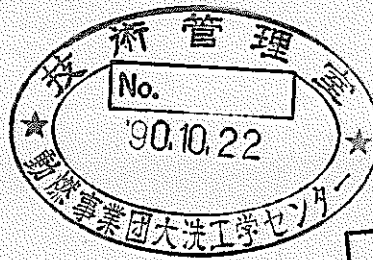


# ナトリウム-水反応解析コード SWACSの改良と検証 (II)

— PEPT試験データとの比較 —



区分変更	
変更後資料番号	PNC <del>2N</del> 9410 90-089
決裁年月日	平成 10年 5月 26日

1990年5月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
S	N9410 90-089
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

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)

ナトリウム-水反応解析コード  
SWACSの改良と検証(Ⅱ)

## — P E P T 試験データとの比較 —

浜田広次\*<sup>1</sup>, 田辺裕美\*<sup>1</sup>松木卓夫\*<sup>2</sup>, 姫野嘉昭\*<sup>3</sup>

## 要 旨

有液面型である原型炉の蒸気発生器(以下、SG)を対象として開発した大リーク・Na-水反応解析コードSWACSを、無液面型SG体系についても適用可能とすることを目的として現在改良を行っており、初期スパイク圧計算モジュールについては圧力開放系の接液型ラプチャディスク(以下、RD)応答と放出系配管内の流動を扱うモデルを付加した新モジュールSWAC57Rを開発した。

本報告書は、SWAC57Rの解析機能を確認するために実施した検証解析及び水中火薬模擬試験(PEPT)のデータを用いて無液面型SGへの適用性を確認するために実施した試験解析の結果についてまとめた。

検証解析からは、SG事故時の圧力開放特性に接液型RDの破裂/開口特性が大きく関与することや破裂/開口特性を定義するパラメータ( $R_{i1}$ ,  $R_{i2}$ ,  $t_{i1}$ - $t_{i2}$ , GAR, GVE)が圧力波形に及ぼす影響を明らかにした。また試験解析からは、RDパラメータにフィッティング値( $R_{i1}=0$ ,  $R_{i2}=1$ ,  $t_{i1}-t_{i2}=0.004$ , GAR=0.8, GVE=0.5)を用いることで試験結果を精度よく評価し、特にIHX部での最大ピーク圧は+10%前後の誤差であることを確認した。

検証解析及び試験検証により、SWAC57Rに付加した新モデルの解析機能を確認する事ができ、また圧力波の最大ピーク圧に対しては有液面型SGを対象に従来実施してきた検証結果の評価精度を確保することが示され、SWAC57Rは無液面型SG体系にも適用可能なことを確認した。

\*1) 大洗工学センター 安全工学部 プラント安全工学室

\*2) 検査開発(株)

\*3) (現在) 大洗工学センター 技術開発部 フロンティア技術開発室



NOT FOR PUBLICATION

PNC 9410 90-089

May. 1990

## Modification and Validation of the SWACS Code for Large Steam Generators (II)

— Validation using PEPT Series II Test Data —

H. Hamada<sup>1)</sup>, H. Tanabe<sup>1)</sup>,  
T. Matsuki<sup>2)</sup>, Y. Himeno<sup>3)</sup>

### ABSTRACT

A computer code SWACS (Sodium-Water Reaction Analysis Code System) was developed to analyze the pressure/fluid-flow phenomena during a large scale sodium-water reaction accident. Since the code was closely related with the prototype Monju SGs (steam generators) having a cover-gas space at their top, it didn't possess sufficient analytical functions for the specific phenomena of noncover-gas type SGs. In order to improve the accuracy of propagated pressure calculations and to make the code applicable to noncover-gas type SGs, some modifications related to new analytical models of pressure relief system, such as a dynamic response model of in-sodium RD (rupture disk) and a fluid-flow model in the piping connected to dump tank, were added to the calculation module of initial pressure spike and its propagation. The new version was named SWAC57R.

This report includes the results of analyses to verify the code functions and experimental validation to confirm code applicability to noncover-gas type SGs.

The verification indicated the qualitative effects of calculation parameters ( $R_i$ ,  $R_f$ ,  $t_f - t_i$ , GAR, GVE) and the importance of dynamic fracture process of the RD as a moving variable orifice. The experimental validation using test data from PEPT series II showed that SWAC57R could accurately calculate propagated pressure (+20% at RD and +10% at IHX for the peak of pressure) by using property parameters ( $R_i = 0$ ,  $R_f = 1$ ,  $t_f - t_i = 0.004$ , GAR = 0.8, GVE = 0.5)

Since the magnitude of the errors are comparable to that in the analysis of cover-gas type SGs conducted previously, it is concluded that the code can also be applied to noncover-gas type SGs.

- 
- 1) FBR Plant Safety Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC
  - 2) Inspection Development Co., Ltd.
  - 3) Frontier Technology Development Section, Technology Development Division, O-arai Engineering Center, PNC

## 目次

	Page
1. 緒言 .....	1
2. 計算コードの改造 .....	3
2.1 計算コードの改造 .....	3
2.2 R Dの解析モデル .....	4
2.3 放出系配管内流動モデル .....	9
3. 検証解析 .....	14
3.1 計算パラメータ .....	14
3.2 計算モデル .....	15
3.3 パラメータの影響評価 .....	16
3.4 まとめ .....	25
4. 試験解析 .....	45
4.1 装置概要 .....	45
4.2 試験概要 .....	45
4.3 計算モデル .....	46
4.4 検証結果 .....	48
4.5 まとめ .....	57
5. 結言 .....	79
参考文献 .....	80
謝辞 .....	82
Appendix .....	83
A. コードの概要 .....	85
B. SWAC57R用入出力データ .....	91
C. プロッタプログラム .....	131
D. PEPT試験のデータ変換 .....	143

# 図表目次

	Page
表 3.1	パラメータ計算一覧表 ..... 28
表 3.2	R D の破裂時刻及び最大圧力／流速 ..... 29
表 4.1	P E P T 試験装置の主要仕様 ..... 59
表 4.2	R D の主要仕様 ..... 60
表 4.3	P E P T 試験での試験ケース ..... 61
表 4.4	R D 破裂時刻の試験と計算の比較 ..... 62
表 4.5	放出系配管内の平均流速 ..... 63
表 B.1	コントロール整数データ ..... 93
表 B.2	コントロール実数データ ..... 99
表 B.3	初期スパイク圧/圧力波伝播計算整数データ (SWAC57R) ..... 101
表 B.4	初期スパイク圧/圧力波伝播計算実数データ (SWAC57R) ..... 106
表 B.5	初期スパイク圧/圧力波伝播計算の境界条件 (SWAC57R) ..... 123
表 B.6	入出力ユニットと指定データ ..... 130
表 C.1	初期スパイク圧/圧力波伝播計算プロットデータ (SWAC57R) ..... 139
図 2.1	R D 計算と放出系配管内 B T M 計算のルーチン構成図 ..... 10
図 2.2	R D 破裂時のディスク開口度の過渡的变化 ..... 11
図 2.3	R D 破裂時のディスク変形速度の過渡的变化 ..... 12
図 2.4	大気開放モデルと放出系配管内 B T M の比較 ..... 13
図 3.1	検証解析用のネットワークモデル ..... 30
図 3.2	検証解析用の入力圧力波形 ..... 31
図 3.3	検証解析結果 (大気開放モデル／B T M の比較 : No. 1, 2) ..... 32
図 3.4	検証解析結果 (IFRD=0／IFRD=1の比較 : No. 1, 3) ..... 33
図 3.5	検証解析結果 (IFRD=0／IFRD=2(分割数 10, 45)の比較 : No. 1, 4, 5) ..... 34
図 3.6	検証解析結果 (IFRD=2／IFRD=3の比較 : No. 4, 6) ..... 35
図 3.7	検証解析結果 (2枚目ディスク分割数(10, 45)の比較 : No. 6, 7) ..... 36

図3.8	検証解析結果 (TOPNの比較 : No. 7, 8)	37
図3.9	検証解析結果 (AINLの比較 : No. 7, 9)	38
図3.10	検証解析結果 (AFINの比較 : No. 7, 10)	39
図3.11	検証解析結果 (GARの比較 : No. 7, 11, 12)	40
図3.12	検証解析結果 (GVEの比較 : No. 7, 13, 14)	41
図3.13	検証解析結果 (1枚目ディスクの変位出力 : No. 4, 5)	42
図3.14	検証解析結果 (1, 2枚目ディスクの変位出力 : No. 6)	43
図3.15	検証解析結果 (1, 2枚目ディスクの変位出力 : No. 7)	44
図4.1	PEPT試験装置鳥瞰図	64
図4.2	検証用ネットワークモデル (ケース2)	65
図4.3	検証用ネットワークモデル (ケース3)	66
図4.4	PEPT試験結果 (RD手前での圧力波形)	67
図4.5	検証用予備計算結果	70
図4.6	試験解析結果 (ケースSG55)	71
図4.7	試験解析結果 (ケースSG56)	71
図4.8	試験解析結果 (ケースSG54)	72
図4.9	試験解析結果 (ケースSG52)	73
図4.10	試験解析結果 (ケースN058)	74
図4.11	試験解析結果 (ケースN059)	75
図4.12	試験解析結果 (ケースN060)	76
図4.13	試験解析結果 (ケースN061)	77
図4.14	試験解析結果 (配管内流速)	78
図A.1	SWACS/REG4の計算モジュール構成図	88
図A.2	SWAC57Rの開発	89
図A.3	コード改良の概要	90
図C.1	プロッタプログラムの出力 : 形式-1	142
図C.2	プロッタプログラムの出力 : 形式-2	142
図D.1	PEPT試験データ変換の流れ	150

# 1. 緒言

無液面型の蒸気発生器（以下、SG）は、SG上部のカバーガス空間を削除して圧力開放系に接液型のラプチャディスク（以下、RD）を採用したもので、合理化の観点から将来炉のSG候補として有望視されている。しかしながら、万が一無液面型SG内で大リーク・ナトリウム-水反応事故が生じた場合、ナトリウム中を音速で伝播する初期スパイク圧に対しては、従来の有液面型SGが有していたカバーガス液面による減衰効果を期待できないため、初期の発生圧力及びループ内での伝播圧が有液面型SGに比べ相対的に高くなる。一方、接液型RDは初期スパイク圧により早期に変形／破裂を開始するため圧力波の減衰効果に寄与し、またRD破裂後の放出系配管内流動も伝播圧力波の反射／減衰に寄与するものと考えられる。

SWACS (Sodium-Water Reaction Analysis Code System) は、大リーク時のSGを始めとする2次冷却系の健全性評価のために、ナトリウム-水反応により発生する初期スパイク圧とその圧力波伝播および水素ガスのビルドアップによる準定常圧の挙動を解析するコードであり<sup>[1, 2]</sup>、SGの上部にカバーガス空間を有する有液面型を対象に開発されてきた。そして、有液面型SGに対してはSWAT-3等による実験検証<sup>[9]</sup>を行い「もんじゅ」の安全設計および安全評価等に供してきたが、無液面型SGに特有な圧力開放機能等に対する解析機能は十分でない。よって、SWACSを無液面型SGに適用するため、圧力開放系の接液型RDと放出系配管内の流動を扱う解析機能を新たに付加した初期スパイク圧／圧力波伝播計算モジュールSWAC57Rを昨年度開発し<sup>[6, 7]</sup>、LLTRやPEPTの試験データにより一部検証して適用性の見通しを得た<sup>[6, 8]</sup>。しかしながら、LLTRはループでないSG単体の試験体系で実施した大リーク試験1ケースであり、ナトリウム-水反応という圧力波伝播現象以外の付加的な要因も否定できない。また、SG内で水中火薬によりナトリウム-水反応を模擬したPEPTのシリーズI試験は無液面型のループ体系を模擬したものであり、系内の伝播圧力波を対象にして検証を行ったものであるが、それはループ内にRDを設置した体系での試験ではない。従って、それらのデータによる検証は、コードの無液面型SGへの適用性の見通しは得られるものの、RD応答を考慮した系内の伝播圧力波に関しては定量的に検証されているとは言えない。



本報では、RD 応答を考慮した系内の伝播圧力波を対象にしてSWAC57Rの定性的／定量的な解析能力を検証し、それが従来実施されてきた有液面型SGでの評価精度を確保できることを確認して無液面型SGへのコードの適用性を評価することを目的としている。そのため、SWAC57Rの付加モデルに関する解析機能の定性的な確認を行うための検証解析を行った。また、接液型のダブルRDを設置した体系であるPEPTシリーズII試験のデータを使用して、RD 応答及び伝播圧力波についてSWAC57Rを定量的に検証するための試験解析を行った。

以下では、2章でコードの改造を、3章で検証解析を、4章で試験検証を、5章で結言を述べる。なお、SWAC57Rの概要および入出力データの説明はAppendixに付した。

## 2. 計算コードの改造

### 2.1 計算コードの改造

SWACS/REG4の構成モジュールの1つであるSWAC57Rは、80強のサブルーチンから成る約10000ステップのプログラムである。今回の接液型RDと放出配管内流動に關係する新たなモデルの導入に伴い、同モジュールの中で関連する部分を一部改造／修正した。それらの各計算サブルーチンのツリー構造を図2.1に示す。

図中の"MAIN"は、SWAC57R全体の計算の流れを制御するメインプログラムである。"SWAC57"は、圧力波伝播の1ステップ毎の過渡計算を行う親ルーチンであり、親ルーチン及びその下の子ルーチンで、ナトリウム-水反応点、各境界点（接合点）及び配管（部材）内部の計算を行う。

"TBOUN5"は、RD境界の計算を行うルーチンで、この中で接液型のディスク1枚から成るシングル型および2枚から成るダブル型のRD応答解析を行う。昭和63年度の改造では、ANLの開発したRD解析モデルを"TBOUN5"に付加し、子ルーチンの"RDone"でSWACSの従来モデルと同様なシングル型ディスクを、"RDSNGL"で有限要素法によるシングル型ディスクの変形挙動を、そして"RDDOBL"で有限要素法によるダブル型ディスクの変形挙動を解析するものであった。しかしながら、実際にはプログラム上の理由から"RDDOBL"の使用しか許されてなかった。よって、今回の改造では各ルーチンでのRD計算に必要なデータの引渡し及び制御を行うルーチン"RCONV"を開発し、上記の3ルーチン全ての使用を可能とした。さらに、それらの各ルーチンについて、ディスク破裂以後の大気開放モデルの計算にディスクの圧損係数を考慮できるように修正も加え、旧バージョンとの整合性をとれるようにした。

"TBOUN9"は、RD破裂後の放出系配管内のNa流動計算及び制御を行うルーチンである。実際に放出系配管内での気液界面の移動を考慮するBTM (Boundary Tracking Model) 計算を行うのは"PBOUN4"のルーチンであるが、これはSWAC57Pバージョンのパンケーキモデルを計算する"PBOUN2"の計算部を改造したものである。昭和63年度の改造では、接液型RDは必ずダブル型でかつその下流側に必ず放出系配管が接続されている必要があった。今回の改造では、放出系配管の接続の有無についても選択可能とし、放出系配管を選択しない場合には従来の大気開放モデルの扱いで計算が行えるようにした。

なお、今回の改造及び追加した各計算ルーチンで使用する各変数の初期化は、“TINPUT”の子ルーチンである“RINITL”で行う。

## 2.2 RDの解析モデル

### 2.2.1 シングル型RD

SWAC57Rで扱える接液型のシングル型RDには、入力パラメータであるIFRD (= ID-287) の値に対応して3つのモデルがある。IFRD=0が従来の解析モデルに相当し、IFRD=1~2が付加したモデルに相当する。

#### (1) IFRD=0のモデル

##### (i) RDの破裂モデル

このモデルでは、断面積SR (RD-204) のRDの破裂圧力をあらかじめ入力値PR (ID-239) で設定しておき、時々刻々と変化するRD接合点での圧力が破裂設定圧に達するまでは、ディスクは通常の盲端として扱われ特別な計算は行われず、圧力波はそこで剛体反射する。ディスク接合点での計算圧力がその破裂設定圧以上になった時点で初めてディスクが破裂し、ナトリウムが放出系に流出する。なお、ここでのRDの破裂は、瞬時の100%開口を仮定する。

##### (ii) ナトリウムの放出モデル

ナトリウムの放出(ディスク部でのナトリウム流速:  $U_{PR}$ )は、そこでの圧損係数ZR (RD-214) と、ディスク下流の大気圧(開放系圧力:  $H_{R0}$ )を考慮した圧力一定境界(圧力:  $H_P$ )と考え、以下の式で計算する。

$$H_P = H_{R0} - U_{PR} \cdot |U_{PR}| \cdot ZR / 2g \quad (2.1)$$

$$A_1 \cdot U_{P1} + SR \cdot U_{PR} = 0 \quad (2.2)$$

#### (2) IFRD=1のモデル

このモデルは、前節で説明した解析モデルと基本的に同じである。ただ、入力パラメータとしてRD破裂設定時刻TBUR (= RD-902) が用意されており、TBURが正の場合RDは設定圧PRと無関係に時刻TBURで破裂する。逆にTBURが負かゼロの場合は、RDは設定圧PRで破裂する。

また破裂後の放出ナトリウムの取扱も前節と同じ圧力一定境界であるが、従来モデルではナトリウム放出時の圧損係数が考慮されておらず、ディスク破裂後の圧力波開放特性に従来モデルとの差異が生じていたため、今回新たに前節の式で示されるナトリウム放出モデルを付加した。

### (3) IFRD = 2 のモデル

接液型 RD は流体と直接接しているため、流体からの伝播圧力波の影響を受け易いと考えられるため、ここでは前述した IFRD = 0, 1 の場合と解析モデルを異にし、より現実的なモデルを採用した。つまり、このモジュールの圧力波伝播解析では流体とディスクの相互作用を考慮し、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)

$$P = C_1 + C_2 * V \quad (2.3-a)$$

$$V = f(P) \quad (2.3-b)$$

(キャビテーションのある場合)

$$P = \text{cavitation pressure} \quad (2.4-a)$$

$$V = f(P) \quad (2.4-b)$$

$f$  は非線形関数で、 $P$  と  $V$  は各々ディスク面での流体及び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弾・塑性解析を行なう。しかし、実際の流体／ディスクの相互作用の計算時には、圧力と変位速度は相互に関係し未知数となるため、両者を求める際は繰り返し計算手法により上述の式を満足させる  $P$  と  $V$  の組合せとして解を求める。

この RD 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、RD は完全開口し、その後は開放端（前節の IFRD = 0, 1 のモデルと同じ）として計算を継続する。

### 2.2.2 ダブル型 R D

ダブル型 R D は 2 枚の曲板（ディスク）とその間に気体を充填した一体構造である。このモデルでは、ナトリウムと接した 1 枚目のディスクが破裂するとナトリウムは気体空間に流入する。そして気体はナトリウムと熱の授受が無い状態で圧縮、即ち可逆断熱変化を受ける。このとき気体の圧力は、

$$P V^{\kappa} = (\text{一定}) \quad (2.5)$$

の式で与える。2 枚目のディスクは気体圧力の作用により変形を開始して破裂に到るため、その破裂挙動は気体圧力の変化する程度、即ち 1 枚目ディスクからの放出ナトリウム流量の程度に大きく影響されると考えられる。この放出ナトリウム流量は 1 枚目ディスクの破裂挙動あるいは開口特性と大きく関与するため、この 1 枚目ディスクのモデルの取扱が重要となる。

#### (1) 1 枚目 R D のモデル

##### (i) R D の変形挙動

ナトリウムと接した 1 枚目 R D は、ディスク間のガス圧によるディスク後方からの影響が無視できるものと考えられるため、ディスクが変形を開始しその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までは前節で説明した有限要素解析法を用いたシングル型 R D モデル（IFRD=2）と同じ解析手法で計算を行う。R D 中央がナイフに接するかディスク中心部の変位が設定値に達した時点でディスクは初めて破裂する。

##### (ii) R D の開口特性

破裂以降のモデル（ディスク開口特性）は、以下に示すパラメータを用いて動的過渡変化を定義する。この場合のディスク開口面積割合（以下、開口度） $R(t)$  の変化は、以下で表わす。

$$R(t) = R_1 + (R_2 - R_1) \tau^{GAR} \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (2.6-a)$$

$$R(t) = R_1 \quad 1 < \tau \quad (2.6-b)$$

$$\text{ただし、} \tau = (t - t_1) / (t_2 - t_1) \quad (2.6-c)$$

ここで、 $R(t)$  は R D の全開口面積に対する過渡時（時刻： $t$ ）のディスク開

口度、 $R_1$ は1枚目ディスクがナイフ先端に達した時刻 $t_1$ での初期開口度、 $R_2$ は最終開口度（ともに無次元量）で、 $R_2$ に達した時の時刻が $t_2$ （sec）に対応する。GARは開口度の過渡的变化を示すパラメータで、GAR=1のときディスクはリニアに開口度が増加するが、GAR>1の時はディスク破裂の初期の変化速度が大きく、GAR<1の時は逆に最終段階での変化速度が大きくなる。GARを変化させた場合の $\tau$ とRの関係を図2.2に示す。

(iii) RDの変形速度

前述したようにRD中心部の変位が最大になりナイフの先端に達するまではその変形挙動を有限要素法により時々刻々と計算するが、それ以降のRDの破裂挙動の評価にはモデルを変えて、変形挙動を取り扱う必要がある（有限要素法は破裂挙動を計算するのではなく、応力作用下でのRDの弾塑性変形挙動を解析するものである）。そのため、SWAC57Rでは以下のモデルを採用している。

RDが破裂せず残っている部分の過渡的な変形速度（平均速度）を $U(t)$ とし、 $U_1$ をRDがナイフの先端に接した時刻での変形速度として、 $U(t)$ を、

$$U(t) = U_1 [1 + (6 \cdot GVE - 4) \tau + (3 - 6 \cdot GVE) \tau^2] \quad (2.7-a)$$

$$0 \leq \tau \leq 1$$

$$U(t) = 0 \quad 1 < \tau \quad (2.7-b)$$

で表わす。GVEはディスク速度の過渡的变化を示すパラメータで、GVE=0.5の時の速度の過渡変化はリニア、GVE>0.5の時は上に凸の曲線、GVE<0.5の時は下に凸の曲線となる。GVEをパラメトリックに変化させた時の $\tau$ と $U/U_1$ の変化を図2.3に示す。

(iv) 破裂口からの放出ナトリウム

RDの破裂口からの放出ナトリウムは、以下の式で計算する。

$$P_1 = P_2 + K_0 \cdot \rho U_r^2 / 2 \quad (2.8)$$

$$K_0 = (1/R C_0 - 1)^2 \quad (2.9)$$

$$C_0 = 1 - 0.365 \sqrt{1 - R^2} \quad (2.10)$$

$P_1$ ,  $P_2$ はそれぞれ1枚目ディスクの上流側圧力とディスク間のガス圧で、  
 $U_F$ は放出ナトリウム流速,  $K_0$ は圧力損失係数,  $C_0$ は縮流係数を表わす。

## (2) 2枚目RDのモデル

前述したように2枚目ディスクは、1枚目ディスクの破裂によって流入した放出ナトリウムがディスク間の気体を圧縮する効果により、ディスクが変形を開始して破裂に到るモデルである。このとき、理想気体として断熱圧縮された気体の圧力は2枚目RDへと作用するが、ナトリウムと異なりガスは圧縮性が大きくディスクの微小な変形はさほどガス圧に影響（フィードバック）しないと考えられるため、ここではガスと2枚目ディスクの相互作用は考慮しない。ここでも2枚目ディスクの変形挙動に有限要素法を用いた弾・塑性解析を行い、ディスク中心部がある設定値に達した時点でディスクは完全開口する。その後は開放端（前節のIFRD=0, 1, 2のモデルと同じ）として計算を継続する。

## (3) ダブル型RDでの主要パラメータ

以上で示した(2.5)～(2.10)式と圧力波伝播の特性曲線方程式を用い、RD間の気体圧力の過渡変化及び2枚目RDの変形挙動を計算する。従って、これまでの計算式中に現われる主なパラメータ： $R_1$  (=AINL),  $R_2$  (=AFIN),  $t_1 - t_2$  (=TOPN), GAR, GVEにより、接液型のダブル型RDの1枚目ディスクの破裂及び2枚目ディスクの変形挙動が影響を受ける。

### 2.3 放出系配管内流動モデル (BTM)

放出系配管内のBTMの概念を、従来モデルと比較して図2.4に示す。旧バージョンの解析モデルでは放出系配管という概念は無く、RD下流は2.2.1(1)項で説明したような大気開放モデルを使用していた。つまり、RDの破裂後はディスク部を圧力一定条件の1分岐モデルとして取り扱うものであった。

付加モデルでは、RD下流の放出系を配管部とダンプタンクの2つにモデル化する。そして、RDの破裂後はナトリウムと放出系内ガスとの気液界面が時間とともに配管内を移動していく。放出系配管内に気液界面が存在する場合には、気液界面の移動を考慮した圧力波伝播計算、つまり、放出ナトリウムのピストン流をモデル化し、その気液界面及びピストン内での圧力波伝播を特性曲線法により時々刻々と計算するBTM、を採用した。このモデルでは、気液界面部の圧力と流速の計算に圧力一定の条件を与えて解くが、その境界圧力には入力値としてのダンプタンクガス圧(背圧)と放出系へのナトリウム流入に伴う圧力変化を考慮した放出系圧力を用いる。

ナトリウム-水反応事象の進展とともに配管内を気液界面が移動して配管とダンプタンクの接合点まで界面が達した以後は、RD接合点を通常ナトリウム配管の多分岐(2分岐)境界として扱い、配管内の計算はBTMから通常配管部の計算に切換え、ダンプタンク接合点は放出ナトリウム流量に対応して変化するダンプタンクのガス圧を圧力一定の境界条件(1分岐モデル)とする。



