.S./JAPAN LMFBR STEAM GENERATOR
SEMINAR", CONF-810615 VOLUME 1, June 1981
- (7) W. J. Freede, H. H. Neely, "LLTR Series II Test A-2 (Part I) Report"
ETEC-TDR-80-6
- (8) 坂野, 清水, 吉江, 岩崎, 進藤, 藤井, 「圧力波拳動測定試験」,
PNC SJ9055 88-003(1), 1988年8月

- (9) 「圧力波挙動測定試験 データ集」, PNC SJ9055 88-003(2), 1988年8月
- (10) 三宅, 「S W A C S 初期スパイク圧計算モジュールの反応部成長モデルの改造: (1) 計算手法の検討」, P 安室内メモSC-82-18, 1982年6月
- (11) 三宅, 「S W A C S 初期スパイク圧計算モジュールの反応部成長モデルの改造: (2) 改造内容と試計算」, P 安室内メモSC-84-15, 1984年4月
- (12) 浜田, 「S W A C S 界面移動モデルの検討結果」,
P 安室内メモSWA-01-03-81, 1988年4月

VI 謝 辞

S W A C S コードの改造から本報告書の作成に当たり、適切な指導と助言を頂いたプラント安全工学室の田辺裕美副主任研究員、三宅収副主任研究員に謝意を表します。

A P P E N D I X - 1

入力データの説明

初期スパイク圧力計算コード

入力データ説明書

整数部

番地	記号	内 容
1	NS	セクション数 ≤ 21
2	NR(i) (i=1, NS)	各セッション内部材数 $\sum NR(i) \leq 50$
22	JS(i) (i=1, NS)	各セッション両端の接合点番号 (4~6桁の数)
42	JN(i) (i=1, $\sum NR$)	各部材両端の接合点番号 (4~6桁の数) (セッションの1から順に座標軸方向に入力)
92	NN(i) (i=1, $\sum NR$)	各部材分割数 ≤ 99 (JN(i)と同順)
144	MT	サージタンクの個数 ≤ 5
145	MR	ナトリウム中に設置されたR/D個数 ≤ 10
146	JT(i) (i=1, MT)	サージタンク接合点番号
151	JR(i) (i=1, MR)	ナトリウム中に設置されたR/D接合点番号
164	JB(i) (i=1, JBN0)	1分岐境界接合点番号 (必ずセッション端である事) ・圧力一定境界の場合は負の番号とする。 ・流速一定境界の場合は正の番号とする。
175	NOUT(1)	プリント・アウトコントロール =1 柱領域のすべての点についてプリント・アウト。 =2 球領域のすべての点についてプリント・アウト。 =3 柱領域、球領域の点についてプリント・アウト。 =0 標準プリント・アウト。 (標準指定)
176	NOUT(2)	=0 標準プリント・アウトを行なう。 =1 標準プリント・アウトを行なわない。 (標準指定)
187	JBN0	1分岐境界の個数。 ≤ 10
201	MFS	自由液面の個数。 ≤ 10

番地	記号	内 容		
202	JFS(i) (i=1,MFS)	自由液面接合点番号		
212	MRFS	自由空間に設置したラプチャーディスクの個数。 ≤ 10		
213	JRFS(i) (i=1,MRFS)	自由空間に設置したラプチャーディスクの自由液面接合点番号		
231	NORIF	オリフィスの個数。 ≤ 5		
232	JORIF(i) (i=1,NORIF)	オリフィスの接合点番号。		
250	IOPT57	球モデル計算の選択 =1 水噴出率の入力。 =2 圧力波入力。		
261	JJNH	球モデル中心に対応する接合点番号。		
262	JJSP	球領域に対応する柱流域部材両端の接合点番号。		
263	NNSP	球領域分割数。 (半径方向) ≤ 99		
264	NNIW	水噴出率変化を与えるデータ数 (水噴出率計算と連動計算、テープ入力の場合は0)		
270	IOPT	$=0$ キャビティ処理を行なわない。 $=1$ ゼロ・セット近似。 $=2$ Streeterモデル。		
271	IOPTEX	IOPTEX	衝突発生圧 の 計 算	キャビティ発生 時 刻 制 約
			$=0$ 考慮しない	考慮しない
			$=1$ 考慮する	考慮しない
			$=2$ 考慮しない	考慮する
			$=3$ 考慮する	考慮する
272	MODBUB	反応部モデルのオプション $=0$ 球モデルで計算する $=1$ 球モデルで計算をスタートしBTMに切換える $=2$ 球モデルで計算をスタートしFBMに切換える $=-1$ スタート時よりBTM $=-2$ スタート時よりFBM		

番地	記号	内 容
273	NPEX	Extra-Pipeの分割数 ≤ 399
274	KSPSW	球モデル→BTM/FBMの切換えタイミングのオプション =0 指定時刻で切り換える。 =1 気泡半径が球モデル半径に達すると切り換える。 =2 気泡表面積がパンケーキ表面積と等しくなった時
275	IAPRX	移動気泡境界／固定気泡境界の特性曲線法近似の次数 =1 1次近似 =2 2次近似
277	NELE(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの要素分割数。 ≤ 50 (1枚目)
287	IFRD(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスク解析コードの選択 =0 従来の解析コード =1 ラプチャーディスク1枚の解析(従来同様) =2 ラプチャーディスク1枚の解析(SWAAM-RD) =3 ラプチャーディスク2枚の解析
300	IRLIN(i,j) (i=1,MR) (j=1,10)	放出系配管部材番号 (放出系配管部の計算時は、必ず指定する。)
400	NELE2(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの要素分割総数 ≤ 50 (2枚目)

番地	記号	内 容	単位
1	XL(i) (i=1, Σ NR)	各部材長さ	m
51	CC(i) (i=1, Σ NR)	各部材音速	m/sec
101	AA(i) (i=1, Σ NR)	各部流路面積	m ²
151	DE(i) (i=1, Σ NR)	各部材等価直径	m
202	GAM	流体（ナトリウム）の比重量	kg/m ³
203	UU	流体（ナトリウム）の動粘性係数	m ² /sec
204	SR(i) (i=1, MR)	ナトリウム中に設置されたラプチャーディスク断面積	m ²
214	ZR(i) (i=1, MR)	ナトリウム中に設置されたラプチャーディスク圧損係数	—
224	ST(i) (i=1, MT)	サージタンク断面積	m ²
229	SST(i) (i=1, MT)	サージタンク入口配管断面積	m ²
234	ZT(i) (i=1, MT)	サージタンク入口配管圧力損失係数	—
239	PR(i) (i=1, MR)	ナトリウム中に設置されたラプチャーディスク破裂設定圧力	kg/cm ² ・a
249	HRO	開放系背圧（ナトリウム圧力ヘッド換算）	kg/cm ² ・a
250	PT	基準点の位置の圧力（ ノ ）	m
255	C1	摩擦係数パラメータ $f=C1 \cdot Re^{C2} (0.3164)$	—
256	C2	摩擦係数パラメータ $f=C1 \cdot Re^{C2} (-0.25)$	—

番地	記号	内 容	単位
257	ZN(i) (i=1, Σ NR)	各部材形状圧損係数	—
307	H1(i) (i=1, 接合点)	各接合点の高さ (MFS=1の時は自由液面高さを基準点=0)	m
358	PG	カバーガス初期圧力	kg/cm ² ・a
359	BJ(i) (i=1, JBN0)	1分岐境界条件(圧力、または流速)	—
391	HFS(i) (i=1, MRFS)	自由液面上の自由空間長さ	m
401	AKAPA	上記自由空間の比熱比	—
402	PRFS(i) (i=1, MRFS)	上記自由空間に設置したラブチャーディスクの破裂設定圧力	kg/cm ² ・a
412	ZFS	自由空間から開放系までの圧損係数	—
421	AORI(i) (i=1, NORIF)	流路オリフィス係数	—
601	FBB	1モルの水から発生するH ₂ のモル数	mol/mol
602	XR	球モデルの等価半径	m
603	BPI	気泡の初期圧力	kg/cm ² ・a
604	VT	気泡温度	°C
605	BRI	気泡初期半径	m
606	RTRI	タイムメッシュを決めるパラメータ	—
607	GGG	重力加速度	m/sec ²
610	CCCP	球モデル部の音速	m/sec
611	TIME(i) (i=1, NNIW)	水噴出率テーブル用時間 (NNIW=0の時は入力不要)	sec