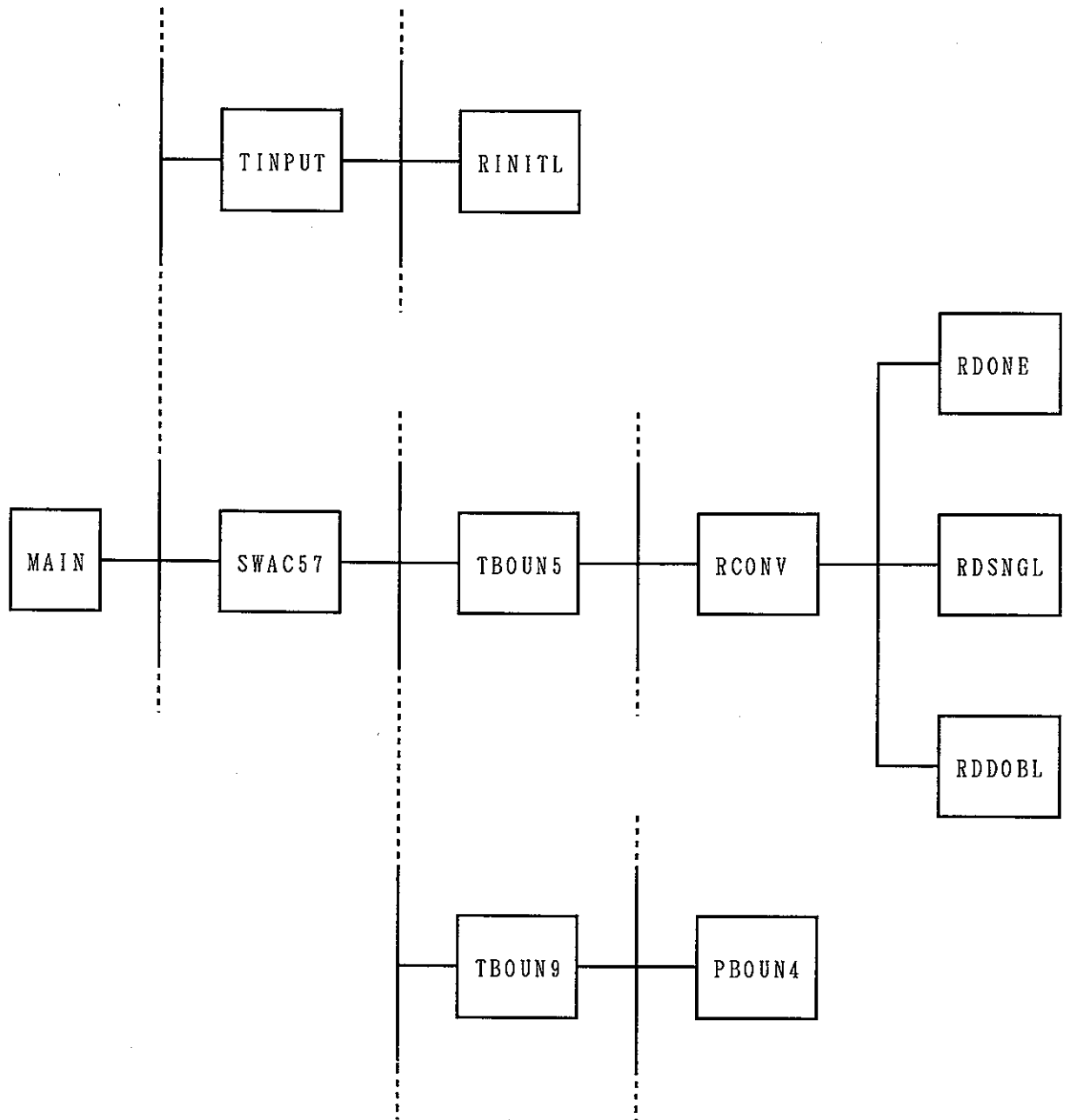


図2.1 RD計算と放出系配管内BTM計算のルーチン構成図

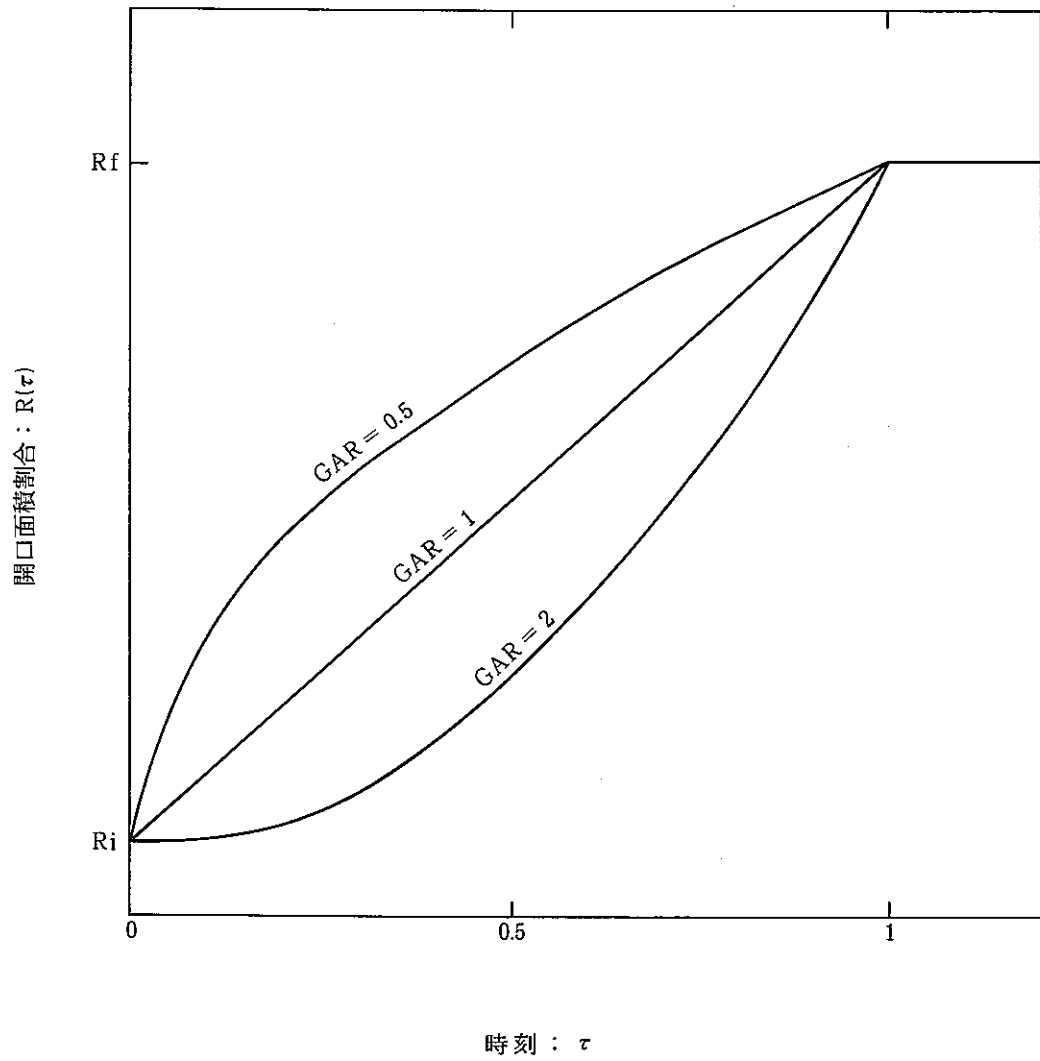


図 2.2 R D 破裂時のディスク開口度の過渡的変化

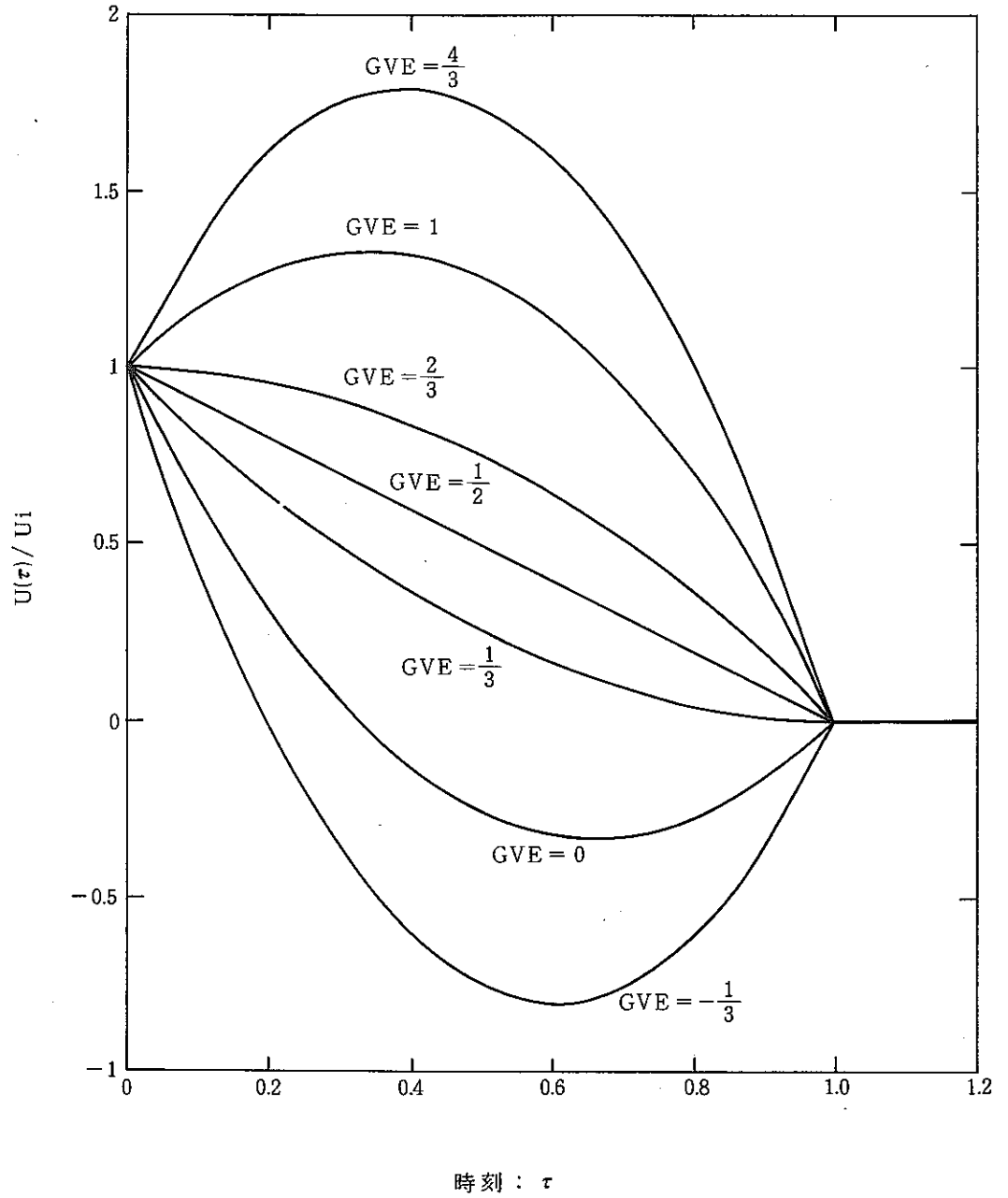


図 2.3 RD 破裂時のディスク変形速度の過渡的变化

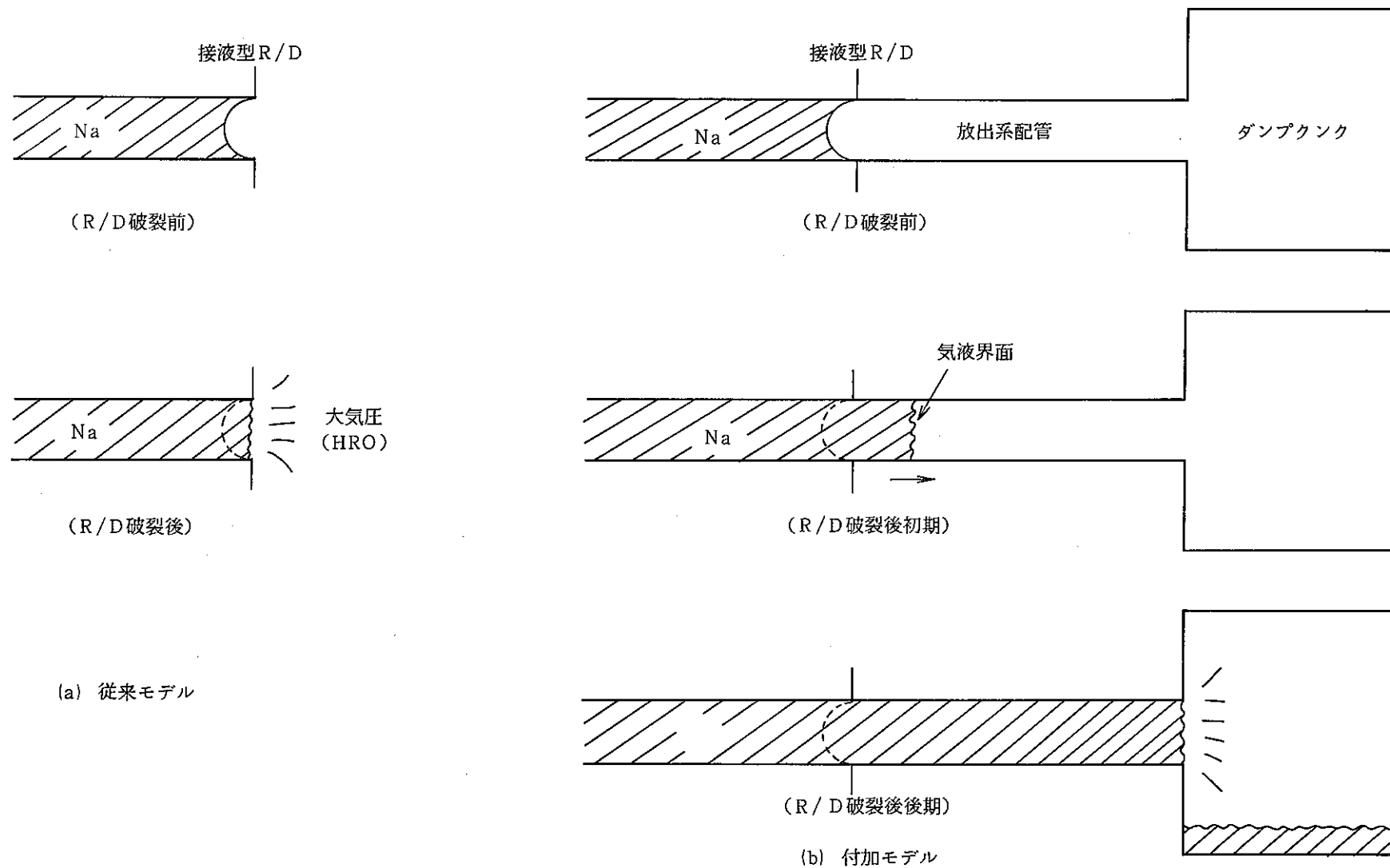


図 2.4 大気開放モデルと放出系配管内 B M T の比較

## 3. 検証解析

### 3.1 計算パラメータ

前章で説明したRDの解析モデルを考慮し、表3.1に示すようなパラメータを用いて検証解析を実施した。ここでの主な着目点は、以下のとおりである。

- (1) No. 1, 2 ---> 大気開放モデルと放出系のBTMの比較
- (2) No. 1, 3 ---> IFRD=0 (従来モデル) とIFRD=1の比較
- (3) No. 1, 4, 5 ---> " とIFRD=2 (有限要素法解析手法を用いたシングル型RDモデル) の比較及びIFRD=2の場合の接液型RDの分割数(10, 45)の影響
- (4) No. 4, 6 ---> IFRD=2とIFRD=3 (ダブル型RDモデル) の比較
- (5) No. 6, 7 ---> IFRD=3の場合の2枚目ディスク分割数(10, 45)の影響
- (6) No. 7, 8 ---> 1枚目ディスクの開口度が初期AINLから最終AFINまで変化する時間間隔TOPNの影響
- (7) No. 7, 9 ---> 1枚目ディスクの初期開口度AINLの影響
- (8) No. 7, 10 ---> 1枚目ディスクの最終開口度AFINの影響
- (9) No. 7, 11, 12 ---> 開口度の過渡的変化を示すパラメータGARの影響
- (10) No. 7, 13, 14 ---> 破裂していないRD部の変形速度の過渡的変化を示すパラメータGVEの影響

### 3.2 計算モデル

無液面型SGへ適用するために改良したSWACSコードの初期スパイク圧／圧力波伝播計算モジュールを検証するために、川崎重工(株)が委託研究の一環として建設したPEPT(水中火薬模擬試験)装置を使用し、水中で低爆速火薬による圧力波を発生させて圧力波の伝播特性を調べる試験を行った。この試験はシリーズI, IIに大きく分けられ、特にシリーズIIでは、キャピティの発生を防止するために模擬SGを試験ループから切り離し、直接その胴に接液型RDを設置して、圧力波を発生させたケースも実施した。このPEPT試験についての詳細は後の章で説明する。

本検証解析では、RDの破裂・圧力開放特性及び圧力波伝播特性に及ぼす各種計算パラメータの影響を把握することを第一の目的とし、その効果が把握しやすい体系であることを考慮して、PEPT試験シリーズIIでSG胴に直接型RDを設置した試験体系を模擬して実施した。

ここでの解析ネットワークモデルには、RD下流を大気開放にした場合と、放出系配管内のナトリウム流動をBTMで扱う場合について2通りを想定した。前者は図3.1(a)に示すように、21個の接合点と20個の部材で構成されており、接合点1, 14, 16, 18は盲端(流速一定境界)、接合点21は接液型のRD境界、接合点8(P2)は圧力発生点(圧力既知境界)である。圧力発生点での圧力時間変化は実際のPEPT試験で得られた圧力波形の一例を入力しており、それを図3.2に示す。なお、図3.1(a)中のP1~P5, P19, P33は、試験時の圧力波測定点を示している。

一方、後者のBTMを用いたケースの解析モデルは同図(b)に示すが、これは同図(a)の解析モデルの接合点21のRD境界の下流に長さ1.8mの放出系配管21とダンク境界に相当する接合点22を付加したものである。

次節で記述するパラメータの影響評価では、RDの上流側7cmの位置にある測定点P33での圧力、流速及びRDの変形挙動等について比較・検討した。

### 3.3 パラメータの影響評価

3.1節で選定したパラメータに従い、計算を実施した。RD手前での圧力、流速の結果を3.1節の(1)～(10)に対応させて図3.3～3.12に、ディスクの変形挙動を図3.13～3.15に示す。また、RDの破裂時刻と圧力、流速の最大値を表3.2にまとめて示す。以下では、比較・検討結果を述べる。

#### (1) 大気開放モデルとBTMの比較

放出系に従来の大気開放モデルを用いた場合と付加モデルのBTMを用いた場合とを比較し、図3.3(a), (b)に圧力、流速の計算結果をそれぞれ示す。図中の細線が大気開放モデルで、太線がBTMに相当する。ここでは、大気開放モデルとBTMの違いを除く他の計算パラメータは全て同じとし、RDには設定圧で破裂するシングル型(IFRD=0)のモデルを用いた。

図3.3(a)からは、発生点に入力したピーク値約 $30\text{kg/cm}^2\text{g}$ の圧力波がSG及び配管内を經由してRDに伝播し、また、このRDモデルではディスクが設定圧に達するまでディスクを盲端として扱うため、1.3msec後に圧力波の急峻な立ち上がりが生じていることがわかる。そして圧力が設定圧を越えたためディスクは時刻1.6msecで破裂し、ディスクはモデル上完全開口するためそこでの圧力は瞬時に減圧される。この減圧までの圧力波形の立上りは大気開放モデル及びBTMの両ケースとも同じである。

ディスク破裂後は圧力の減圧の程度に明かな差異がみられ、大気開放モデルの方がBTMに比べ相対的に圧力が高く、また圧力の減衰も緩やかになる。大気開放モデルの方が圧力が高くなる理由は、ディスクの破裂以降の計算モデルの違い、つまり、ディスクは完全開口であるがそこでの圧損係数(=1; 入力パラメータ)を考慮した計算を行っていることに起因している。すなわち、ディスク部ではナトリウムの高速な放出が入力値の圧損係数に対応して抑えられるため、圧力波高値が相対的に高くなる。これは、同図(b)の流速変化からも明らかで、BTMの方が大気開放モデルに比べRD破裂後の放出ナトリウム流速が大きい。厳密には、必ずしもディスクは完全開口するとは限らないため、BTMについてもディスク部での圧損係数を考慮した計算を可能とするのが好ましい(現BTMでも配管での形状圧損係数については考慮している)と考える。今後このモデルの改良についても検討していく必要がある。

大気開放モデルの計算結果ではディスクの破裂直後に現われるピーク圧が最も

大きい、BTMではディスクの破裂直後に現われるピーク圧より約9 msec近辺で現われるピーク圧の方が高くなる。BTMでは、SGと放出系配管内を流れるナトリウムは常に連続しており、圧力波の減衰効果に大きく寄与する気液界面が時間とともに配管の下流側へと移動し、圧力評価点（本計算ではRDの手前7 cmの位置）から次第に離れて行くため、圧力発生点で生じた8 msec近辺に見られる大きなピーク圧（図3.2に示す入力波参照）が強く影響したためと考える。大気開放モデルの場合には、圧力評価点から7 cm下流のディスク部に気液界面を常に固定して、圧力一定の境界条件で計算を行うため、入力波の影響はさほど大きくなりません。

BTMの計算体系では、長さ1.8mの放出系配管がRD下流に接続されており、そこをナトリウムのピストン流が高速で移動する。計算結果では、時刻1.6msecにRDが破裂してから、時刻48.3msecでナトリウムの界面（Water Front）が放出系配管出口に到達しているため、約39m/sの平均速度でナトリウムは配管内を移動したことになる。

## (2) IFRD=0とIFRD=1の比較

RDの解析モデルとして、従来からSWACSで使用していたシングル型RDモデル(IFRD=0)と、付加モデルであるがSWACSとほぼ同様なRD解析モデル(IFRD=1)を用いた場合との計算結果を比較して図3.4に示す。同図(a)と(b)はそれぞれ圧力と流速を示し、図中の細線が従来モデルで、太線が付加モデルに相当する。ここでも、ディスクの解析モデルの違いを除く他の計算パラメータは全て同じで、放出系は大気開放モデルとした。尚、RDの破裂設定圧は5 kg/cm<sup>2</sup>としている。

ここでの目的は、IFRD=0とIFRD=1を比較することで、新たに付加・修正したRDモデルの計算が正常に機能しているのを確認することである。

計算結果の圧力波の比較から、両ケースともディスクは時刻1.6msecで破裂し、ディスク破裂までの圧力波形は両者一致している。また、ディスク破裂直後の時刻十数msec前後での圧力波形には幾らかの差異（最大で約15%程度）が見られ、付加モデルの方が幾分波高値が厳しくなる。しかし、時間の経過とともに、両ケースの圧力波形は次第に一致してくる様子が見られ、特に時刻20msec以降はほぼ同一の波形となる。

以上より、一部軽微な違いはみられるものの、全体的には概略同じ圧力波が得られていると考えられることから、新たに付加・修正した新モデルの計算は正常に機能していることを確認できた。



## (3) IFRD=0とIFRD=2 (分割数=10, 45) の比較

R Dの解析モデルとして、従来のシングル型R Dモデルを用いた場合(IFRD=0)と、有限要素法による解析を行うシングル型R Dモデルを用いた場合(IFRD=2)との計算結果を比較して図3.5に示す。同図(a), (b)は、それぞれ圧力、流速を示し、図中の細線が従来モデルで、太線1, 2が付加モデルに相当する。太線1, 2は、それぞれディスクのメッシュ分割数を10, 45と変化させたものである。付加モデルについては、ディスクが時々刻々と変形していく様子を図3.13に示した。同図(a), (b)がそれぞれ分割数10, 45に対応する。ここでもディスクの解析モデルの違いを除く他の計算パラメータは全て同じで、放出系は大気開放モデルとした。なお、従来モデルの破裂設定圧はPEPT試験で用いたディスクと同じ設定圧(5 kg/cm<sup>2</sup>)とし、付加モデルのディスクについては、PEPTで使用したディスクの形状及び物性値を入力値とした。(前述したように、付加モデルでは破裂設定圧を指定せず、ディスクの変形に伴う中心部の変位量で破裂条件を指定する)

表3.2から示されるように、従来モデル、分割数10及び45の付加モデルの場合のディスクの破裂時刻はそれぞれ1.6, 2.9及び3.2msecとなり、破裂が遅延してくる。この理由は、従来モデルでは破裂以前にディスクを盲端として扱うため、そこで圧力波は剛体反射して圧力は瞬時に上昇し、破裂設定圧に至る。一方付加モデルの場合には、流体を伝播した圧力波はディスクで反射するが、このときディスクは有限要素法によりその変形が計算され、変形に伴う影響が反射波にフィードバックされるという流体とディスクの相互作用を考慮しているため、ディスクの最大変位への到達すなわち破裂の開始は遅延する。図3.5(a)に示す圧力波で、付加モデルの波形の初期立ち上がりが従来モデルよりも高く、そのピーク直後から圧力波が10kg/cm<sup>2</sup>強の付近を約1 msecの微小期間波打っているのは、流体とディスクとの相互作用が生じている結果に対応する。付加モデルで分割数の大きい方がディスクの破裂が遅くなるのは、メッシュ間隔の違いからくる数値計算上の影響と考える。つまり、分割数の小さい場合の結果である図3.13(a)では、ディスクは中央部から変形を開始し、逆に分割数の大きい場合の結果である同図(b)では、ディスクは周囲から変形を開始している。前述した流体へのフィードバックの効果から考えると、ディスクの変形する面積あるいは変形速度が小さいほど流体への減圧効果も小さく、逆に面積あるいは変形速度の大きいほど流体への減圧効果は大きくなる。付加モデルでは、ディスク中央部での変位量が入力値の最大変位に達した時刻にディスクが破裂するとモデル化しているため、ディスクの変形モー