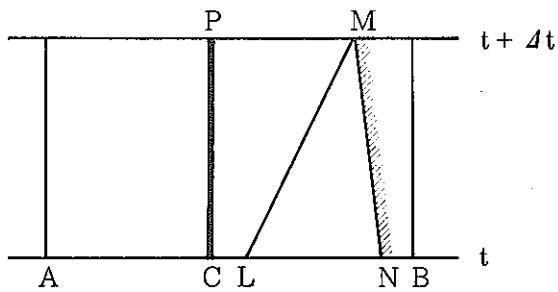
番地	記号	内 容	単位
711	TEMPO(i) (i=1,NNIW)	TIMEに対応する水噴出率 (NNIW=0の時は入力不要)	kg/sec
900	PSAT	キャビティ発生圧力	kg/cm ² ・a
901	TSPSW	KSPSW=0 の場合の切り換え時刻	sec
902	TBUR	ラプチャーディスク破裂設定時刻	sec
905	QRAD(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの曲率半径 (1枚目)	m
1005	QDIA(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの直径 (1枚目)	m
1015	QTH(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの厚さ (1枚目)	mm
1025	QYM(i) (i=1,MR)	ヤング率	kg/mm ²
1035	QPR(i) (i=1,MR)	ボアソン比 (1枚目)	—
1045	QEP(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの加工硬化係数 (1枚目)	kg/mm ²
1055	QGAM(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの密度 (1枚目)	kg/m ³
1065	WMAX(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの最大変位 (1枚目)	m
1075	QSY(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの設計降伏点 (1枚目)	kg/mm ²
1085	QSU(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの設計引張り強さ (1枚目)	kg/mm ²
1100	GTEMP(i) (i=1,MR)	放出系配管のガス温度	°C

番地	記号	内 容	単位
1110	PPGAS(i) (i=1,MR)	放出系配管のガス圧力	Kg/cm ² ・a
1120	VDUMP(i) (i=1,MR)	放出系配管のガス体積	m ³
1130	QRAD2(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの曲率半径 (2枚目)	m
1140	QDIA2(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの直径 (2枚目)	m
1150	QTH2(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの厚さ (2枚目)	mm
1160	QYM2(i) (i=1,MR)	ヤング率 (2枚目)	Kg/mm ²
1170	QPR2(i) (i=1,MR)	ポアソン比 (2枚目)	—
1180	QEP2(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの加工硬化係数 (2枚目)	Kg/mm ²
1190	QGAM2(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの密度 (2枚目)	—
1200	WMAX2(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの最大変位 (2枚目)	m
1210	QSY2(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの設計降伏点 (2枚目)	Kg/mm ²
1220	QSU2(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスクの設計引張り強さ (2枚目)	Kg/mm ²
1230	PBACK1(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスク間のガス圧力 (2枚目)	Kg/cm ² ・a
1240	PBACK2(i) (i=1,MR)	2枚目ラプチャーディスク後の背圧 (2枚目)	Kg/cm ² ・a

番地	記号	内 容	単位
1250	VRDUB(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスク間のガス・ボリウム (2枚目)	m ³
1260	GRDUB(i) (i=1,MR)	ラプチャーディスク間のガス比熱比(1.67) (2枚目)	—
1270	TOPEN(i) (i=1,MR)	破裂のギャップ・タイム (AINL(i)～AFIN(i)の時間)	sec
1280	AINL(i) (i=1,MR)	初期状態でのラプチャーディスクの開口度	—
1290	AFIN(i) (i=1,MR)	破裂後のラプチャーディスクの開口度	—
1300	GAR(i) (i=1,MR)	破裂後の空間変化のバラメータ (弁開度特性の式の乗数)	—
1310	GVE(i) (i=1,MR)	破裂後の流速変化のバラメータ(圧損)	—