ドの違いがディスク部での圧力波、ディスク中央部での変形速度の違いとなり、破裂時間に影響を及ぼした。

図3.5(a)に示されるディスク手前での圧力波形及び同図(b)に示される流速の変化からは、付加モデルのディスク分割数の違いによる差異はみられず、太線1, 2とも波形がほぼ一致している。圧力波の最大値はディスクの破裂直前にみられるピーク圧であり、分割数10, 45の場合、それぞれ15.7, 14.7kg/cm<sup>2</sup>gとなる。分割数の少ない方が多少圧力波のピークが高くなるが、これもやはりディスクの変形モードの違いと関係した現象と考える。つまり、ディスクの変形は流体を伝播する圧力波の減少に寄与するが、その効果はディスクの変形する面積に依存する。分割数の少ない図3.13(a)の場合、中心部の限られた範囲でのみ初期の変形が開始しているため、その変形面積が小さく減圧効果も小さい。一方分割数の大きい同図(b)の場合、ディスクは全体的に変形を開始しているため、その変形面積が大きく減圧効果も大きくなる。従って、分割数の多い方が最大ピーク圧は低くなったと考える。

流速の最大値(それぞれ34.5, 34.7m/s)は、ディスク破裂後の時刻10msec付近で生じており、その時刻はディスクが完全開口した以降であることから、分割数の違いによる影響はほとんどみられない。

圧力、流速の従来モデルと付加モデルとの比較では、ディスク破裂直前/直後を除き、前述の3.3(2)節の結果と大きな違いはみられない。従来モデルでは、破裂時にみられる最大ピークが付加モデルに比べ低い、これは前述したようにディスク部での圧力の上昇/破裂が付加モデルに比べ早期であったことに起因する。ディスク破裂以降の圧力波形では、RDのタイプの違いによる影響がほとんどみられない。

#### (4) IFRD=2とIFRD=3の比較

RDの解析モデルとして、シングル型RDモデルを用いた場合(IFRD=2)とダブル型RDモデルを用いた場合(IFRD=3)との計算結果を比較して図3.6に示す。同図(a), (b)は、それぞれ圧力、流速を示し、図中の細線がシングル型で、太線がダブル型に相当する。シングル型、ダブル型とも、ディスクの破裂に至るまでの変形挙動解析に有限要素法を用いており、ディスク(ダブル型の場合は接液型である1枚目)は分割数10と両者とも同じである。モデル上の違いは、ダブル型がガス空間を挟んで下流側に2枚目のディスクを有し、前述の2.2.2節で説明したパラメータ $R_1 (=AINL)$ ,  $R_2 (=AFIN)$ ,  $t_1 - t_2 (=TOPN)$ , GAR, GVEによ

り、ダブル型の1枚目ディスクの開口挙動及び2枚目ディスクの変形挙動を計算する点である。それ以外の計算パラメータは全て同じである。

ここでは、主に1枚目ディスクの破裂に伴う圧力波形の違いを確認する目的で比較・検討した。

表3.2に示す1枚目ディスクの破裂時刻は、シングル型及びダブル型とも同じで2.9msecとなり、1枚目ディスク破裂までの変形挙動の計算がシングル型及びダブル型とも一致していることを示している。

図3.6(a)の計算結果からは、シングル型の圧力波形でみられた初期数msecにある1枚目ディスクの破裂時の急峻なピークだけでなく、ダブル型の場合にはその後数十msec以降にある穏やかなピーク（ここでは31.4msec）もみられる。後者のピークは、2枚目ディスクの破裂に伴うピークである。1枚目ディスクの破裂以前にみられる波形は、シングル型及びダブル型ともほぼ一致している。ダブル型の場合には、ディスク破裂時の急峻なピークの直後に、 $28.5\text{kg/cm}^2\text{g}$ の最大値を示すピークが再度みられるが、後述するようにこのピークは、ダブル型のみで考慮されている1枚目ディスクの開口挙動に関与するパラメータ値に依存して現われるピークである。詳細な検討は後の項で行うが、物理的な解釈としては、瞬時に完全開口しない破裂後のディスクにより、ディスク部でのナトリウム流動が妨げられて圧力が上昇するために発生したピークである。このことは、同図(b)で示される流速変化（破裂直後の流速が遅い）からも理解できる。

以上で述べたシングル型とダブル型の計算結果の比較からは、1枚目ディスクの破裂に至るまでのディスクの変形及び圧力波伝播挙動の計算に対しては、両者間の整合性が十分にとれているものと言える。ディスク破裂後の圧力波形については、ディスクの破裂後挙動のモデル化の方法及び2枚目ディスクの存在の有無により違いが生じる。

#### (5) 2枚目ディスク分割数(10,45)の比較

ダブル型RDの解析で、2枚目ディスクの分割数を45と細かくした場合と10と粗くした場合との計算結果を比較して図3.7に示す。同図(a), (b)は、それぞれ圧力、流速を示し、図中の細線が細かい場合で、太線が粗い場合に相当する。また、ディスクの変形挙動を図3.14~3.15に示す。ここでは、2枚目ディスクの分割数の違いを除く他の計算パラメータは全て同じとした。

表3.2からは、1枚目ディスクの破裂時刻、圧力及び流速の最大値もほぼ一致していることがわかる。2枚目ディスクの破裂時刻は、45, 10分割の場合にそれぞれ

れ31.4, 32.0msecとなり、多少の違いがみられる。しかしながら、2枚目ディスクはガス空間に流入したナトリウムによりそこでのガスが断熱圧縮され、ディスクの変形が開始し、破裂に至るモデルであり、またディスクと流体との直接の相互作用を考慮しないモデルであるため、2枚目ディスクの破裂時刻の違いは全体の圧力波形に対してさほど大きな影響を及ぼさない。このことは、図3.7の圧力及び流速の比較で、2枚目ディスクの破裂時刻のずれを除き計算結果はほとんど両者一致しているという事実からも確認できる。

2枚目ディスクの変形挙動からは、前述の(3)項で述べたのと同様な結果が得られており、分割数が多いとディスクの周囲から、分割数が少ないとディスクの中央部から変形が開始する。従って、ディスクの分割数の違いによる破裂時刻の違いは、この変形モードの違いから生じたものであると確認できる。なお、分割数の違いによるディスクの破裂時刻への影響（前述の3.3(3)節では、分割数が小さいほど早く破裂し、分割数が大きいほど破裂時刻は遅くなっているが、ここでは逆の傾向となっている）は、流体とディスクとの相互作用が有るか否かの違いに起因していると考えられる。（1枚目のディスクは流体の圧力によりディスクの変形面積・変形速度がフィードバックされるが、2枚目のディスクはディスクの変形とは無関係に流入ナトリウム量によりガス圧が決まり、その圧力でディスクの変形が計算される）

#### (6) 時間間隔TOPNの影響

ダブル型RDの解析で、初期開口度(AINL)から最終開口度(AFIN)に達するまでの時間(TOPN)が長い場合と短い場合との計算結果を比較して図3.8に示す。同図(a), (b)は、それぞれ圧力、流速を示し、図中の細線が長い場合で、太線が短い場合に相当する。ここでは、TOPNの違いを除く他の計算パラメータは全て同じとした。

表3.2からは、各ケースとも1枚目ディスクは同時刻2.91msecで破裂するが、2枚目は、TOPNの長い場合が32.0msec、短い場合が26.8msecとなり、短い方が早く破裂する。これは、ディスクが早く最終開口度に到達して、ナトリウムのガス空間への流入がより早く達成されるために生じた結果である。ディスク破裂後のナトリウムの流入が早いため、図3.8(a)に示されるように、ディスク破裂後の約3 msecの所に見られるピーク圧も、28.5から23.6kg/cm<sup>2</sup>gと低くなっている。なお、このピーク圧の幅（ディスクの破裂直後から圧力が上昇してピークとなり、その後急峻に圧力が減衰してくるまでの幅）はTOPNに依存して変化し、TOPNの大きい

方が幅も広くなることが分かる。

ディスク破裂後のガス空間へのナトリウムの流入の違いは、同図(b)の流速の変化からも確認できる。

#### (7) 初期開口度AINLの影響

ダブル型RDの解析で、初期開口度(AINL)を全閉に相当する0.0とした場合と半開に相当する0.5とした場合の計算結果を比較して図3.9に示す。同図(a), (b)は、それぞれ圧力、流速を示し、図中の細線が0.0の場合で、太線が0.5場合に相当する。ここでは、AINLの違いを除く他の計算パラメータは全て同じとした。

表3.2からは、1枚目ディスクはやはり2.91msecと両ケースとも同時刻で破裂するが、2枚目ディスクは開口度が0.0の場合が32.0、0.5の場合が27.1msecと開口度の増加とともに早くなる。これも、先の3.3(6)節で述べた結果と同様に、初期開口度の大きい方がナトリウムのガス空間への流入及びガス圧の上昇が早く、2枚目ディスクの早期な破裂へと至るためである。

図3.9(a)から、初期開口度が大きくなると、ディスク破裂後の約3 msecの所にみられるピーク圧も28.5から約13kg/cm<sup>2</sup>g程度まで低下し、特に本ケースの場合には、最大ピーク圧がディスクの破裂時に発生するピーク圧の15.7kg/cm<sup>2</sup>gを越えない程になる。

#### (8) 最終開口度AFINの影響

ダブル型RDの解析で、最終開口度(AFIN)を全開に相当する1.0とした場合と半開に相当する0.5とした場合との計算結果を比較して図3.10に示す。同図(a), (b)は、それぞれ圧力、流速を示し、図中の細線が1.0の場合で、太線が0.5の場合に相当する。ここでは、AFINの違いを除く他の計算パラメータは全て同じとした。

表3.2からは、従来の結果と同様に1枚目ディスクの破裂時刻は変化していないが、開口度を半開の0.5とした場合には2枚目のディスクが破裂に至っていない。

図3.10(a)からは、ディスクの破裂直後に見られるピーク圧が28.5から38.1kg/cm<sup>2</sup>gに上昇する。また、圧力発生点の入力波の8 msec近辺に見られる大きなピーク圧(図3.2に示す入力波参照)が強く影響しており、10msec近辺で約15kg/cm<sup>2</sup>g程度のピーク圧が生じている。これは、最終開口度が半開となったために、ナトリウムのガス空間への放出が妨げられ、圧力波の減衰効果に対して有効に作用しなくなった結果であると考えられる。このことは同図(b)からも示され、ナトリウムの流速の最大値は全開の場合の36.4m/sに比べ17.4m/sと小さく、流速は約45msecの

所でゼロとなっている。尚、後者のケースの場合には、2枚目ディスクは初期スパイク圧領域で破裂せず、準定常圧領域で破裂することになる。

#### (9) 開口度変化パラメータGARの影響

ダブル型RDの解析で、開口面積の変化を表わすパラメータGARを0.5（開口度の変化が上に凸）、1.0（開口度の変化がリニア）、2.0（開口度の変化が下に凸）と変化した場合（図2.2参照）の計算結果を比較して図3.11に示す。同図(a)、(b)は、それぞれ圧力、流速を示す。図中の細線が1.0、太線1が0.5、そして太線2が2.0の場合に相当する。ここでは、GARの値の違いを除く他の計算パラメータは全て同じとした。

表3.2からは、GARを0.5、1.0、2.0変化させるに従い、1枚目ディスクの破裂時刻は変化していないが、2枚目ディスクの破裂時刻は28.1、32.0、38.4msecと遅延し、一方圧力の最大値は何れも1枚目ディスクの破裂直後に見られるピーク値である15.9、28.5、48.6kg/cm<sup>2</sup>gと大きくなる。これは、初期の開口度が同じでも、その変化の程度により圧力波形が大きく影響されることを示しており、それは、図3.11(a)からも明らかである。また、同図(b)からも分かるようにナトリウムのガス空間への放出速度も変化し、その影響で2枚目ディスクの破裂時刻が変化する。しかし、2枚目ディスクの破裂に伴う圧力のピーク値にはさほど違いが生じていない。

GARの値に依存して圧力の最大値が大きくなるのは、GARの値が増加するほどディスクの破裂直後での開口に至る速度が遅くなる、すなわち、より長い時間ディスクが全閉に近い状態にあることを意味している。そのため、GARが大きいほどディスクの破裂直後からガス空間へのナトリウムの放出が妨げられている時間が長くなり、その間は圧力波の減衰効果が有効に作用しない。

#### (10) ディスク変形速度パラメータGVEの影響

ダブル型RDでの1枚目ディスク破裂後の解析で、ディスクが破裂せず残存している部分の過渡的な変形速度（平均速度）の変化を表わすパラメータ（GVE）を0.5（速度変化がリニア）、1.0（速度変化が上に凸）、0.0（速度変化が下に凸）と変えた場合（図2.3参照）の計算結果を比較して図3.12に示す。同図(a)、(b)は、それぞれ圧力、流速を示し、図中の細線が0.5、太線1が1.0、太線2が0.0の場合に相当する。ここでは、GVEの値の違いを除く他の計算パラメータは全て同じとした。

表3.2からは、GVEを1.0, 0.5, 0.0と変えるに従い、1枚目ディスクの破裂時刻は変化しないが、2枚目ディスクの破裂時刻は29.0, 32.0, 36.5msecと遅延し、また圧力の最大値は、何れも1枚目ディスクの破裂直後に発生するピーク値である17.3, 28.5, 45.8kg/cm<sup>2</sup>gと大きくなる。やはり2枚目ディスクの破裂時に発生するピーク値には、各ケース間にほとんど差異が生じていない。

これらは、1枚目ディスクの破裂後の変形速度が、ナイフ先端に接した時刻の速度からゼロまで過渡変化する際の挙動の違いにより、ディスク部でのナトリウム流速が影響を受けた結果であると考えられる。速度変化がリニアである0.5のGVEに対し、ディスク破裂後の変形速度が初期速度（ナイフ先端に達した直後の初期変形速度）から一旦増加し、緩やかな最大ピーク値をとってゼロに至るケースに相当するGVE=1.0の場合には、放出ナトリウムはディスクにより流れを妨げられる効果が少ないため、ガス空間への初期ナトリウム流速が相対的に大きくなり、ディスクでの圧力上昇は小さくなる。一方、破裂後の変形速度が初期速度から急速に減少し緩やかな最小ピーク値（負の変形速度となる）をとってからゼロに至るケースに相当するGVE=0.0の場合には、ディスク部での放出ナトリウムの流れが妨げられ、ナトリウム流速の減少と、ディスク部での圧力の上昇が顕著になる。

図3.12(b)からも示されるように、ガス空間へのナトリウム流速の程度に違いがみられており、その影響により2枚目ディスクの破裂時刻にも差異が生じた。

### 3.4 まとめ

パラメータを用いた検証解析の結果を以下でまとめる。

#### (1) 大気開放モデルと放出系のBTMの比較

大気開放モデルでは、入力パラメータである破裂後のRD部圧損係数の値に対応して、ディスク部近傍の圧力波形がBTMに比べ相対的に高くなるが、これは破裂後のモデルの取扱に起因するものである。

一方、BTMでは圧力波の減衰効果を有する気液界面が時間とともに移動して行くために、圧力評価点から気液界面が遠ざかる場合、そこでの圧力波は上流側から伝播する圧力波の影響を受け易くなる。BTMは実際の圧力波伝播現象に忠実な計算が可能であるが、現在のモデルにはRD部の圧損係数を考慮していないため、RDの破裂後はそこでの圧力波高値が相対的に低くなる。よって、現コードとの整合性を保つ上では、RD部の圧損係数の取扱いを考慮したモデルへの改造が今後必要と考える。

#### (2) IFRD=0（従来モデル）とIFRD=1の比較

軽微な違いは一部みられるが、概ね圧力波形は一致していることから、付加モデルの計算は正常に機能していることを確認した。これにより、付加モデルの計算機能の妥当性を検証した。

#### (3) IFRD=0（従来モデル）とIFRD=2（有限要素法による解析モデル）の比較及びIFRD=2の場合のディスク分割数（10,45）の影響

有限要素法解析では、流体との相互作用を考慮したディスクの弾塑性解析を行うため、ディスクの破裂時刻は遅く、破裂時のピーク圧は高くなるなど従来モデルとの差異が生じるが、ディスクの破裂以降の圧力波形には、RDのモデルによる違いはほとんど見られない。このことは、RD破裂までの応答が圧力波伝播に対し大きく寄与することと、RD破裂後は(2)項で述べた圧損係数の効果を除きRDの存在はさほど圧力波伝播に寄与しないことを示している。

分割数の違いは、ディスクの変形モード、破裂時刻及びピーク圧等に多少の影響を与えるが、有意なものではない。ディスクの変形モードでは、分割数が少ないとディスク中央部から、分割数が多いとディスクの周囲から変形



を開始する。圧力波伝播という観点からは、ディスク分割数の及ぼす影響及びRD分割数の増加による計算時間の増大の程度を考慮すると、特にRDの変形挙動に着目する場合以外にはディスク分割数の増加は必ずしも得策ではないと考える。

(4) 有限要素法解析のIFRD=2 (シングル) とIFRD=3 (ダブル) の比較

ダブル型の1枚目ディスクとシングル型ディスクの破裂時刻、破裂時の変形挙動や圧力波形はほとんど一致することを確認した。ダブル型の1枚目ディスクの破裂以降は、ダブル型特有の構造、解析モデルの違いにより圧力波形に違いが生じる。

ここでは、シングル及びダブル型について接液型ディスクの変形挙動に関する解析モデルの整合性を確認することができ、またダブル型RDに特有な圧力波形の特徴も把握できた。

(5) IFRD=3の場合の2枚目ディスク分割数(10,45)の影響

(3)の結果と同様に、分割数の違いは2枚目ディスクの変形モード、破裂時刻及びピーク圧等に多少の差異を生じるが、圧力波形への影響は小さい。

ディスクの変形モードも、(3)と同様分割数が少ないとディスク中央部から、分割数が多いとディスクの周囲から変形を開始する。

2枚目ディスク分割数の選定に関しても、(3)の場合と同様と考える。

(6) 1枚目ディスクの開口度の変化する時間間隔TOPNの影響

TOPNが小さいほど1枚目ディスクは早く最終開口度に達するため、ディスクの破裂直後に生じるピーク圧及びピーク幅は小さくなる。また、ガス空間へのナトリウム流入が早まるため、2枚目ディスクの破裂時刻も早くなる。

TOPNは1枚目RD破裂時に生じるピーク波形を決定する重要な因子であるため、その選定に関しては実際のRD破裂時刻を推定して入力するのが好ましいと考える。

(7) 1枚目ディスクの初期開口度AINLの影響

初期開口度が大きいほど、破裂直後のガス空間へのナトリウム流入が多くなるため、1枚目ディスクの破裂直後に生じるピーク圧は小さく、2枚目デ

ディスクの破裂時刻は早くなる。

R D 部の圧力波のピークを抑えるためには、初期開口度大きい方が好ましいが、実際の R D 破裂に対しては初期開口度を予め設定する事やその推定は難しいため、計算時の初期開口度には“ゼロ”を与えるのが妥当と考える。

(8) 1 枚目ディスクの最終開口度AFINの影響

最終開口度が小さくなるほど、破裂直後のガス空間へのナトリウム流入が少なくなるため、1 枚目ディスクの破裂直後に生じるピーク圧は大きく、2 枚目ディスクは破裂しづらく（本ケースの場合は破裂に至らなかった）なり、圧力波形は、盲端（全閉）での波形に近くなる。

最終開口度も R D 部のピーク圧に影響する重要な因子であるため、設定値に関しては実際の R D 破裂後の開口度を試験から推定して入力すべきである。

(9) 開口度の過渡的变化を表わすパラメータGARの影響

パラメータGARが大きくなるほど1 枚目ディスクの開口が遅くなるため、破裂直後に生じるピークはより鋭く、高くなる。また、2 枚目ディスクの破裂時刻は遅くなる。GARが小さくなると、この傾向は逆になる。

実際の R D 破裂挙動に対するGARの最適値を推定するのは難しいと考える。よって、GARはベストフィッティング曲線を得るためのパラメータと考え、上記(6)～(8)のパラメータを補正する係数と位置づけて使用すべきと考える。

(10) ディスクの変形速度の過渡的变化を示すパラメータGVEの影響

パラメータGARと逆に、GVEが小さくなるほど1 枚目ディスクの変形速度の減衰が早くなる（ナトリウムとの抵抗が大きくなる）ため、破裂直後に生じるピークはより鋭く、高くなる。また、2 枚目ディスクの破裂時刻は遅くなる。GVEが大きくなると、この傾向は逆になる。

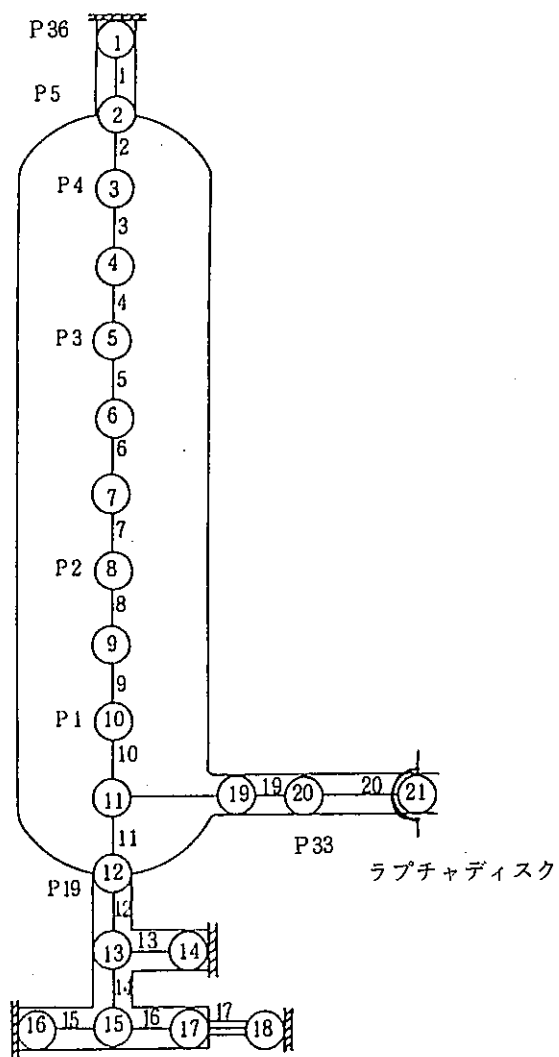
GVEのパラメータも、上記のGARと同じように最適値の推定は難しいと考えられるため、やはりベストフィッティング曲線を得るためのパラメータとすべきである。

表3.1 パラメータ計算一覧表

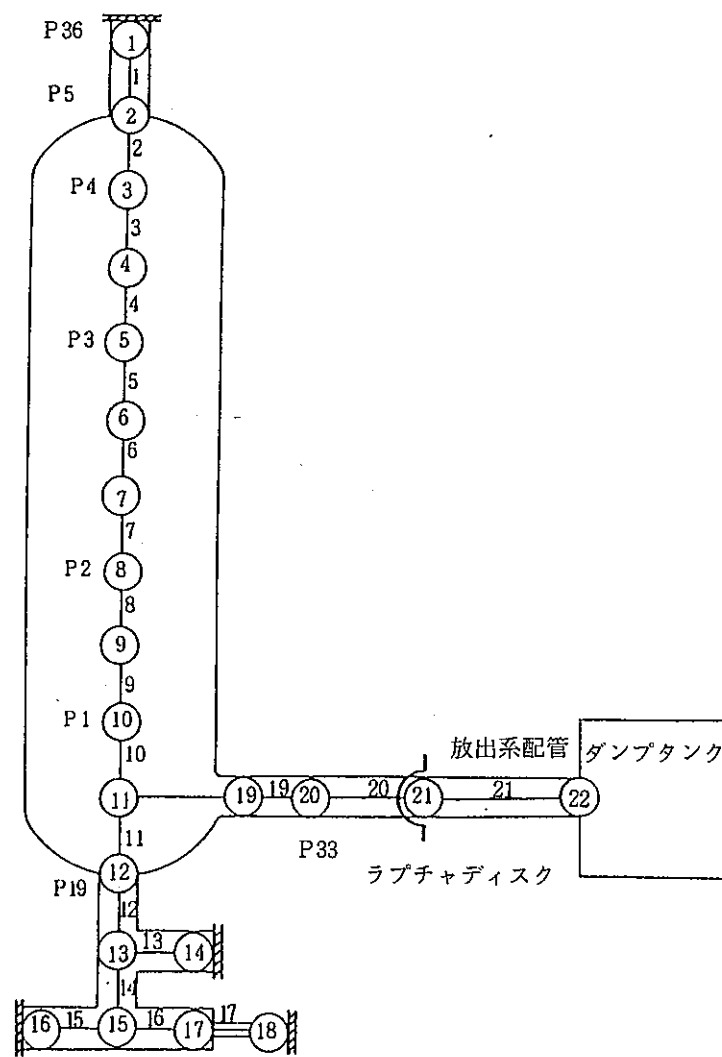
No	R / D タイプ	放出系 モデル	R/D 破 裂条件	R / D 分割数 (1枚目)(2枚目)		備 考					
1	IFRD = 0 (従来 モデル)	大気開 放モデル	設定圧 RD239  PR = 5	-	-	シングル・ラプチャディス クの破裂設定圧による破裂					
2		B T M				↑ (放出系モデルの解析)					
3	IFRD = 1	大気開 放モデル	最大 変位	ID277 = 10	-	シングル・ラプチャディス クの破裂設定圧による破裂					
4	IFRD = 2					シングル・ラプチャディス クの有限要素法による解析					
5						RD1065 = 0.016	ID277 = 45	↑ (ディスク分割数の違い)			
-	-	-	-	-	-	ダブルR/Dパラメータ (ID-No.)					
						1270 1280 1290 1300 1310					
6	IFRD = 3	最大 変位	ID277 = 10	ID400 = 45	TOPN 4E-3	AINL 0.0	AFIN 1.0	GAR 1.0	GVE 0.5		
7										RD1065 = 0.016	ID400 = 10
8										RD1200 = 0.016	
9											
10											
11											
12											
13											
14											

表3.2 R/Dの破裂時刻及び最大圧力/流速

No.	R/D 破裂時刻 (msec)		最大圧力 (kg/cm <sup>2</sup> g)	最大流速 (m/s)
	(1枚目)	(2枚目)		
1.	1. 6 3	-	1 1. 7	3 7. 4
2	1. 6 0		1 4. 5	4 2. 5
3	1. 6 3		1 1. 8	3 4. 8
4	2. 9 1		1 5. 7	3 4. 5
5	3. 2 3		1 4. 7	3 4. 7
6	2. 9 1	3 1. 4	2 8. 5	3 6. 0
7	2. 9 1	3 2. 0	2 8. 5	3 6. 4
8	2. 9 1	2 6. 8	2 3. 6	4 3. 5
9	2. 9 1	2 7. 1	1 5. 7	4 2. 9
1 0	2. 9 1	(破裂せず)	3 8. 1	1 7. 4
1 1	2. 9 1	2 8. 1	1 5. 9	4 1. 4
1 2	2. 9 1	3 8. 4	4 8. 6	3 1. 0
1 3	2. 9 1	2 9. 0	1 7. 3	3 9. 9
1 4	2. 9 1	3 6. 5	4 5. 8	3 2. 4



(a) 大気開放モデル



(b) B T M

図3.1 感度解析用のネットワークモデル

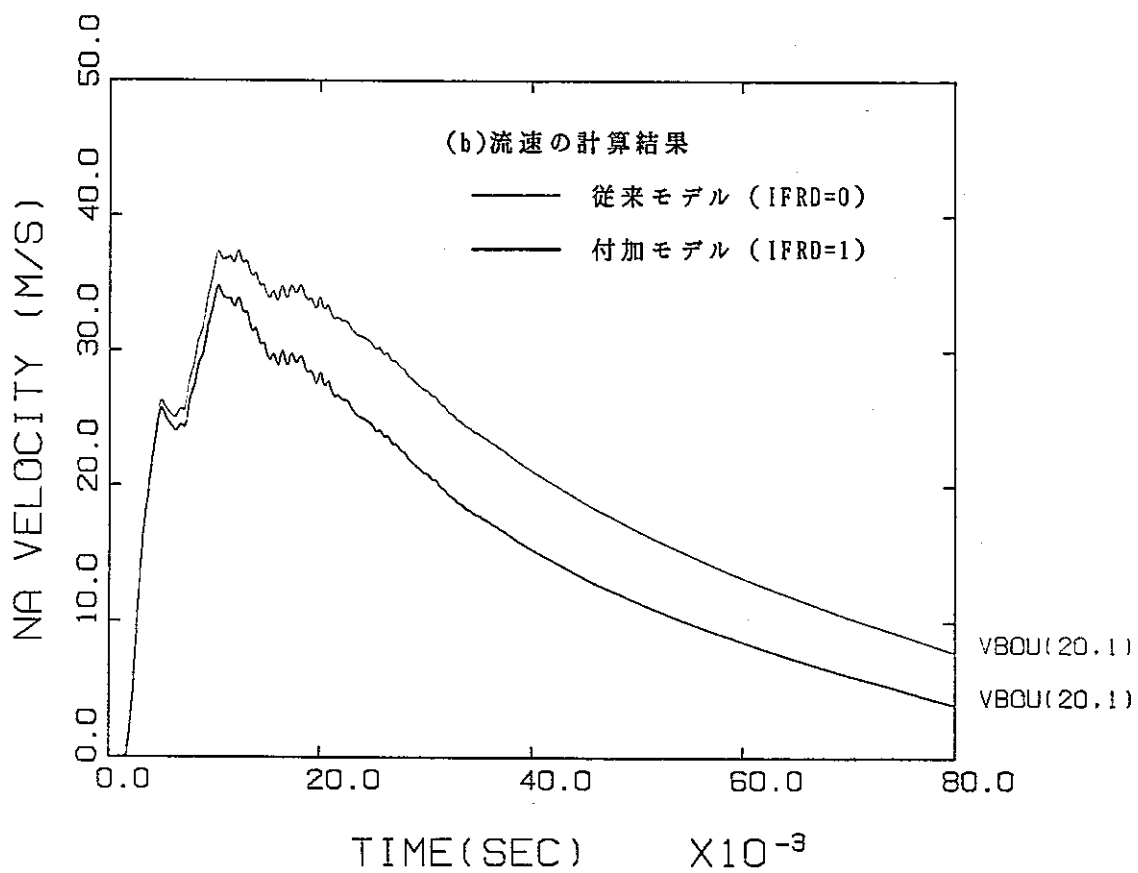
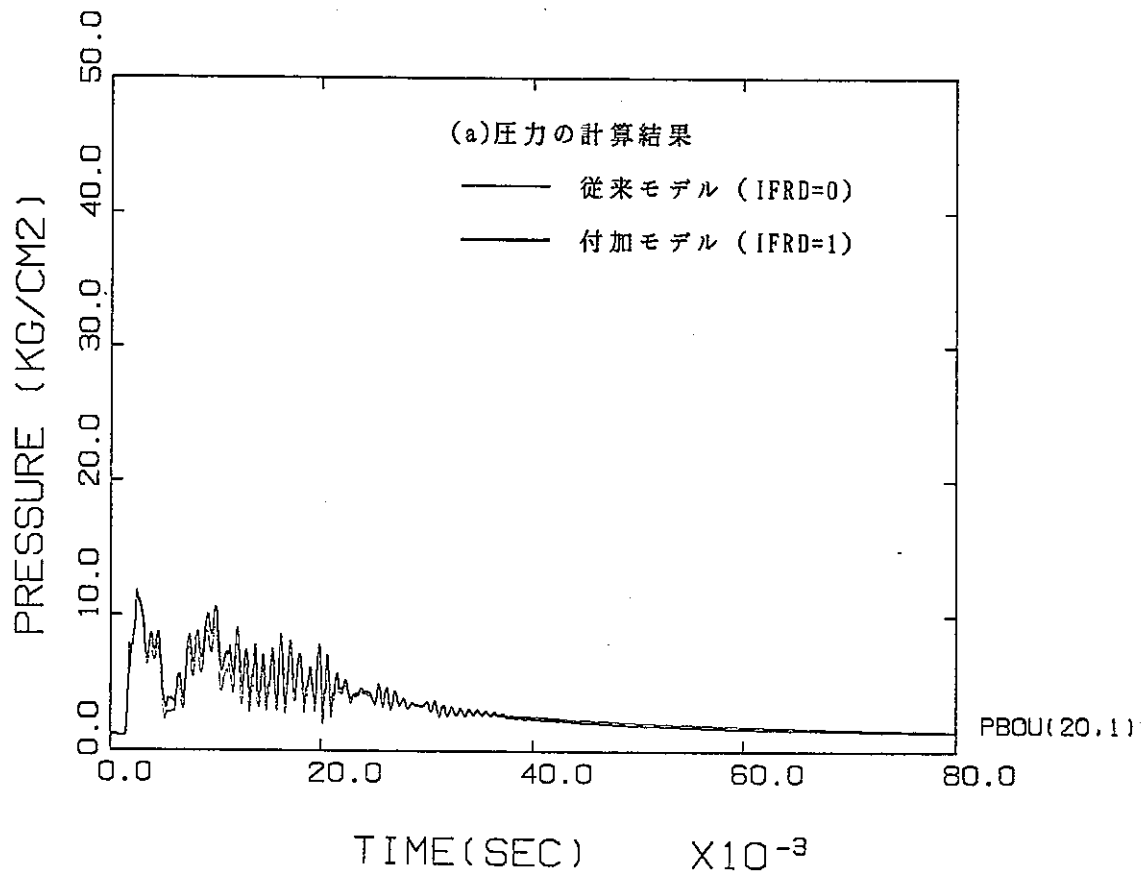


図3.4 感度解析結果 (IFRD=0/IFRD=1の比較: No.1,3)

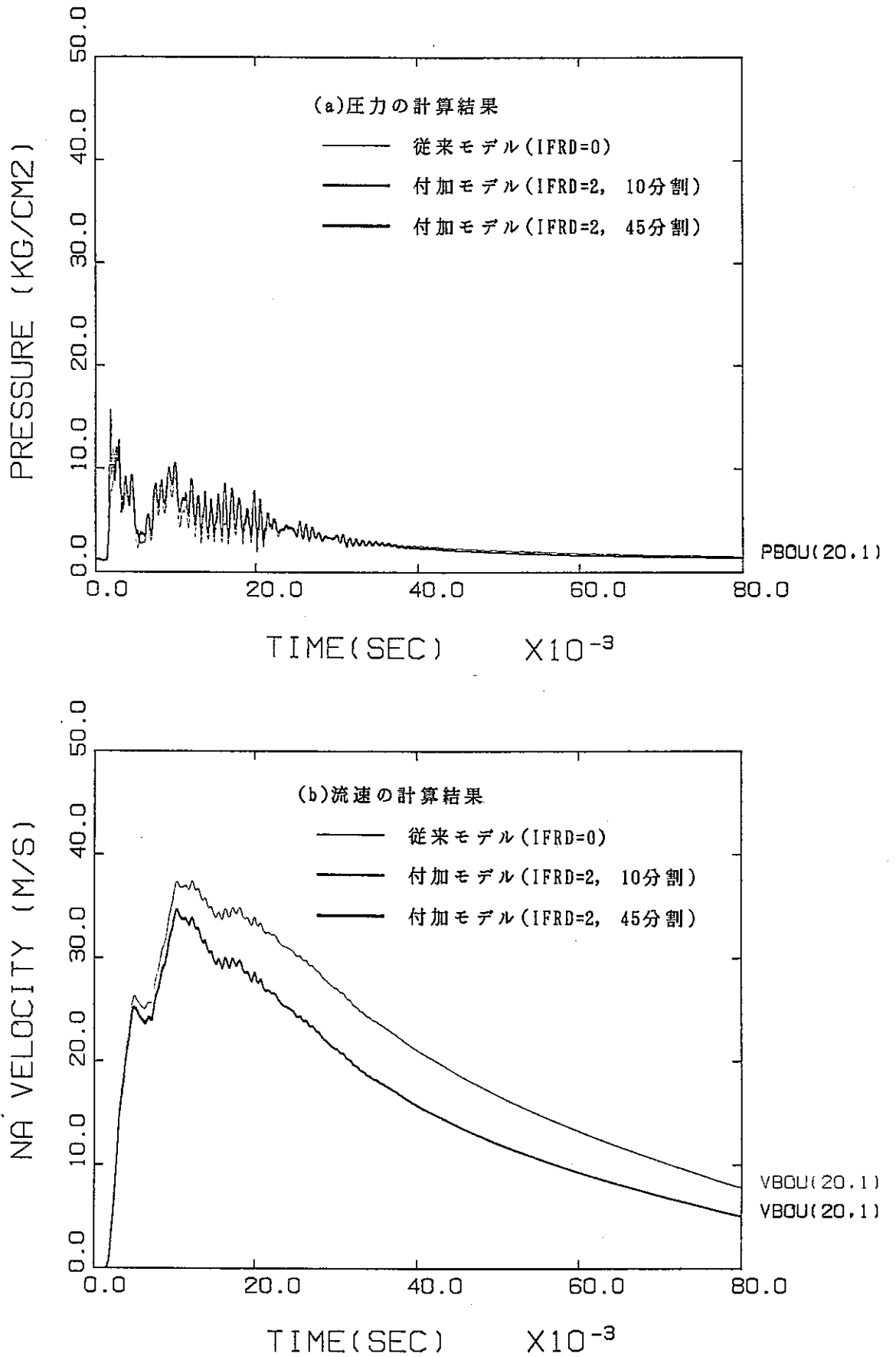


図3.5 感度解析結果 (IFRD=0 / IFRD=2(分割数10,45)の比較: No.1,4,5)

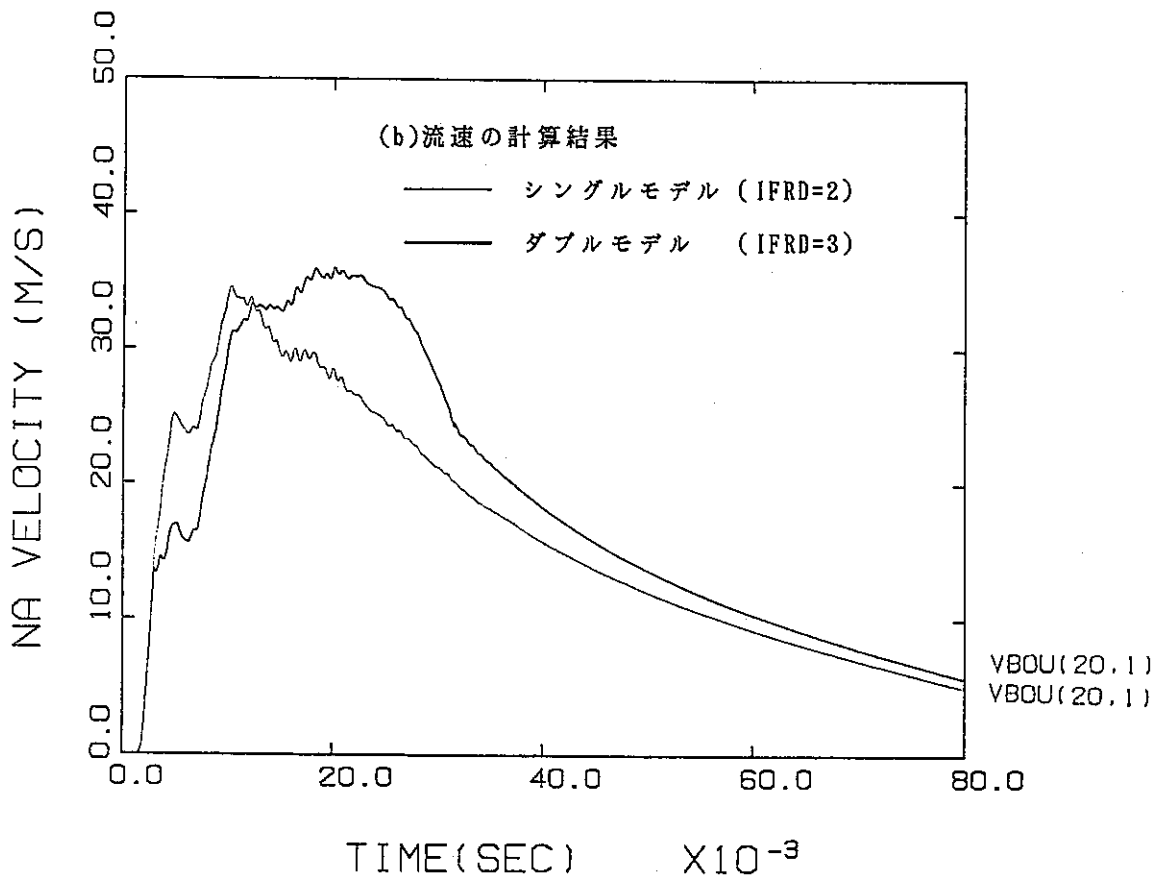
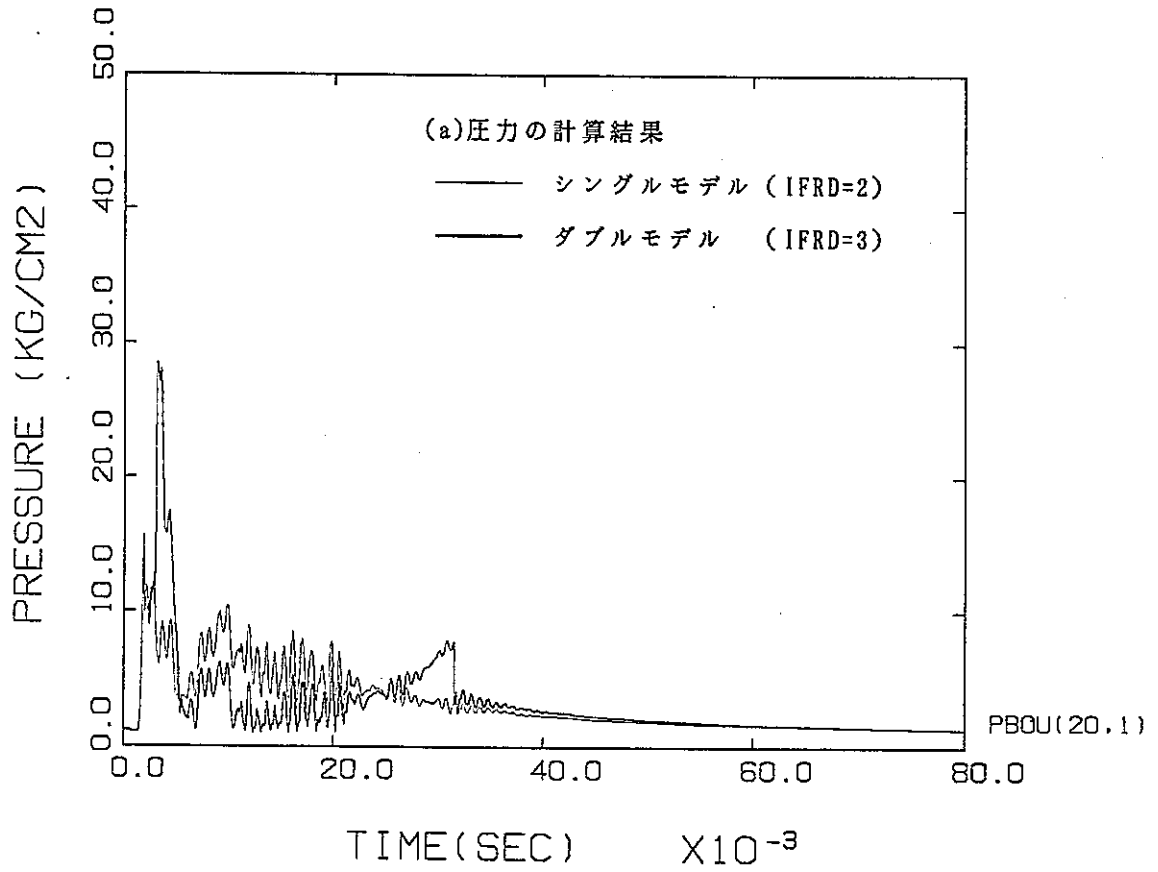


図 3.6 感度解析結果 (IFRD=2/IFRD=3の比較: No.4,6)



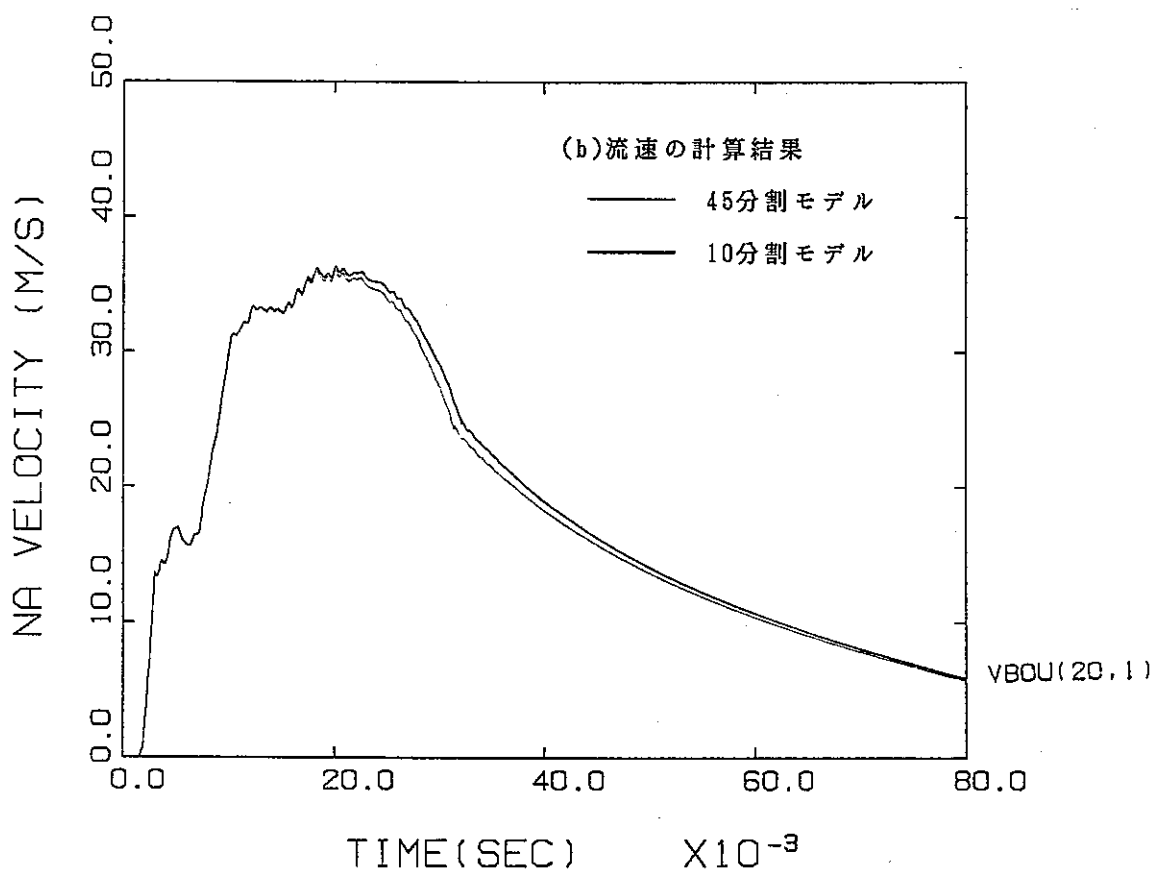
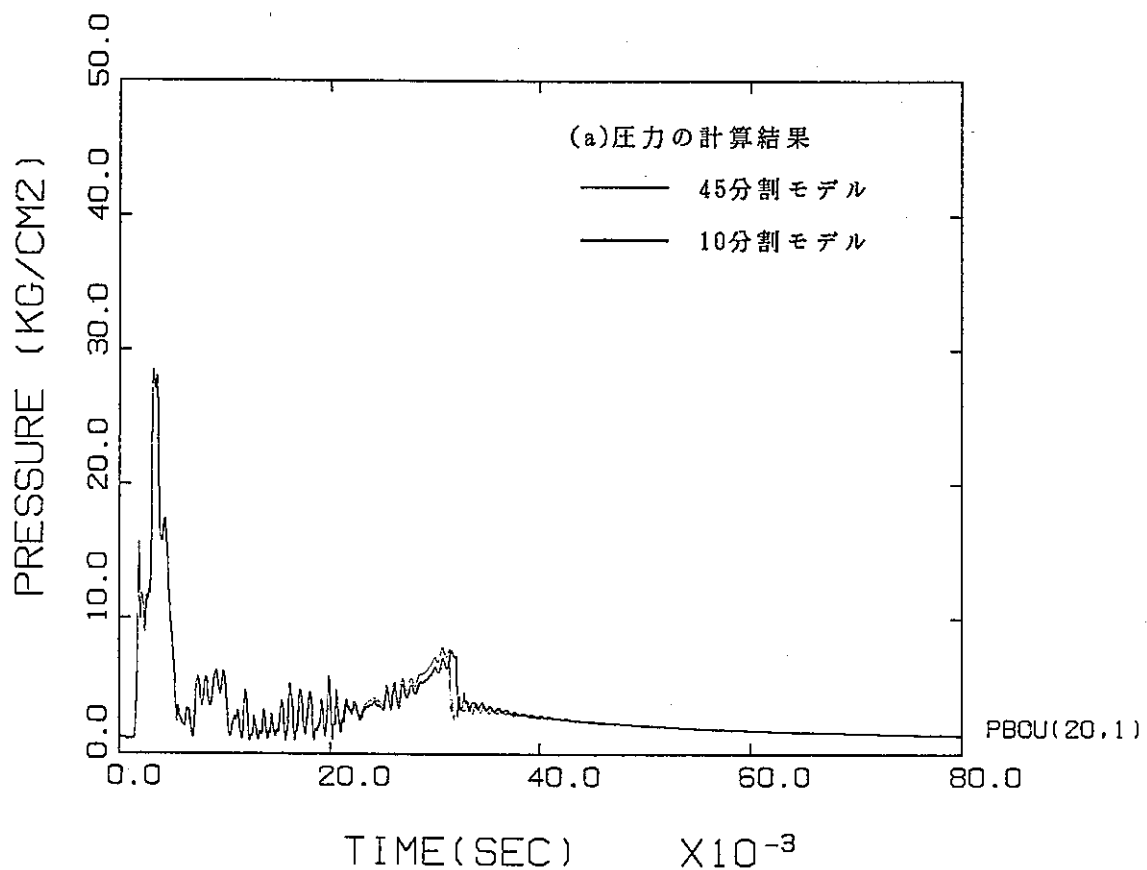


図3.7 感度解析結果 (2枚目ディスク分割数(10,45)の比較: No.6,7)