APPENDIX - 2

気液界面の流速計算



M点の座標を近似

$$x_M = x_N + u_N \Delta t$$

L点の座標を求める。

$$x_M - x_L = (u_L - Ic) \Delta t$$

L点の流速を近似

$$\frac{x_L - x_C}{x_N - x_C} = \frac{u_L - u_C}{u_N - u_C}$$

上2式を連立して解くと、

$$u_L = \frac{1}{1+\alpha} \left\{ u_C + \alpha \left(Ic + \frac{x_M - x_C}{\Delta t} \right) \right\}$$

$$x_L = \frac{1}{1+\alpha} \left\{ (x_M + \alpha x_C) - (u_C - Ic) \Delta t \right\}$$

$$\alpha = \frac{u_N - u_C}{x_N - x_C} \cdot \Delta t$$

L点の圧力を求める。

$$\frac{x_L - x_C}{x_N - x_C} = \frac{H_L - H_C}{H_N - H_C} \quad \therefore H_L = H_C + \frac{x_L - x_C}{x_N - x_C} (H_N - H_C)$$

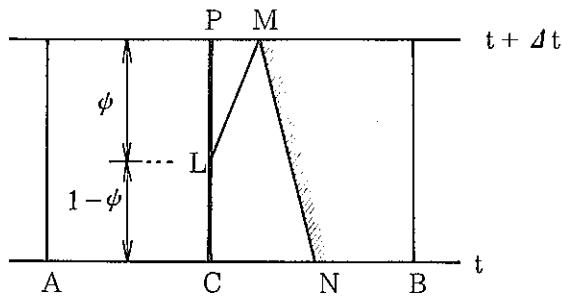
M点の圧力は既知で、

$$H_M = H(x_M, t + \Delta t)$$

従って、

$$u_M - u_L - \frac{g}{Ic} (H_M - H_L) + f(u_L) \Delta t = 0$$

$$\therefore u_M = u_L + \frac{g}{Ic} (H_M - H_L) - f(u_L) \Delta t$$



M点の座標を近似

$$x_M = x_N + u_N \Delta t$$

ϕ の値を求める

$$x_M - x_C = (u_L - Ic) \phi \Delta t$$

$$\therefore \phi = \frac{x_M - x_C}{(u_L - Ic) \Delta t}$$

L点の流速を近似

$$\phi = \frac{u_L - u_P}{u_C - u_P} \quad \therefore u_L = \frac{(u_P + Ic) \pm |u_P - Ic| \cdot \sqrt{1 + \frac{4(x_M - x_C)(u_C - u_P)}{(u_P - Ic)^2 \Delta t}}}{\text{（符号は } I = +1 \text{ の時 “-” } \\ I = -1 \text{ の時 “+”）}}$$

L 点の圧力を近似

$$\phi = \frac{H_L - H_P}{H_C - H_P} \quad \therefore H_L = H_P + \phi (H_C - H_P)$$

M点の圧力は既知で、

$$H_M = H(x_M, t + \Delta t)$$

M点の流速は、

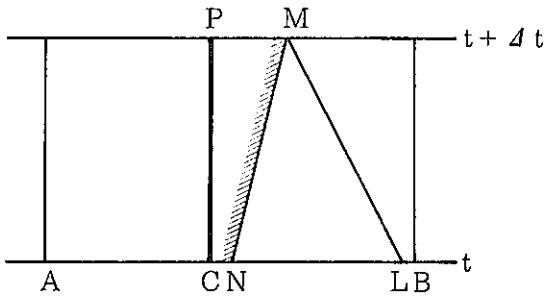
$$u_M - u_L - \frac{g}{Ic} (H_M - H_L) + f(u_L) \phi \Delta t = 0$$