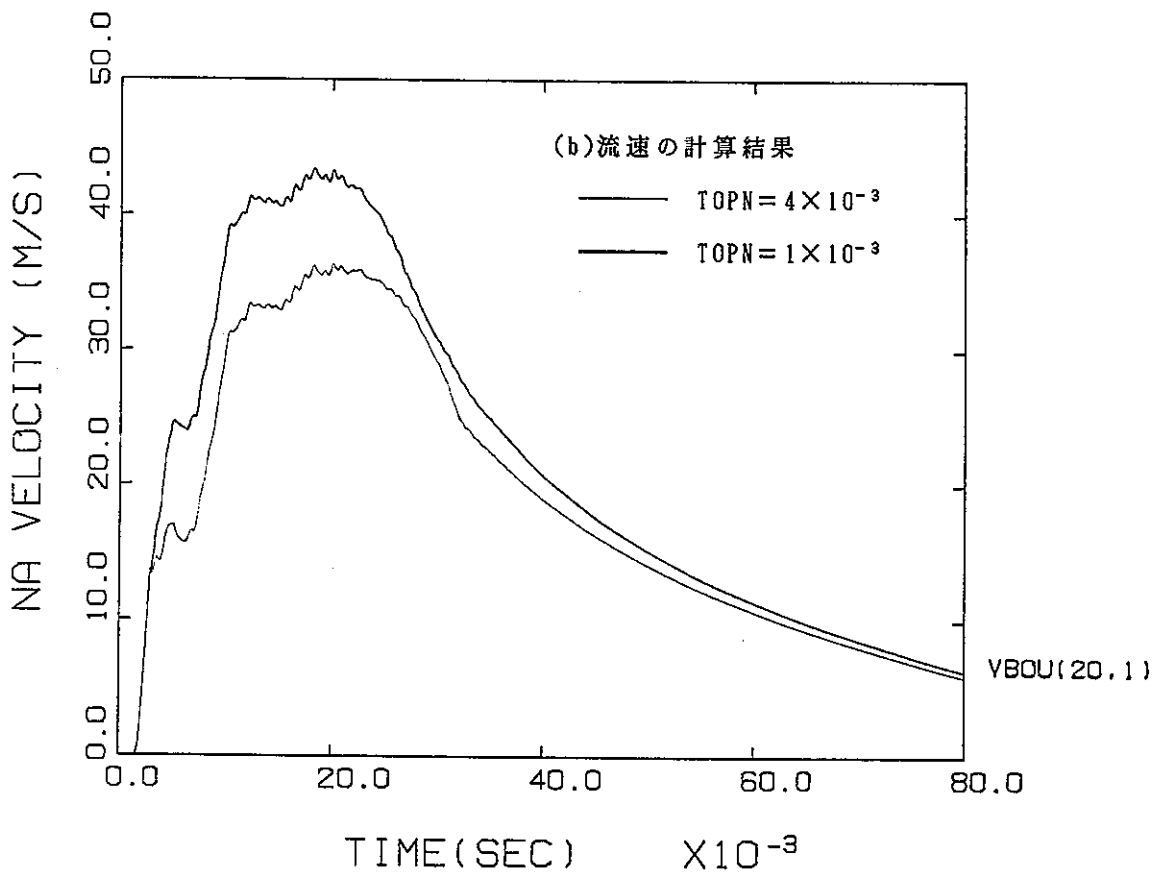
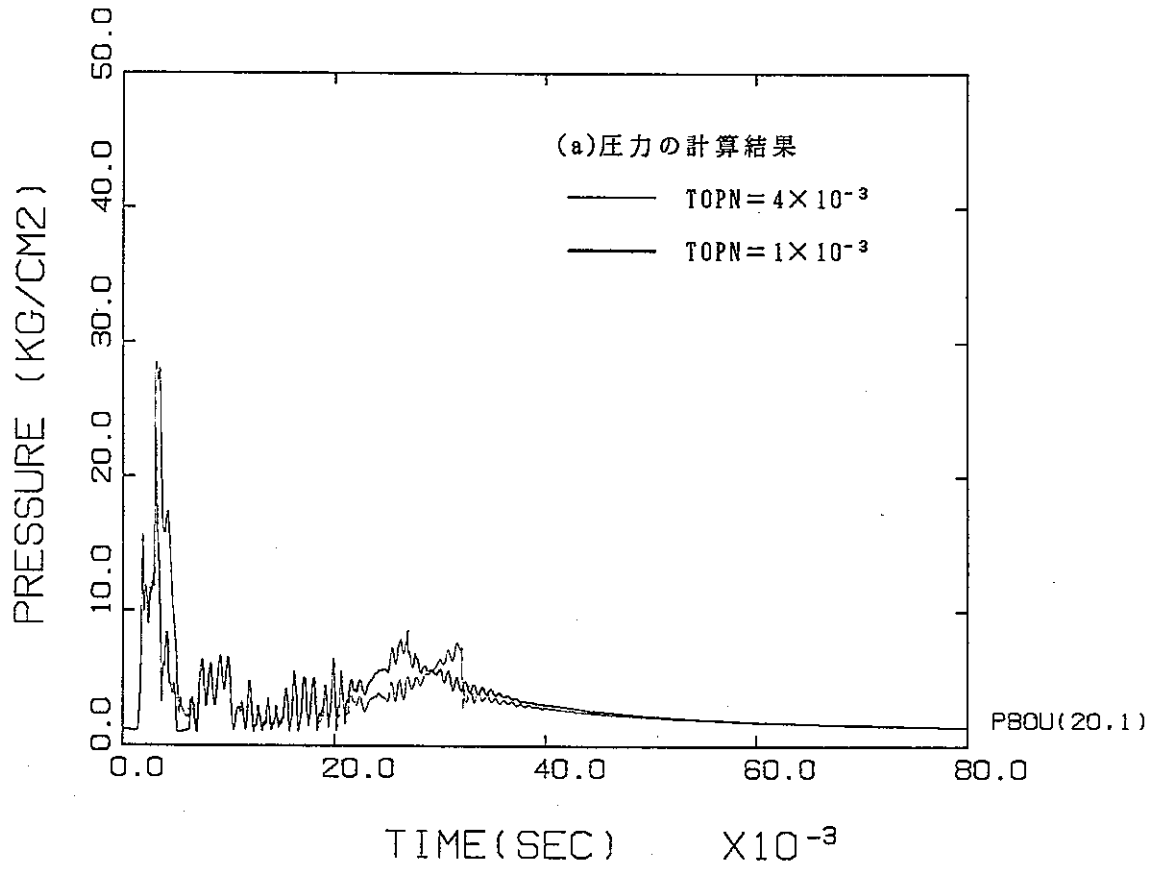


図 3.8 感度解析結果 (TOPNの比較: No.7,8)

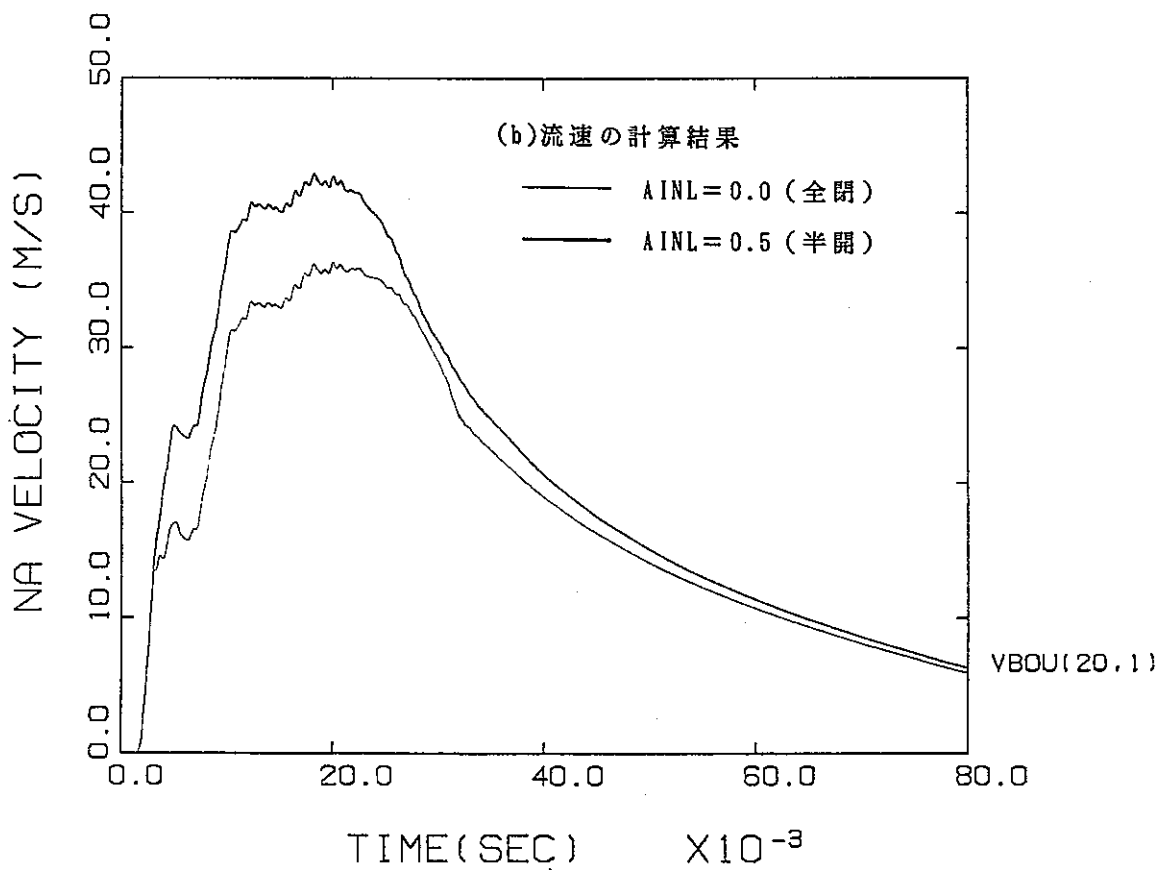
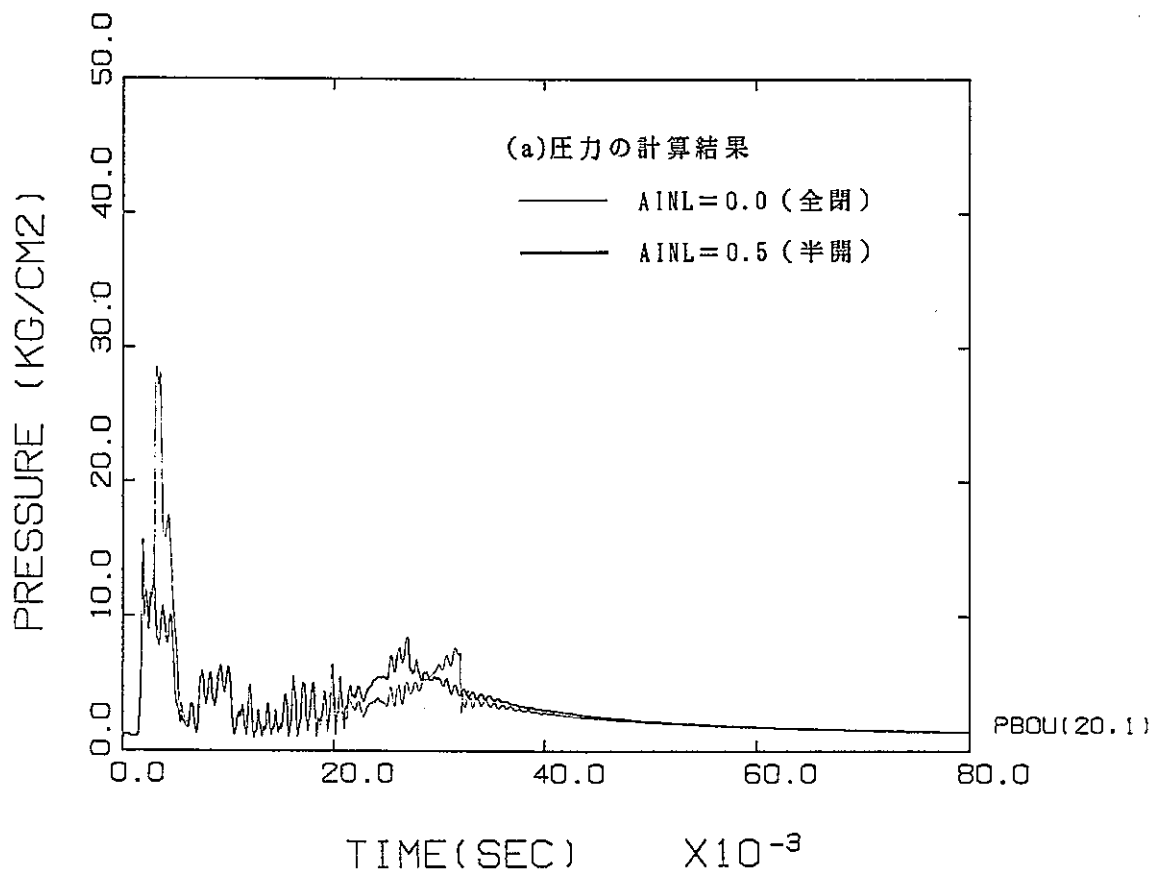


図3.9 感度解析結果 (AINLの比較: No.7,9)

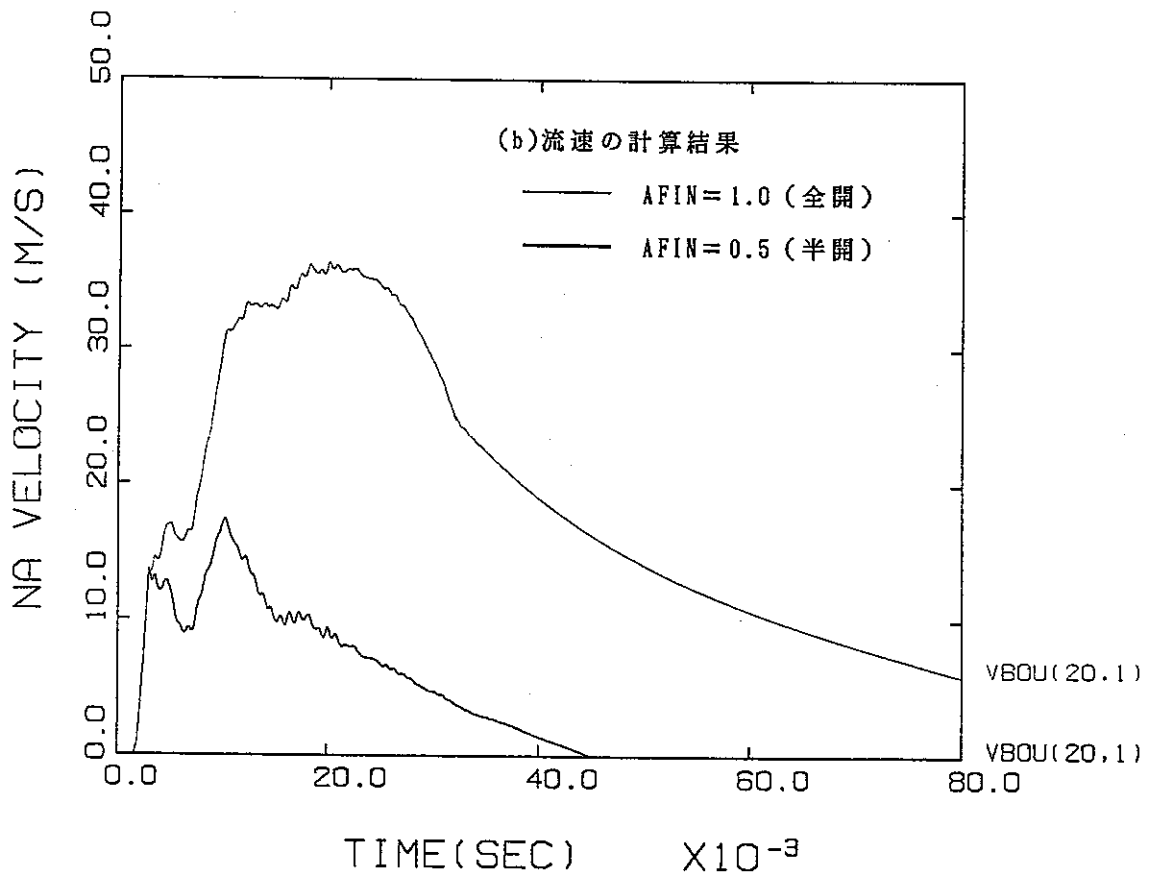
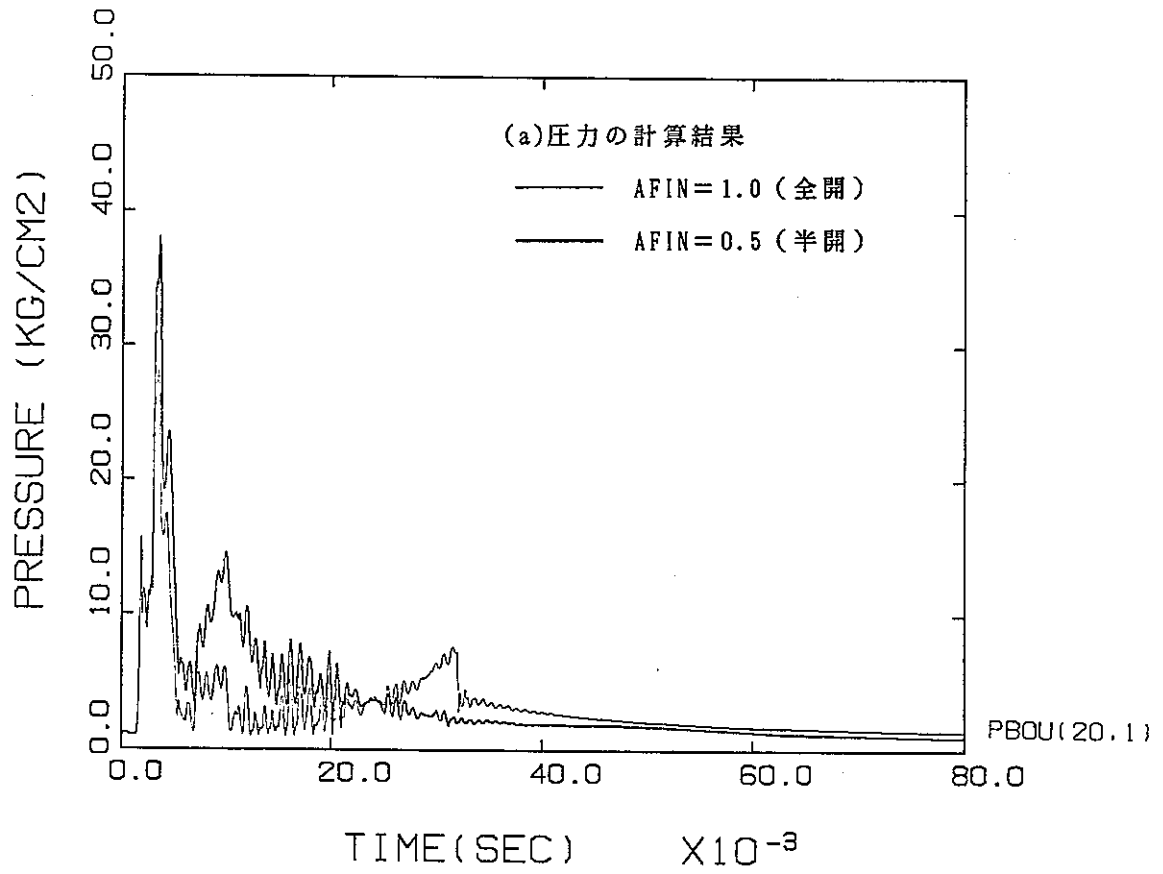


図3.10 感度解析結果 (AFINの比較: No.7,10)

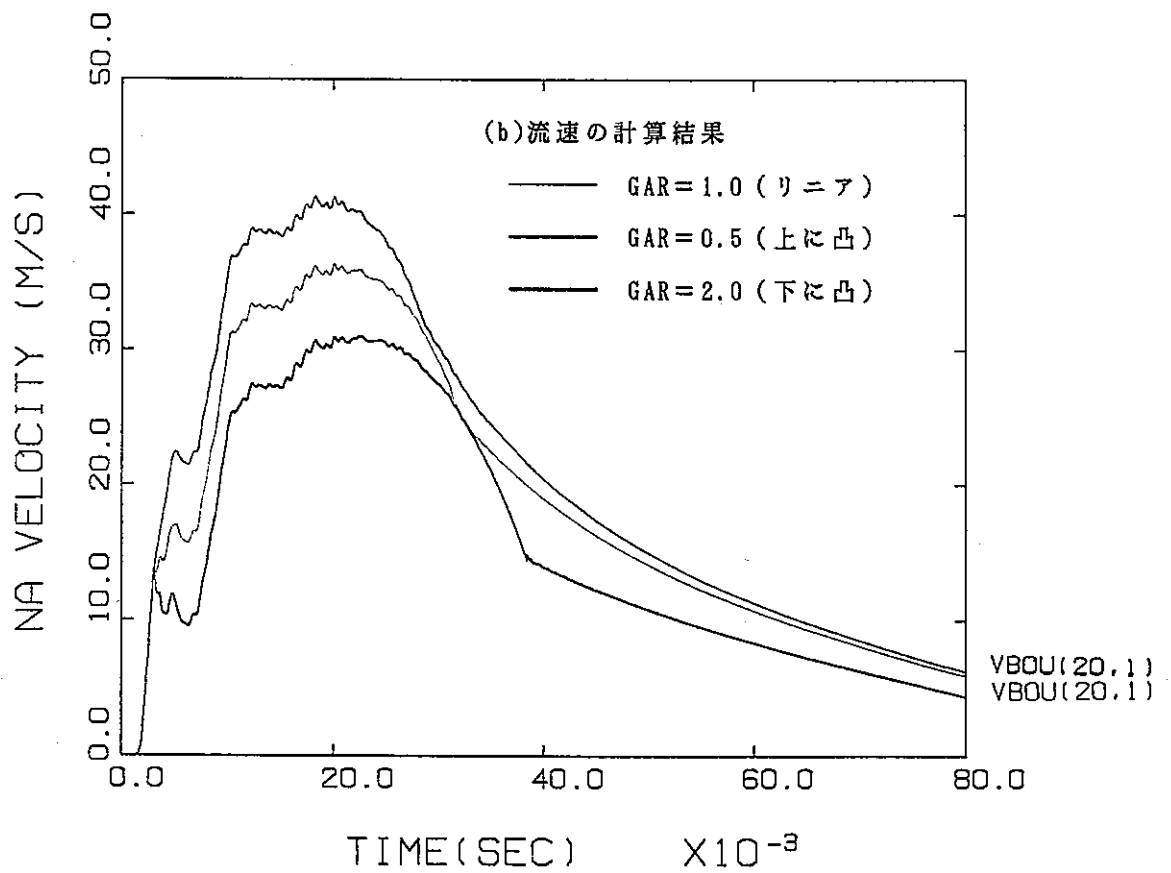
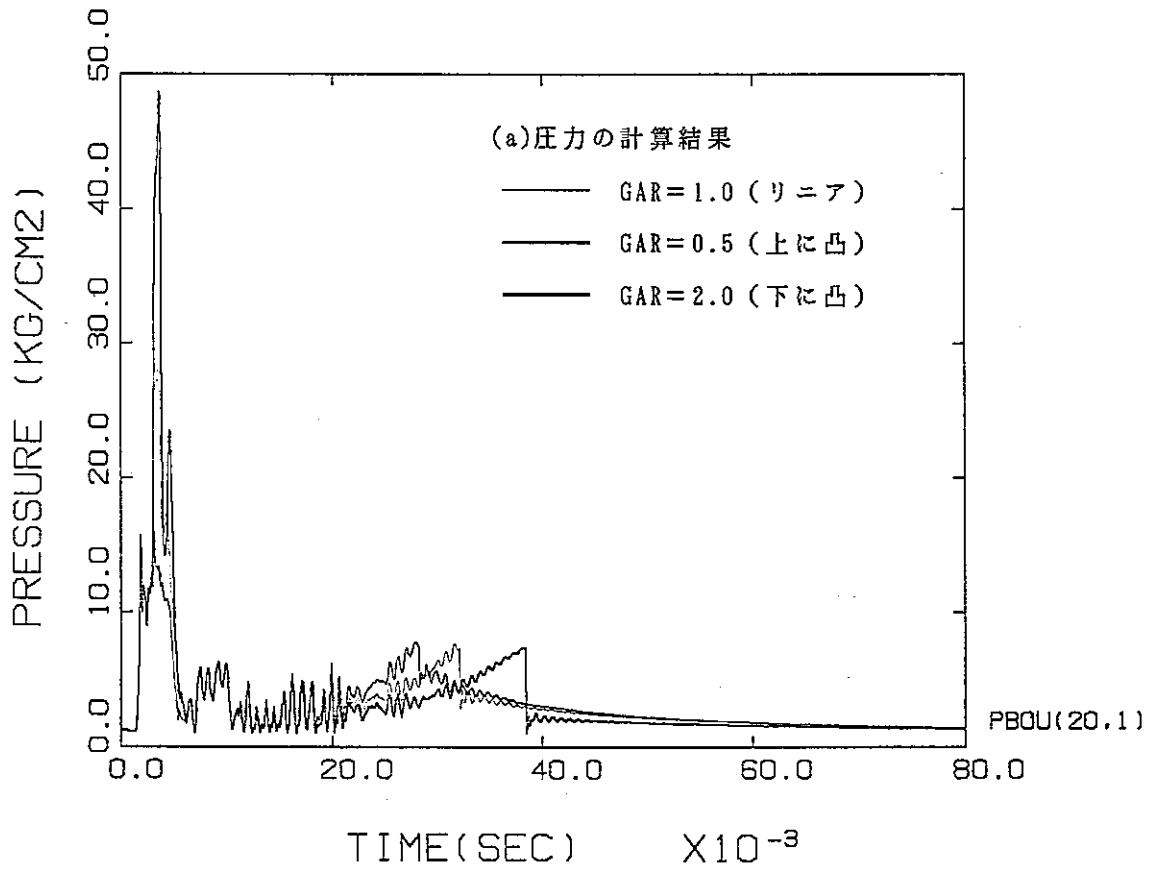


図3.11 感度解析結果 (GARの比較: No.7,11,12)

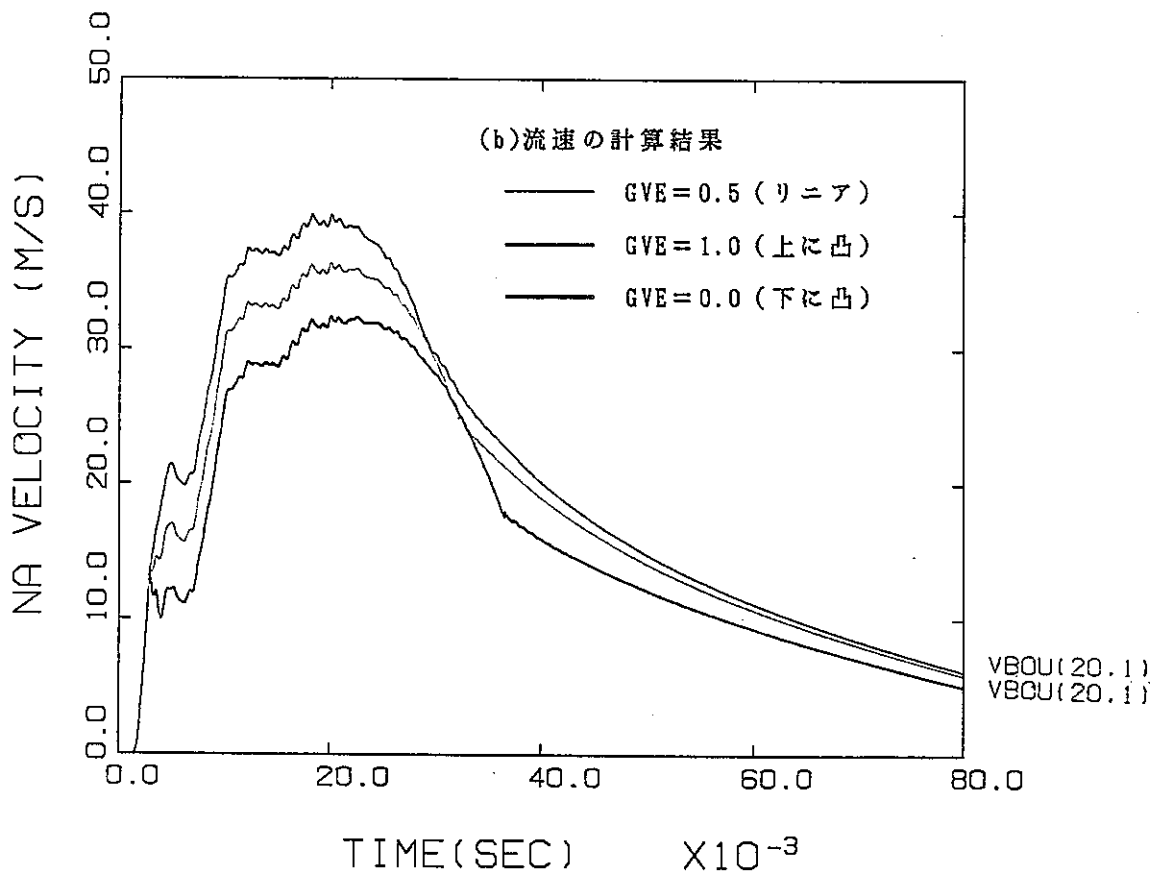
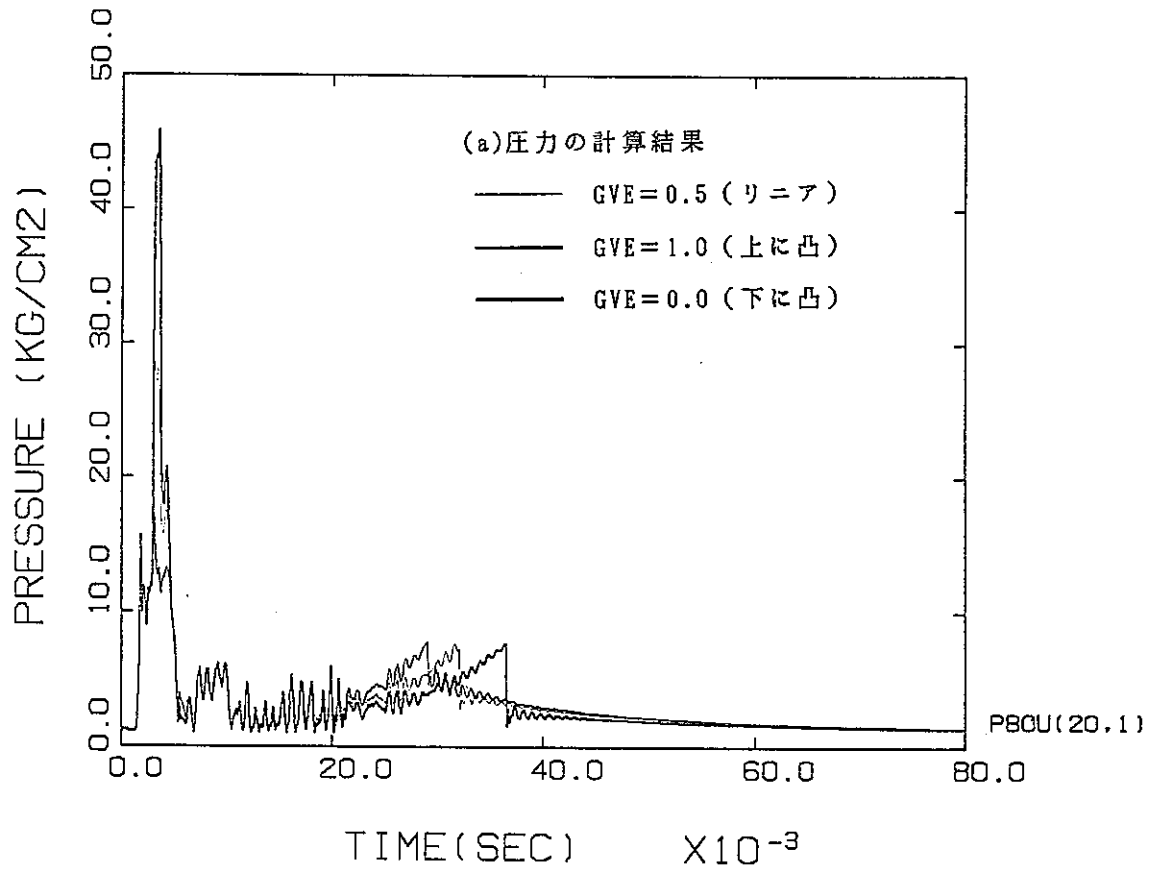
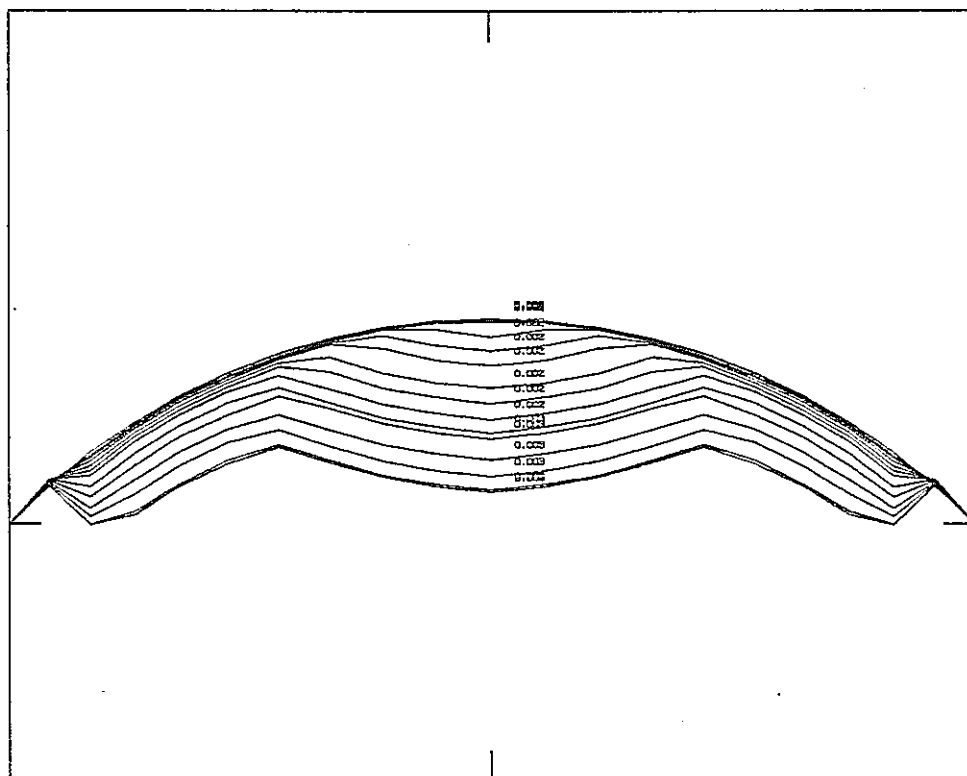
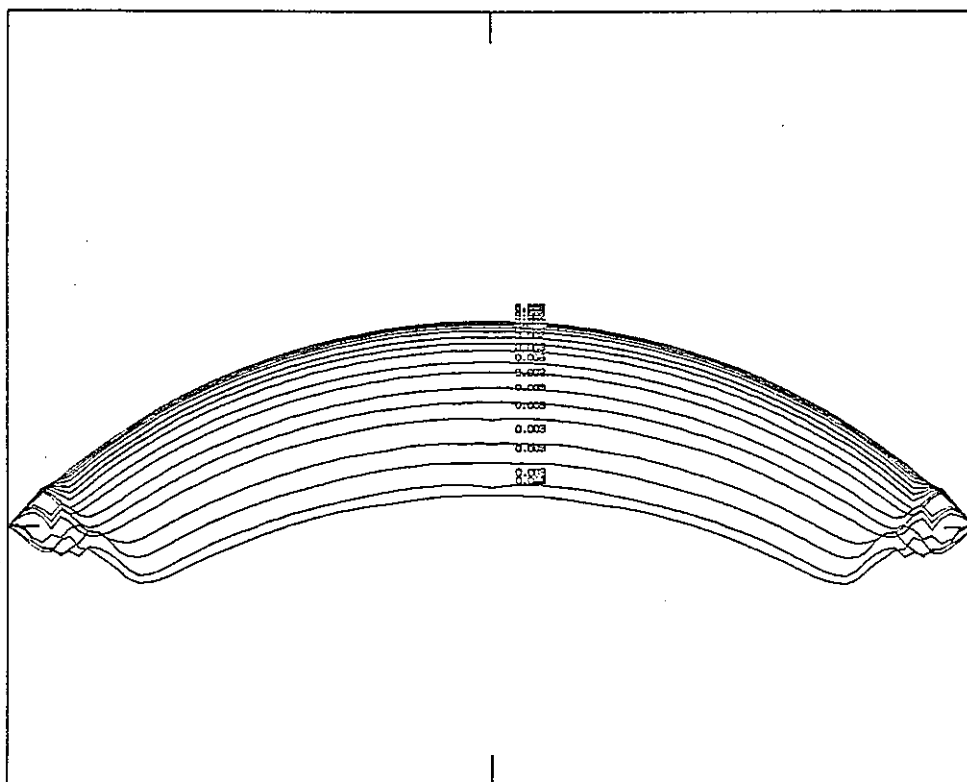


図3.12 感度解析結果 (GVEの比較: No.7,13,14)

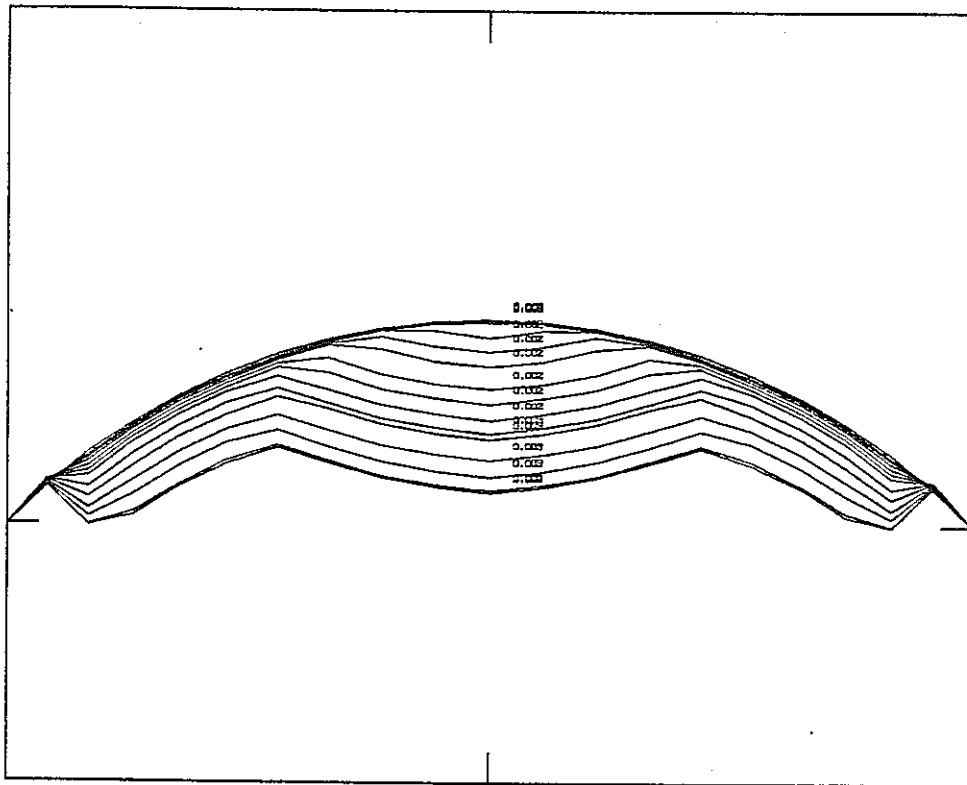


(a) 10分割 (No. 4)

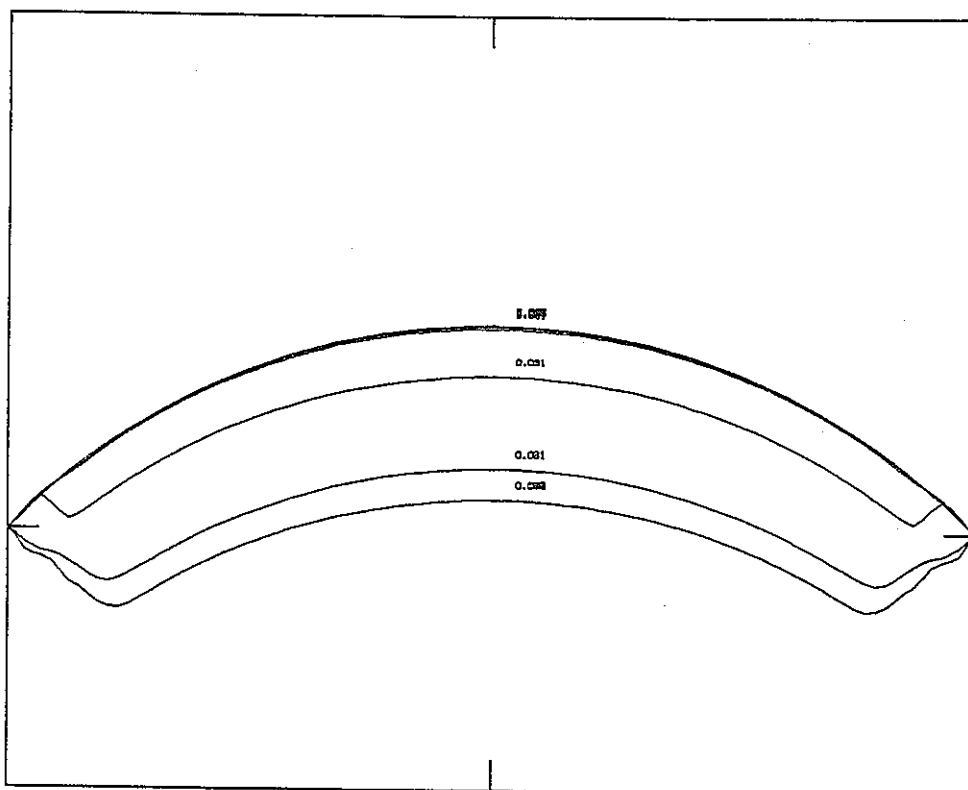


(b) 45分割 (No. 5)

図3.13 感度解析結果 (1枚目ディスクの変位出力: No.4,5)



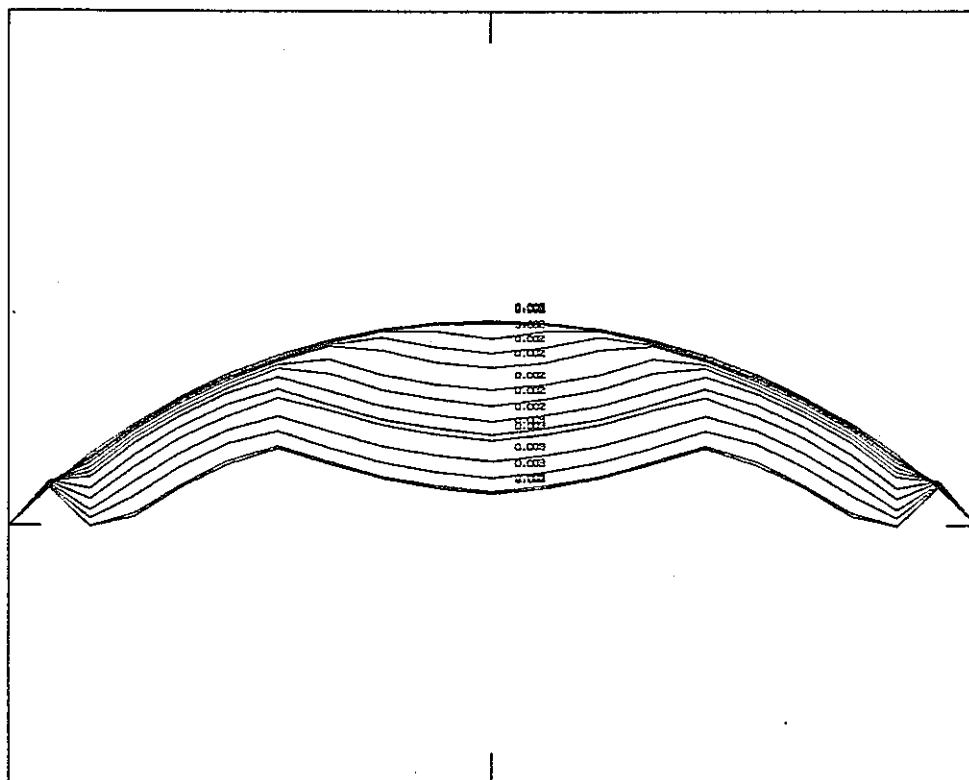
(a) 1 枚目ディスク (10 分割)



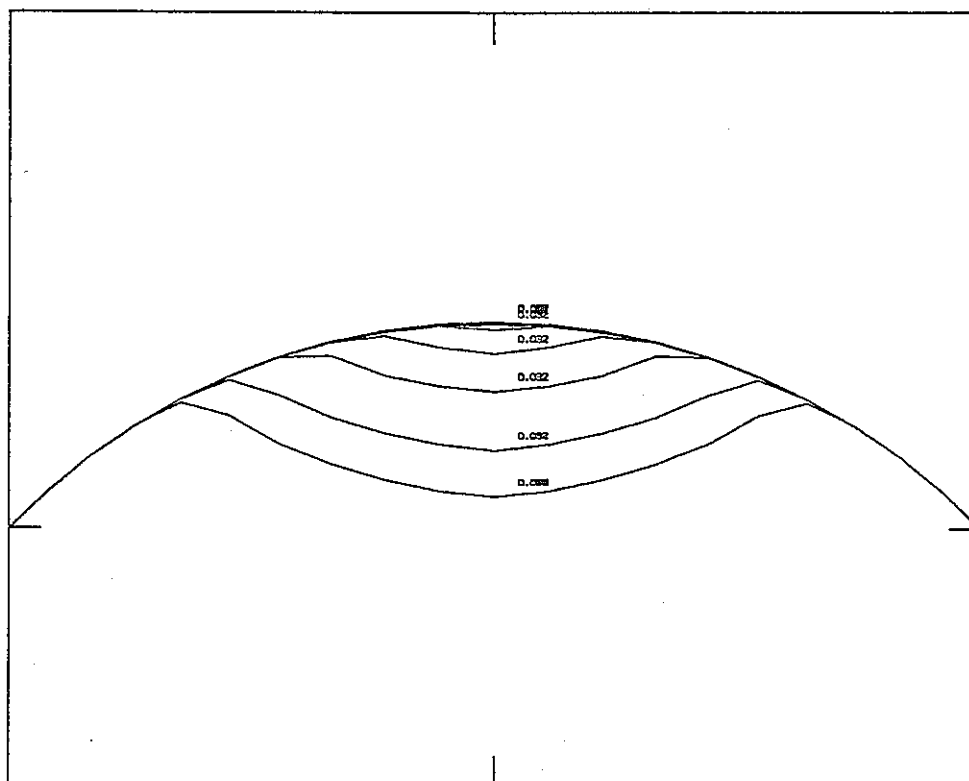
(b) 2 枚目ディスク (45 分割)

図 3.14 感度解析結果 (1,2 枚目ディスクの変位出力: No.6)





(a) 1 枚目ディスク (10 分割)



(b) 2 枚目ディスク (10 分割)

図3.15 感度解析結果 (1,2枚目ディスクの変位出力: No.7)

## 4. 試験解析

PEPT試験 (Pressure Effluence System Performance Tests) では、100万kWe級FBR大型炉の設計例の一つを対象として2次主冷却系の1/5縮尺試験装置(水ループ)を製作し、無液面型SG内で発生するナトリウム-水反応時の初期スパイク圧を水中で発破する低爆速火薬で模擬し、そのときのSG及び主冷却系内を伝播する圧力波を調べた。

PEPT試験のシリーズIIでは、無液面型SGで採用予定の接液型RD(シングル及びダブル型)をSGあるいは主冷却系配管に取り付けた場合について試験を行い、そのときの圧力開放特性及び圧力波伝播特性に関するデータを取得し、改良モジュールSWAC57Rの検証用データとした。

### 4.1 装置概要

試験装置は、100万kWe級大型炉設計例の2次主冷却系を模擬したものであり、1/5のスケールで製作した。試験装置の鳥瞰図を図4.1に示す。

試験装置は蒸気発生器(SG)、中間熱交換器(IHX)、主循環ポンプのナトリウム液面に相当する膨張タンク、およびそれらを連結する冷却系配管からなる大型炉の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等で構成されている。試験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 $40\text{kg/cm}^2\text{g}$ (持続時間; 20msec)に対応して、室温で静圧 $40\text{kg/cm}^2\text{g}$ に耐え得る構造となっている。SGには反応点の位置を変えられるように、軸方向に3つのフランジ型火薬搬入口(ハッチ)を設けている。また、SGの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ている。IHXは設計例の2次流路断面積を縮尺模擬した。各機器の主要仕様を表4.1に示す。

### 4.2 試験概要

PEPT試験シリーズIでは、大型炉のループ体系でSG内の液面の有無、発生圧力波形、圧力開放系取付位置等を主なパラメータとし、合計約30ケースの試験を行い、主にループ内を伝播する圧力波特性に着目したデータを取得した。

PEPT試験シリーズIIでは、シリーズIで用いた大型炉のループ体系でRDの設

置位置を変化させたケースの他に、シリーズ I で問題となった構造上のキャビティ発生要因をなくすため模擬 S G を試験ループから切り離して単体とし、その S G 胴に直接 R D を設置したケースでの試験も実施した。

シリーズ II 試験での圧力波源は、S G 本体の中央部で S G 下端より約 2.1m の高さとし、S G 胴で  $20 \sim 30 \text{ kg/cm}^2 \text{ g} \times 20 \text{ msec}$  となる圧力波を低爆速火薬により発生させた。S G 内及び配管内を伝播する圧力波は、図 4.1 に示す圧力センサ位置で計測した。

試験に使用した R D は、主に 3 インチ径の反転ナイフ型で、材質はインコネル 600、破裂設定圧は全て  $5 \text{ kg/cm}^2$  である。ディスクの仕様を表 4.2 に示す。ダブル型 R D の場合、ディスク間距離は最小の 65mm と最大の 1251mm の 2 種類を選んだ。また、ディスク間の放出水流動を観察するため、ディスク間の配管にアクリルを使用して流れの様子を高速度カメラで撮影したケースも実施した。

シリーズ II では、表 4.3 に示すように合計 10 ケースの試験を実施したが、その中の SG52, SG54~56, N058~N061 の 8 ケースを SWAC57R の検証に使用した。

#### 4.3 計算モデル

##### 4.3.1 計算体系

試験解析では、R D のタイプ（シングル型あるいはディスク間距離を変化させたダブル型）を除けば、その設置位置や試験ループ体系の違いにより大きく以下の 3 種類に試験体系を分類できる。その各々について以下で説明する。

##### (1) ケース 1

無液面型 S G をループから切り離して単体とし、その胴に接液型 R D を設置したシンプルなケースであり、SG52~SG57 の試験ケースがこれに相当する。

解析用ネットワークモデルは前述の図 3.1(b) と同様で、22 個の接合点と 21 個の部材から構成される。接合点 1, 14, 16, 18 は盲端（流速一定境界）、接合点 21 は接液型 R D 境界、接合点 8 (P2) は圧力発生点（圧力既知境界）である。ここでは圧力放出系を B T M で計算するため、接合点 21 の R D 境界の下流に長さ 1.8m の放出系配管に相当する部材 21 とダンプタンク境界に相当する接合点 22 を付加した。なお、図中の P1~P5, P19, P33 は、試験時の圧力波測定点を示しており、コード検証を行う位置は、ディスクの上流側 7 cm の位置にある測定点 P33 の圧力波とした。