$$\therefore u_M = u_L + \frac{g}{Ic} (H_M - H_L) - f(u_L) \phi \Delta t$$

以上より

$$u_M \equiv u_M (u_P, H_P)$$

が求まる。



M点の座標近似

$$x_M = x_N + u_N \Delta t$$

L点の座標を求む

$$x_M - x_L = (u_L + Ic) \Delta t$$

L点の流速を求む

$$\frac{x_L - x_N}{x_B - x_N} = \frac{u_L - u_N}{u_B - u_N} \quad \therefore \quad u_L = \frac{\frac{x_N - x_M}{x_N - x_B} u_B + \frac{x_M - x_B}{x_N - x_B} u_N - \alpha \cdot Ic}{1 + \alpha}$$

$$\alpha = \frac{(u_N - u_B) \Delta t}{x_N - x_B}$$

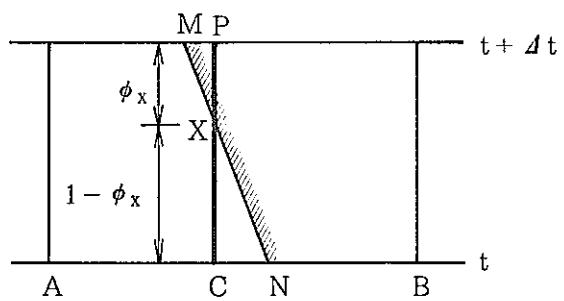
M点の圧力は既知であり、

$$H_M = H(x_M, t + \Delta t)$$

M点の流速は、

$$(u_M - u_L) + \frac{g}{Ic} (H_M - H_L) + f(u_L) \Delta t = 0$$

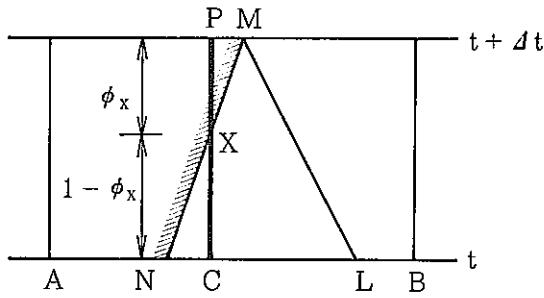
$$\therefore u_M = u_L - \frac{g}{Ic} (H_M - H_L) - f(u_L) \Delta t$$



ϕ_x の値を近似

$$x_C = x_N + u_N (1 - \phi_x) \Delta t$$

$$\therefore \phi_x = 1 - \frac{x_C - x_N}{u_N \Delta t}$$



M点の座標を近似 $u_x \approx u_M$ と仮定

$$x_M = x_C + u_x \phi_x \Delta t$$

L点の座標を近似

$$x_M - x_L = (u_L + Ic) \Delta t$$

L点の流速を近似

$$\frac{x_L - x_C}{x_B - x_C} = \frac{u_L - u_C}{u_B - u_C} \quad \therefore u_L = \frac{u_C + \left(\frac{x_M - x_C}{\Delta t} - Ic \right) \alpha}{1 + \alpha}$$

$$\alpha = \frac{x_C - u_B}{x_C - x_B} \Delta t$$

L点の圧力を近似

$$\frac{x_L - x_C}{x_B - x_C} = \frac{H_L - H_C}{H_B - H_C} \quad \therefore H_L = H_C + \frac{x_L - x_C}{x_B - x_C} (H_B - H_C)$$

M点の圧力は既知

$$H_M = H(x_M, t + \Delta t)$$

M点の圧力は、

$$(u_M - u_L) + \frac{g}{Ic} (H_M - H_L) + f(u_L) \Delta t = 0$$

$$\therefore u_M = u_L - \frac{g}{Ic} (H_M - H_L) - f(u_L) \Delta t$$

x_M, u_L, H_M は u_M の関数だから、上式を解いて、真の u_M が求まる。