## (2) ケース 2

無液面型 S G のループ体系を模擬し、その S G 胴に接液型 R D を設置したケースであり、N058～N060の試験ケースに対応する。

図 4.2 に示すように、解析用ネットワークモデルは 40 個の接合点と部材で構成される。接合点 9, 15, 17, 28 が盲端、接合点 23 が自由液面境界、接合点 39 が接液型 R D 境界、接合点 6 (P2) が圧力発生点である。またケース 1 の場合と同様に、B T M 計算のため放出系配管に相当する部材 40 とダンプタンク境界に相当する接合点 40 を付加し、コード検証の位置はディスクの上流側 7 cm の位置にある測定点 P33 と I H X に相当する測定点 P10 の圧力波とした。

## (3) ケース 3

無液面型 S G のループ体系を模擬し、そのコールドレグ配管に接液型 R D を設置したケースであり、N061 の試験ケースに対応する。

図 4.3 に示すように、解析用ネットワークモデルは 40 個の接合点と部材で構成される。接合点 9, 15, 17, 28, 37 が盲端、接合点 23 が自由液面境界、接合点 39 が接液型 R D 境界、接合点 6 (P2) が圧力発生点である。ここでも、ケース 1 の場合と同様に、放出系配管に相当する部材 40 とダンプタンク境界に相当する接合点 40 を付加し、コード検証の位置はディスクの上流側 7 cm の位置にある測定点 P17 と I H X に相当する測定点 P10 の圧力波とした。

## 4.3.2 発生圧力波形

シリーズ II の予備試験として実施した火薬特性試験では、S G 本体の中央部、S G 下端より約 2.1 m の高さを圧力波源として、 $20 \sim 30 \text{ kg/cm}^2 \text{ g} \times 20 \text{ msec}$  の圧力波を低爆速火薬により発生させる試験数ケースを実施した。そして、ダブル型の R D を破裂させるのに十分な圧力波として  $30 \text{ kg/cm}^2 \text{ g} \times 20 \text{ msec}$  以上の目標値を選定し、これを圧力源として表 4.3 に示した本試験を行った。

試験解析では、各試験で得られた発生圧力波形を各々のケースについて反応部 P2 における入力値とした。なお、シリーズ II の試験では、圧力波源に全ケースとも同一仕様の火薬を用いているため、圧力源での発生圧力波形には各試験で十分満足のいく再現性が得られている。

#### 4.4 検証結果

##### 4.4.1 試験結果の検討

PEPT試験で得られたRD手前での圧力波形の主な結果を図4.4(a)～(h)に示す。同図(a)～(c), (g)がSG単体での結果で、同図(d)～(f), (h)がループ体系での結果である。

SG胴に直接型RDを設置したケースでの圧力波形(図(a)～(e))には、波高値が $20\text{kg/cm}^2\text{g}$ を超す鋭い立ち上がりの高周波のピーク(これ以降"ひげ"と呼ぶ)が所々に見られる。この"ひげ"は、報告書<sup>[6]</sup>でも説明しているようにRDをSG胴に直接設置したことに起因する構造上の現象であると考えられる。つまり、圧力源から発生した鋭い立ち上がりを持つ高周波の圧力波は、SG内を3次元的に伝播し、圧力源に近い位置にあるSGとRDを連結するノズル(配管)部へと至る。この配管入口はSGに比べ断面積が十分に小さく、また、ディスクまでの配管はレデューサにより次第に断面積が縮小しているため、そこで波高値は次第に高くなる。また、ディスクに達した圧力波は十分に高周波であるため、圧力波はそこで剛体反射されて波高値が更に増加する。これらの面積縮小と剛体反射の効果により、RD部での圧力波形に鋭い"ひげ"が生じたものである。ループ体系でSGから離れた位置のコールドレグ配管にRDを設置した場合(図(f))にはほとんど"ひげ"が見られないことから、この説明の妥当性が推定できる。

SWACSの初期スパイク圧/圧力波伝播計算では、圧力波の3次元的な取扱い、レデューサ的な断面積変化部の取扱いを考慮しておらず、また、この"ひげ"自体も半値幅がほとんど無視できるようなエネルギー的に十分小さい圧力波であるため、現象的にも問題となるものでないと考える。よって、この"ひげ"をSWACS検証の対象とするのは不適切と判断し、以下の検証ではこの"ひげ"を除外して検討する。

##### 4.4.2 圧力波形の特徴

図4.4(a)～(h)までの圧力波形で"ひげ"の部分を除くと、一般的に次のような特徴が見られる。

発破後、SG内からノズル部を経由しRD部に伝播した圧力波は、ディスクでの剛体反射により初期数msec(本試験では約2msec近辺)後で急激に立ち上がり、最初の鋭いピークとなる。直接RDをSGに設置した体系では、このピークは前節で説明した"ひげ"として現われる。そのピークを過ぎた直後に圧力波は一旦減衰し、 $10\sim 20\text{kg/cm}^2\text{g}$ 程度の波高値になる。それから再び圧力は上昇して第二のピークとなり、その後は幾らかの圧力振動を繰り返しながら次第に減衰していく。

この最初の立ち上がりから減衰のピークに達するまで約4 msecの時間間隔となる。第3章での検証解析からも推定されるように、最初のピークが減衰してから第二のピークとなるまでの圧力波形が、ディスクと流体の相互作用（ディスクの変形）が生じている期間に相当する波形と考える。

#### 4.4.3 主要パラメータ

第3章の検証解析からは、ダブル型RDの5つのパラメータ： $R_1$ （=AINL）， $R_2$ （=AFIN）， $t_2 - t_1$ （=TOPN），GAR，GVEの値に依存してディスク破裂後の圧力波形が変化することが示された。そこで、PEPTの試験結果を考慮し、試験解析での解析パラメータを以下で検討する。

##### (1) $R_1$ （=AINL）

PEPT試験時の高速度カメラ撮影によると、RDへ伝播した圧力波によりディスクは変形を開始し、その表面に時間とともに多数の“しわ”が見られるようになる。そしてディスクがナイフの先端に達した直後に、ディスクは中心部近辺から破裂を開始し、開口度が時間とともに拡大していく。観察結果ではディスクがナイフに達した直後でディスクが破裂していないため、試験解析での初期開口度としては“ゼロ”を与えるのが妥当と考える。よって、初期開口度AINLは“0”とする。

##### (2) $R_2$ （=AFIN）

RDを試験終了後に観察すると、十字型に組んだナイフの形状に従いディスクはほぼ4等分に破裂し、ディスクの破片は水の流れる方向に沿って屈曲し、ほぼ完全に開口していることが示される。全試験ケースとも同様な結果が得られていることから、試験解析での最終開口度としては100%開口を与えるのが妥当と考える。よって、最終開口度AFINは、“1”とする。

##### (3) $t_2 - t_1$ （=TOPN）

検証解析から、TOPNの値に依存してディスク破裂後の圧力波ピークの幅が変化することが示された。シリーズIの高速度カメラ撮影観察では、接液型RDの破裂開始からほぼ100%開口に至るまでの時間として4～5 msec程度を要し、また、今回の試験結果の圧力波形では、最初の立ち上がりから減衰のピークに達するまでに約4 msec程度の時間を要していることから、試験解析

での初期開口度から最終開口度までの時間間隔TOPNに4 msecを与える。

#### (4) GAR

開口度の過渡的な変化を表わすパラメータGARに、試験データから判断して根拠のある値を与えるのは現時点では難しいと考える。従って、開口度が時間とともにリニアに変化すると考えた暫定値の"1"をGARに与える。

#### (5) GVE

ディスクが破裂してない部分の過渡的な変形速度の変化を表わすパラメータGVEについても、上記のGARと同様に、試験データから判断して根拠のある値を与えるのは現時点では難しい。よって、初期から最終の変形速度までの変化が時間とともにリニアであると考えた暫定値の"0.5"を与える。

#### 4.4.4 予備計算

前節で選定したパラメータ値を入力して予備計算を実施した。GAR, GVEの値には暫定値を用いているが、この入力値で試験との比較を行い、より最適なフィッティングカーブとなるパラメータを推定する。

検証すべき試験データとしては、前述した高周波の"ひげ"が少ないケースの、N061(ループ体系でコールドレグ配管にダブル型のRDを設置したケース)を選んだ。予備計算では、最適値のGARを選定するためGARを1.0~0.6に変化した場合について計算を実施した。

計算結果を比較して図4.5に示す。第3章の検証解析から示されるように、2枚目ディスク破裂以降の圧力波形に主要パラメータの値はほとんど影響しないため、ここではRDの手前の位置で主に1枚目ディスクの破裂に伴う圧力波形に着目して比較した。同図(a)のピークがGAR=1.0, GVE=0.5とした代表ケース、同図(b)がGAR=0.8としたケース、同図(c)がGARを小さく0.6にしたケースで、各々のケースについて細線が試験結果、太線が計算結果を示している。

計算で得られた圧力波形で、最初に立ち上がる鋭いピークが波源から伝播した圧力波がディスク部で反射して生じるピークに相当し、その後の小さな減衰、振動がディスクの変形と流体との相互作用に伴う波形に相当し、その後の急峻な立ち上がりが1枚目ディスクの破裂に伴うピークに相当する。そのピークの急激な減衰は、ディスクが破裂し完全開口に至った所に相当する。圧力波はその後再度立ち上がり、ピーク値約 $10\text{kg/cm}^2$ 程度で急激な減衰が生じるが、このピークが2

枚目ディスクの破裂に伴うピークである。

圧力波の発生から2枚目ディスクが破裂する直前までは、全体的な圧力波形の試験と計算との一致は良い。ただ、図4.5(a)の代表ケースの場合には、1枚目ディスク破裂時の圧力波のピークが試験結果を過大に評価している。同図(b), (c)とGARを変化させると次第に圧力波のピーク値が変化し低くなり、同図(c)の場合には過小評価するようになる。ベストフィティングカーブとなるパラメータ値としてここでは保守側の評価で、かつ比較的的良好なフィッティングが得られていると考えられるGAR(=0.8)を選択し、これ以降の試験解析を実施した。

#### 4.4.5 検証結果の検討

前節で検討したパラメータ値を用いて、PEPT試験の試験解析を実施した。そのRDの破裂時刻についての結果をまとめて表4.4に、圧力波形についての結果を図4.6~4.13に比較して示す。図中の細線が試験結果を、太線が解析結果を表わす。試験結果についてはAPPENDIX-Dで説明するように、試験で得られた時間と圧力のデジタルデータをフロッピーディスクから大型計算機に変換したため、試験データの間引き間隔の程度により、4.4.1節で記述した"ひげ"が必ずしも正確に示されていないが、ここではこの"ひげ"自体は検証の対象としていないため、特に問題となるものでない。

##### 4.4.5-1 ディスクの破裂時刻の比較

1枚目、2枚目のRDの破裂時刻を比較して表4.4に示した。計算結果の破裂時刻は、ディスクが変形してその最大変位がナイフの先端に達した時の時刻を表わしている。試験結果の破裂時刻は、ディスクの直前(上流約8mm)あるいは直後(下流約40mm)に設置したフォイルが破裂した時のシグナル時刻をグラフから読みとって示した。

SG55とSG56のシングル型RDでは、ディスクの直前と直後の2つのシグナル時刻を比較しているが、両者には1~2 msec程度の違いが見られる。これは、ディスクの破裂~開口挙動に関係して生じる違いと考える。ディスク直後でのシグナル時刻は、ディスクの破裂から、ある程度までの開口、水の噴出に至るまでの時間も含まれているために、遅延したものである。よって計算結果との整合性を考える上では、ディスク直前のシグナル時刻を比較した方が適切と考える。実際の試験では、構造上RDの直後にしかフォイルを設置できない場合もあるが、その場合にはディスク直後のシグナル時刻を試験で得ている。



表からも分かるように、RDの破裂時刻の全体的な傾向として、試験と解析で十分満足のいく一致が得られたと考える。特に、ディスク直前のシグナル時刻との比較の方がより一致は良く、ディスク直後のシグナル時刻は何れも計算結果より遅れている。この遅れの傾向は、2枚目ディスクの破裂時刻でディスク間の距離が長いケース（SG52, N060）が顕著であるが、これは、ディスク間のガスボリュームが、他のケースに比べ大きいことによる影響と考える。ディスクの直前に設置したフォイルの破裂シグナルの一致がよいということは、ディスクの変形挙動の解析が試験をうまく模擬していることを示しているためと考える。

#### 4.4.5-2 圧力波形の比較

以下では、SG52, 54~56, N058~61の8ケースの圧力波形について、それぞれ検討する。

##### (1) SG55の試験ケース

シングル型のRDをSG胴に設置したケースである。RDの手前（P<sub>33</sub>）での圧力波形を図4.6に示す。

圧力波形の最初のピークは、試験と計算とではほぼ同時刻に立ち上がるが、試験では“ひげ”の存在により、そのピーク値が計算値を数倍上回る。シングル型のRD解析では、破裂条件に達したディスクは瞬時に完全開口するため、破裂後の圧力の立ち上がりは小さく、試験結果を過小評価している。しかしながら、ディスク破裂後の10msec付近では試験と解析との圧力波の一致がよくなり、解析が試験結果を幾分過大評価するようになる。

##### (2) SG56の試験ケース

シングル型のRDをSGから離して設置したケースである。図4.7は、RDの手前（P<sub>33</sub>）での圧力波形を示す。

試験結果からは、ピーク値の大きい2つの“ひげ”を除けば大きなエネルギーを持つ圧力波（波高値と半値幅の大きい波）は見られない。また、試験および計算とも、SG56での結果に比べ全体的に圧力波は小さくなっている。

試験と解析の比較では、最初のピークの立ち上がりは試験が僅かに遅れ、その最大ピーク値は数倍程度大きいこと、また最初の立ち上がりからその減衰までの持続時間（半値幅）は試験の方が短いことがわかる。“ひげ”を除いた比較では、計算結果が試験結果と同程度か幾分大きい程度のピーク値及び

半値幅を与えることがわかる。

### (3) SG54の試験ケース

ダブル型のRDをSG胴に設置したケースである。図4.8(a)はRDの手前 ( $P_{33}$ ) での圧力波形を、同図(b)はディスク間 ( $P_{34}$ ) の圧力波形を示す。

図4.8(a)の試験結果にはやはり2つの鋭い“ひげ”が見られるが、“ひげ”を除けば、全体的に試験と計算の波形では満足のいく一致が得られており、特に、1枚目ディスクの破裂に伴う圧力波形では、計算値が幾分保守的となるような一致が得られている。2枚目ディスクが破裂するときの時刻は、試験と計算でそれぞれ6.2, 5.96msecとなり一致はよいが、破裂直後に見られる波形では計算が試験を過小評価するようになる。これは、解析で2枚目ディスクが破裂すると瞬時に完全開口するものとモデル化していることに起因した違いと考える。実際は、2枚目ディスクの破裂挙動も瞬時の完全開口ではなく、ある過渡的变化の後に最終的な開口度（必ずしも完全開口とは限らない）に至っているものと考えられる。

試験でのRDの破裂挙動は3次元的な放出水とディスクの相互作用を考慮する必要性を示しているが、この現象はRDの仕様にも依存すること（破裂設定圧の高いRDを用いたLLTRの試験検証<sup>[6]</sup>では圧力波形の良好な一致が得られていることから、2枚目RDはガス圧で破裂しているものと推定する）、また2枚目RD破裂時の最大ピークは1枚目RDの最大ピークを過ぎた所でありさほどIHXに寄与しないと考えられること、2枚目RD破裂時の波形は1枚目ディスク破裂時の波形に比べさほど大きなエネルギーを持つピークを生じていないことから、試験と解析の相違は圧力波を評価する上でさほど大きな問題とならないと考える。

図4.8(b)には、ディスク間のガス圧の変化を示しているが、計算で見られるような鋭い圧力のピークが試験ではほとんど見られていない。これは、報告書<sup>[6]</sup>でも述べているように、1枚目ディスクの破裂時に放出した水の飛沫先端が2枚目ディスクに到達し、ディスク間のガス圧が上昇する以前にディスク面を早期に変形及び破裂に至らしめた結果であると考えられる。

### (4) SG52の試験ケース

ダブル型のRDをSGに設置し、ディスク間のガスボリュームを大きくしたケースである。図4.9(a), (b)にRDの手前 ( $P_{33}$ ) , ディスク間 ( $P_{34}$ )

の圧力波形をそれぞれ示す。

ここでも、全体的な圧力波形の特徴や試験と計算との相違点は、2枚目ディスク破裂時の圧力波形を除き、先のSG54のケースとほぼ同じ傾向であることがわかる。このケースでは、ディスク間のガスボリュームが大きい分だけSG54に比べ2枚目ディスクの破裂時刻も遅れているが、破裂時の計算ピーク値は約 $10\text{kg/cm}^2\text{g}$ で両者とも大きな違いはない。試験と計算での圧力波形の違いは、飛沫水による破裂とガス圧による破裂とのモデルの違いに依存して大きく異なり、計算での圧力波形が試験に比べ保守的評価となっている。

#### (5) N058の試験ケース

大型炉ループ体系を模擬し、ダブル型のRDをSGに設置したケースである。図4.10(a), (b), (c)にそれぞれRD手前 ( $P_{33}$ )、ディスク間 ( $P_{34}$ )、IHX ( $P_{10}$ )での圧力波形を示す。

図4.10(a), (b)からは、試験での“ひげ”や圧力波の振動が少ない点を除けば、全体的な圧力波形の特徴や試験と解析との違いは、SG54のケースと同様である。

実機プラントでの構造健全性を評価する上で重要となる同図(c)のIHX部の比較では、試験での圧力波の立ち上がり時間が2～3 msec程度遅れる点を除けば、全体的な波形及び最大ピーク圧の一致はよく、特に計算結果の最大ピーク値は約10%程度の保守的評価となっている。

#### (6) N059の試験ケース

ループ体系でダブル型のRDをSGに設置したケースである。このケースは、RD型式として反転スコア型を使用している点を除けば、N058のケースと同じである。厳密には計算コードで反転スコア型を扱えないが、模擬的に反転スコアの物性データ、形状データを入力し、またディスク破裂条件の最大変位にN058と同じ値を入力して計算を実施した。図4.11(a), (b), (c)に、それぞれRDの手前 ( $P_{33}$ )、ディスク間 ( $P_{34}$ )、IHX ( $P_{10}$ )での圧力波形を示す。

図4.11(a), (b)からはN058のケースに比べ全体的に波高値は試験と計算ともに高くなる。1枚目、2枚目ディスクの破裂時刻は、それぞれ試験が2.9, 6.7、解析が2.89, 6.75と一致がよく、また圧力波形についても、特に1枚目ディスクの破裂に伴う波形の一致は良い。

同図(c)のIHX部については、やはり圧力の立ち上がり時間は遅れるものの、最大ピーク値の一致はよく、約3%の誤差に過ぎない。

#### (7) N060の試験ケース

ダブル型のRDをSGに設置し、N058に比べディスク間のガスボリュームを大きくしたケースである。図4.12(a), (b), (c)にRDの手前( $P_{33}$ ), ディスク間( $P_{34}$ ), IHX( $P_{10}$ )での圧力波形をそれぞれ示す。

図4.12(a)からは、N058に比べやや高周波ピークの“ひげ”が多くなっている。この原因は不明でありここで議論するのも適切ではないため割愛するが、全体的な波形としては、SG単体に設置したガスボリュームの大きいダブル型RDのケース(SG52)と試験及び計算ともに類似している。高周波の“ひげ”を除けば、計算は試験結果を包絡するようになり、特に1枚目ディスクの破裂に伴うピークの一貫性は良いと考える。同図(b), (c)の結果についてもSG52のケースと同様である。

#### (8) N061の試験ケース

ループ体系でダブル型のRDをコールドレグ配管に設置したケースである。図4.13(a), (a), (b)にそれぞれRDの手前( $P_{17}$ ), ディスク間( $P_{37}$ ), IHX( $P_{10}$ )での圧力波形を示す。

RDがSGから離れた配管部に設置されているため、高周波の“ひげ”が図4.13(a)にはほとんどみられない。計算結果との比較では、特に1枚目ディスクの破裂時のピークはよく一致している。ディスクの破裂時刻も1枚目が試験と解析で3.6と3.56msec、2枚目が6.7と6.83と十分一致は良い。2枚目ディスク破裂時の圧力波形の違いや同図(b)の試験と計算の違いは、(3)項で記述したのでここでは省略する。

同図(c)の波形の比較でも、立ち上がりの時間を除けば、試験と計算とで十分満足のいく一致が得られたと考える。

## 4.4.5-3 ディスクの変形挙動

3.3(3), (5)節でも述べたように、同じ計算条件でもディスクの分割数を粗く(10分割)した場合と細かく(45分割)した場合でディスクの変形モードが異なり、前者はディスクの中心部から、後者はディスクの周囲から変形を開始する。

PEPT試験の高速カメラ撮影から得られたディスクの変形モードとして、ディスクは周囲から変形を開始し破裂に至っている様子が観察されている<sup>[3, 4]</sup>ことを考慮すると、分割数の大きい場合の計算の方が実際の変形挙動を忠実に模擬しているものと考えられる。

## 4.4.5-4 配管内の放出水流速

RD(シングル型の場合は1枚目ディスク、ダブル型の場合は2枚目ディスク)の破裂後、放出系配管に流入した水は配管内を移動し、その飛沫先端(気液界面)は配管の出口へと至る。放出系配管の長さ、計算結果で得られた水の流入/流出時刻から求めた放出系配管内の平均流速を表4.5(a)に示す。各試験での放出系に依存して流速にばらつきが見られるが、概ね20~40 m/sとなる。

配管内の放出水の流速は、PEPT試験でも一部測定<sup>[5]</sup>されている。例えば、SG55のケースでは、シングル型のディスクの前後とディスクの約1.2m後流の位置に設置したフォイルの破断時刻から放出流速を求め、ディスク破裂後の初期流速として約125m/sを、またディスク後流の流速として約35m/sを得ている。SG57のケースでは、ディスク間距離が約1.2mと長いダブル型RDでディスク間のアクリル配管内流動の高速撮影を行い、その結果から1.2m間の平均流速として約50m/sを得ている。試験で得た配管内の平均流速を表4.5(b)に示す。

試験で得られた配管内の平均流速をRD下流の放出系配管に外挿して得られる値と表4.5(a)の計算結果を比較して図4.14に示す。図の横軸は配管接続点(3分岐点)からの位置で、縦軸はそこでの流速を示す。図中の丸(○, ●)はSG単体の場合で、三角(△)はループ体系の場合を表わす。黒塗り(●)は試験結果で白抜き(○, △)は計算結果を示す。同図からは、SG単体での放出水流速はSGからの距離に依存して変化すること、計算の流速は試験の外挿線(破線)上に乗って良好な一致を示していることが分かる。なお、ループ体系の計算点はどれもこの外挿線から離れ、配管接続点からの距離に依存しないような傾向を示しており、全て27.6~32.2m/sの範囲内にあることがわかる。しかしながら、試験と計算でオーダー的に大きな違いはみられない。

## 4.5 まとめ

試験で用いた接液型RDの物性及び形状データを用い、ダブル型のRDの5つのパラメータ： $R_1$  (=AINL)， $R_2$  (=AFIN)， $t_1 - t_2$  (=TOPN)，GAR, GVEにPEPTの試験結果を反映して選定した値を用い、試験解析を実施した。それを試験結果と比較・検討することで、以下が明らかになった。

## (1) RDの破裂時刻

破裂検知用のフォイルをディスクの直前あるいは直後に設置した場合に依存して試験結果に多少の違いが見られるが、全体的に試験と解析の破裂時刻はよく一致している。特に、解析モデル上のディスク破裂条件に近いと考えられるディスク直前設置のフォイルの場合には、0.1msecのオーダーで破裂時刻が一致する。

## (2) RD部の圧力波形

## (i) シングル型のRD

RDの破裂後挙動を瞬時の完全開口とした解析モデルのため、ディスク破裂直後の圧力波の立ち上がりは小さく試験結果を過小評価する。ディスク破裂以降では、試験でRDをSGに胴付けした場合には見られる高周波ピークの“ひげ”を除けば、概ね波形の一致はよくなる。

## (ii) ダブル型のRD

試験の高周波ピークの“ひげ”を除けば、1枚目ディスク破裂時の圧力波に対しては、解析結果は試験結果を包絡するような圧力波形となり、全体的な波形は概ね一致してくる。

2枚目ディスクの破裂挙動については、1枚目ディスク破裂時の飛沫水が2枚目ディスクに作用して破裂する試験結果と、1枚目ディスクからの放出流体がディスク間ガスを断熱圧縮して破裂、完全開口する解析結果との違いに依存して、圧力波形に違いが生じる。しかしながら、試験と解析での波形の相違はIHX部への圧力波伝播を評価する上でさほど大きな問題とならないと考える。

(iii) ディスク間のガス圧力

ディスク間のガス圧力については、解析での鋭い圧力波のピークが試験結果には見られないが、これは、前述した2枚目ディスクの試験と解析との破裂挙動の違いに対応した結果である。

(3) I H X 部での圧力波形

I H X 部では、試験での圧力波の立ち上がり時間が2～3 msec程度遅れる点を除けば、全体的に圧力波形及び最大ピーク圧の試験と解析との一致はよく、特に解析の最大ピーク値は約10%以下の保守的評価となる。

(4) ディスクの変形挙動

試験では、ディスクは周囲から変形を開始し破裂に至る変形モードが高速カメラ撮影で観察され、一方計算では、ディスクの分割数が粗いと中心部から、細かいと周囲から変形を開始することから、ディスクの分割数の細かい方が実際の変形挙動を忠実に模擬できることが確認できた。

(5) 配管内の放出水流速

S G 単体での放出水流速はS G からの距離に依存して変化する。このとき計算での流速は、試験の外挿線上に位置しており良好な一致を示す。ループ体系の場合には、放出水流速は接続点からの距離に依存しないような傾向を示すが、試験と計算でオーダー的に大きな違いはみられない。

(6) 反転スコア型 R D への適応

反転スコア型 R D の物性／形状データ、及び同仕様である反転ナイフ型の最大変位を模擬的にコードに入力して計算を実施した結果、ディスクの破裂時刻及びディスク部での圧力波形とも計算は試験を保守的に精度よく評価しており、特に I H X 部では約3%程度の誤差で計算できた。

表 4.1 PEPT 試験装置の主要仕様 (1/2)

Items	Specifications
1. Steam Generator	
Design Pressure	40 kg/cm <sup>2</sup> .g
Design Temperature	50°C
Coolant	Water
Material	SB 42
Dimension	I/D 700×height 5150
2. Intermediate Heat Exchanger	
Design Pressure	40kg/cm <sup>2</sup> .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 <sup>2</sup> .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 <sup>2</sup> .g Outer Pressure 1 kg/cm <sup>2</sup> .g
Design Temperature	50°C
Coolant	Water
Material	SS 41
Dimension	I/D 700×height 2000

表 4.1 PEPT 試験装置の主要仕様 (2/2)

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 m <sup>3</sup> /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 ℓ/min
Vacuum Pressure	2.7×10 <sup>-2</sup> Pa
Rated Power	0.75 kW
Revolution	1200 rpm
Diameter	suction 1 B exhaust 1½ B



表 4.2 RD の主要仕様

Type	Reverse Buckling with Blades	Scored Reverse Buckling
Model	RB-90	S-90
Size	3 inch	3 inch
Disc Material	INCONEL 600	INCONEL 600
Burst Temp.	R. T.	R. T.
Burst Pressure	5.1 kg/cm <sup>2</sup> .g	5.1 kg/cm <sup>2</sup> .g

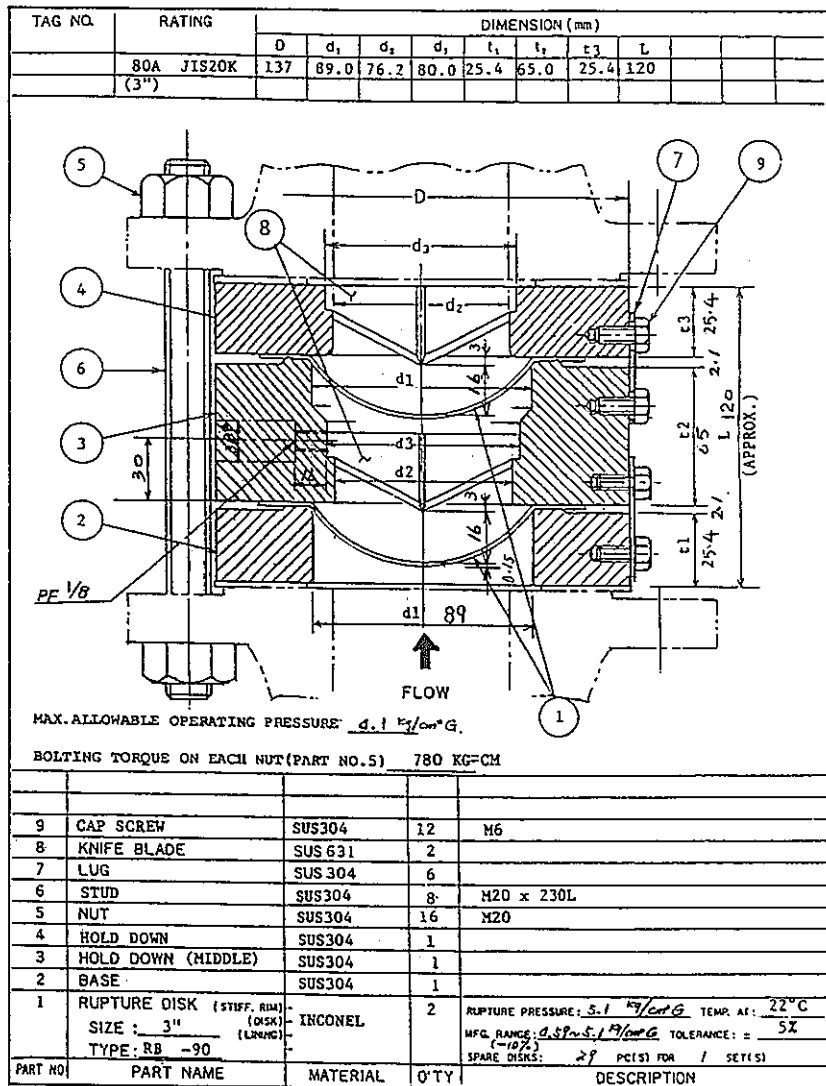


表 4.3 P E P T 試験での試験ケース

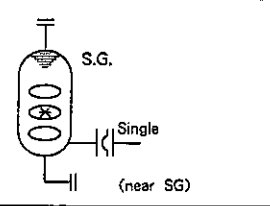
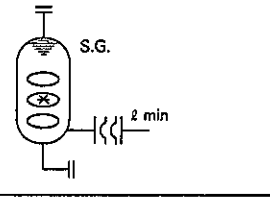
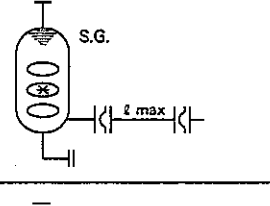
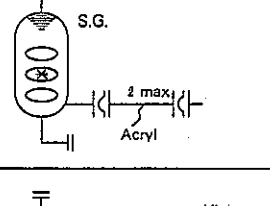
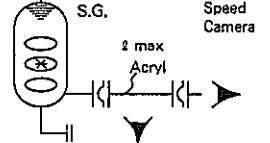
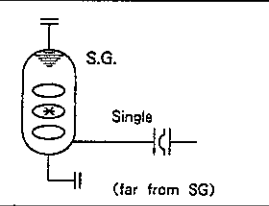
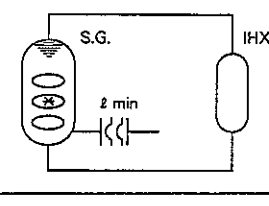
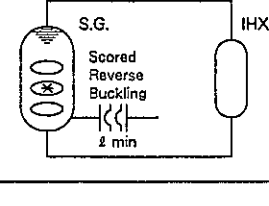
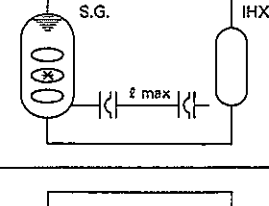
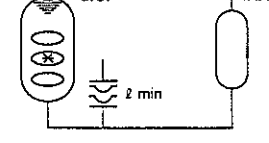
Test No.	Illustration of Test Conditions	Source Pressure ( $P_2$ ) History		Result of Disc Rupture	
		Peak [kg/cm <sup>2</sup> g]	time [ms]	Result of Disc Rupture	
				First	Second
SG55		33	20	○	—
SG54		32	20	○	△
SG52		34	20	○	△
SG53		34	20	○	△
SG57		32	20	○	○
SG56		31	20	○	—
NO58		32	20	○	○
NO59		34	20	○	○
NO60		34	20	○	△
NO61		32	20	○	○

表4.4 RD破裂時刻の試験と計算の比較

試験ケース	1枚目ディスク破裂時刻		2枚目ディスク破裂時刻	
	(試験)	(解析)	(試験)	(解析)
SG55	2.8 <sup>*1</sup> ~4.1 <sup>*2</sup>	2.61	—	—
SG56	4.6 <sup>*1</sup> ~6.6 <sup>*2</sup>	3.59	—	—
SG54	3.2 <sup>*1</sup>	2.85	6.2 <sup>*2</sup>	5.96
SG52	4.3 <sup>*2</sup>	3.06	34.7 <sup>*2</sup>	28.4
NO58	2.8 <sup>*1</sup>	2.66	6.0 <sup>*2</sup>	5.93
NO59	2.9 <sup>*1</sup>	2.89	6.7 <sup>*2</sup>	6.75
NO60	4.1 <sup>*2</sup>	2.78	39.3 <sup>*2</sup>	29.4
NO61	3.6 <sup>*1</sup>	3.56	6.7 <sup>*2</sup>	6.83

単位：msec

\*1) ディスク直前に設置したフォイルの破断時刻

\*2) ディスク直後に設置したフォイルの破断時刻

表4.5(a) 放出系配管内の平均流速（計算結果）

試験ケース	放出系配管長さ (m)	配管中心の接続点からの距離 (m)	配管への流入時刻 (msec)	配管からの流出時刻 (msec)	配管内の平均流速 (m/s)
SG55	1.80	1.36	2.61	48.1	39.6
SG56		2.53	3.59	95.3	19.6
SG54		1.42	5.96	56.5	35.6
SG52		2.61	28.4	85.0	31.8
NO58		1.42	5.93	61.8	32.2
NO59		1.42	6.75	64.5	31.2
NO60		2.61	29.4	93.7	28.0
NO61		1.40	6.83	72.0	27.6

表4.5(b) 放出系配管内の平均流速（試験結果）

試験ケース	測定方法	距離 (m)	流速 (m/s)
SG55	フォイルの破断時刻	0.43	125.0
		1.63	35.0
SG57	ディスク間的高速撮影	1.06	50.0

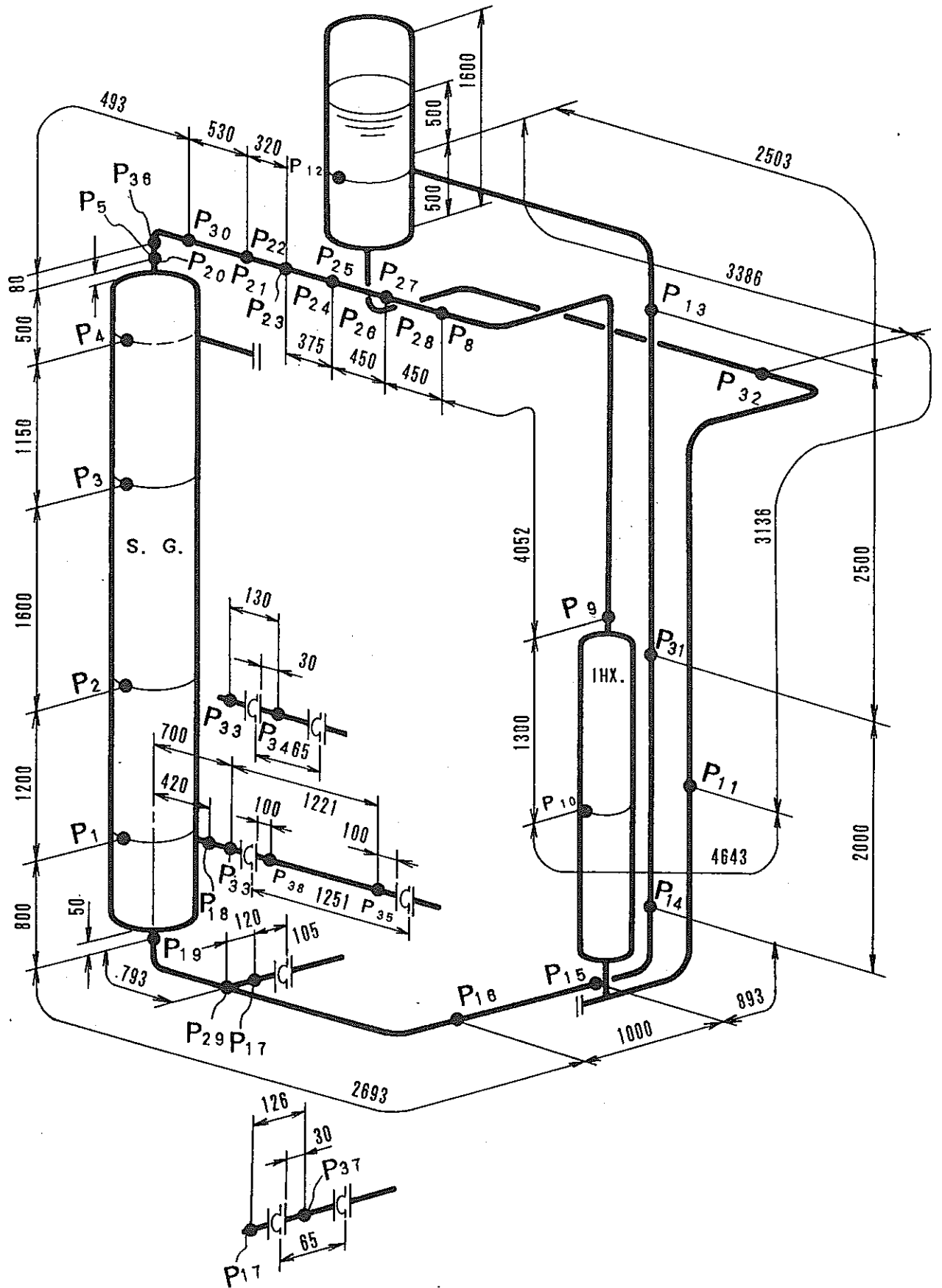
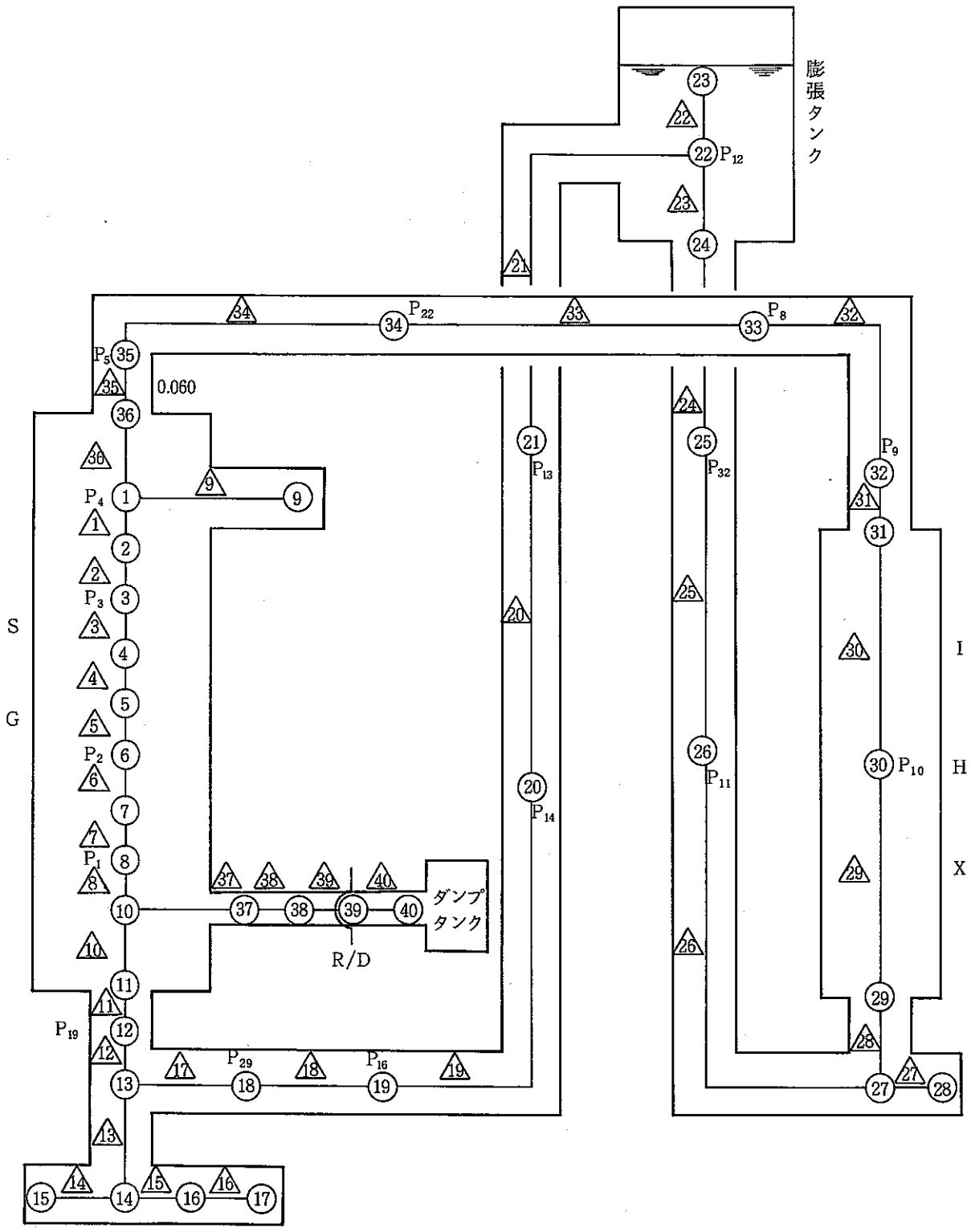


图 4.1 PEPT 試驗裝置鳥瞰圖



セクション数 12  
 部材数 40  
 接合点数 40

図 4.2 検証用ネットワークモデル (ケース 2)

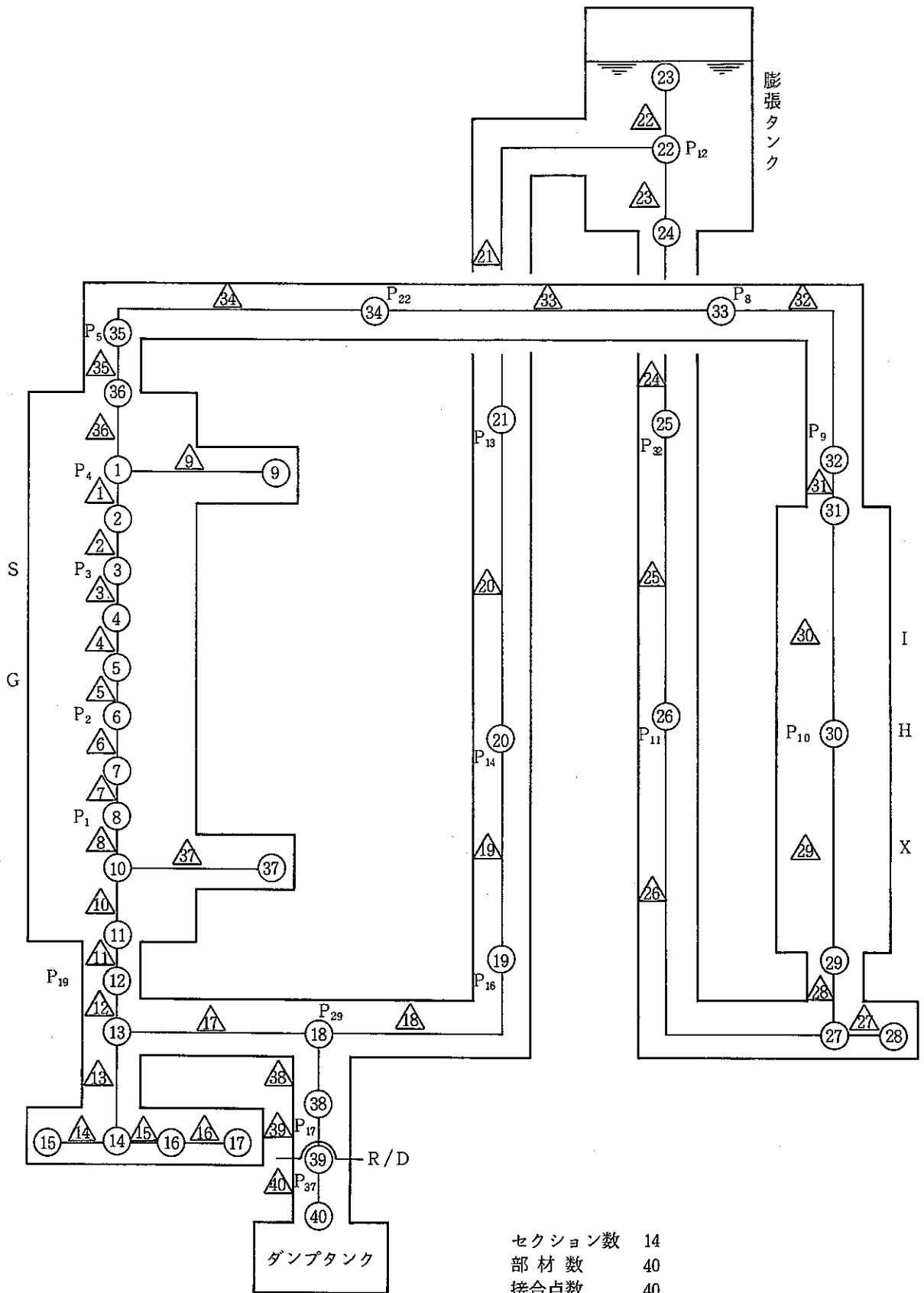


図 4.3 検証用ネットワークモデル (ケース 3)

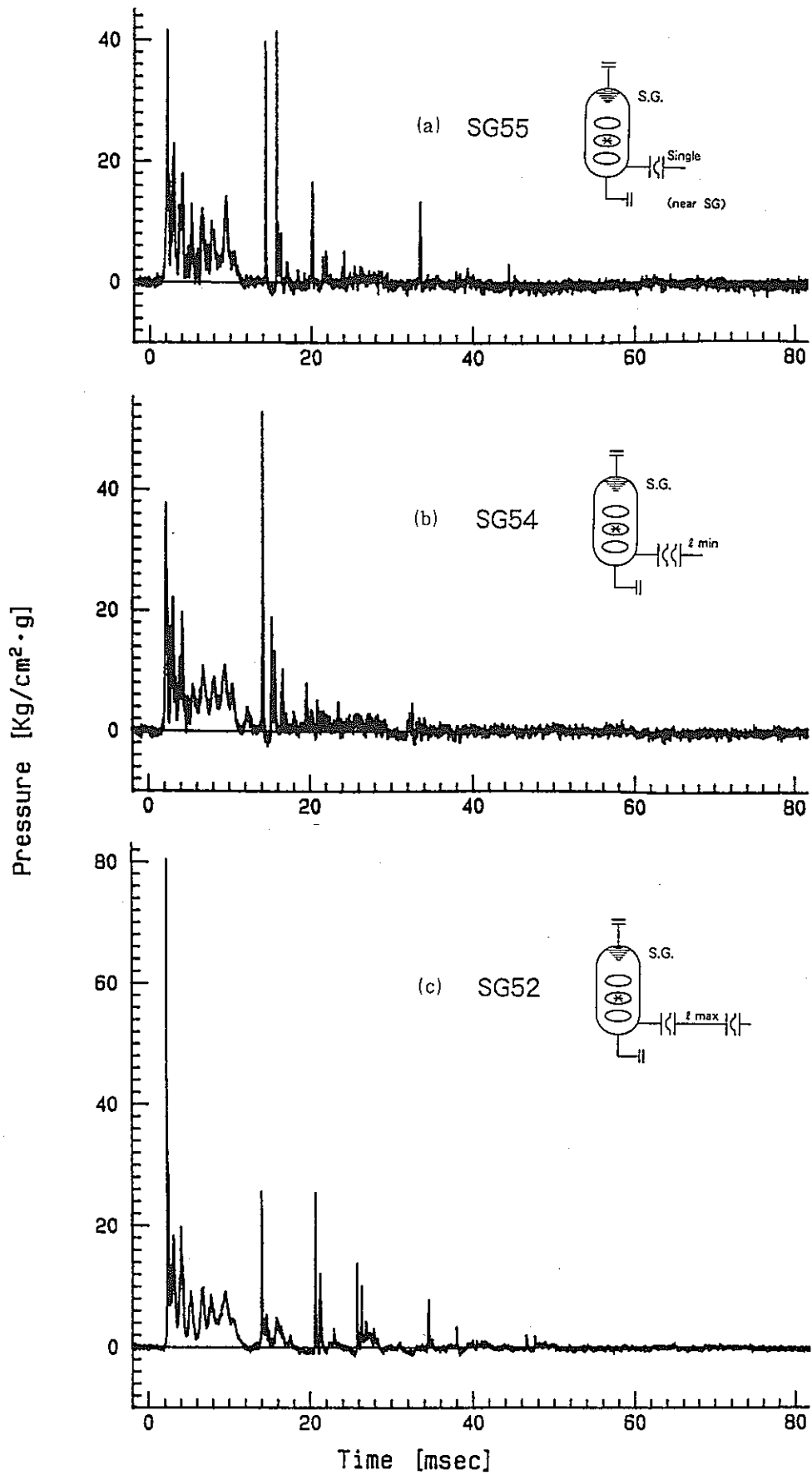
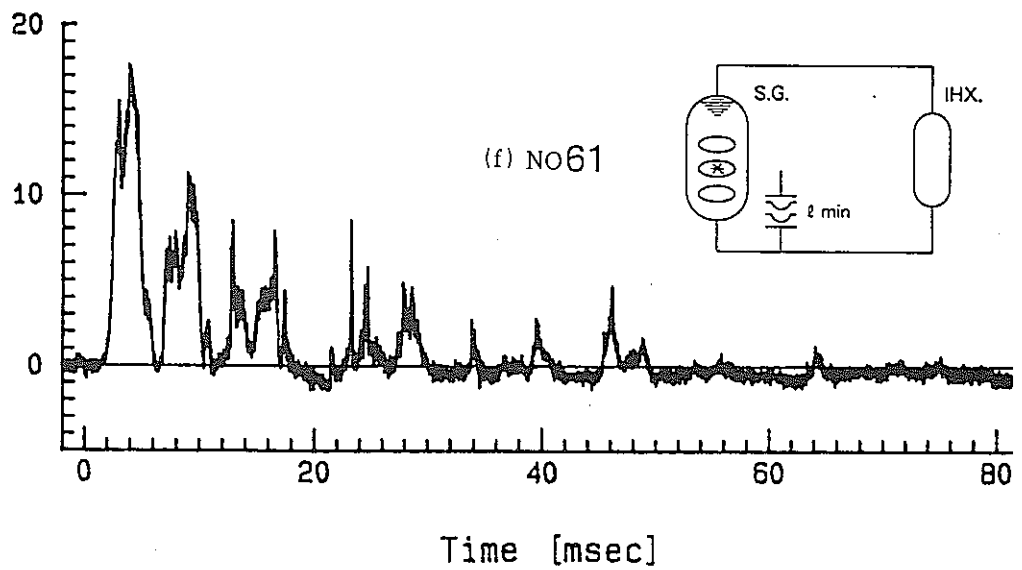
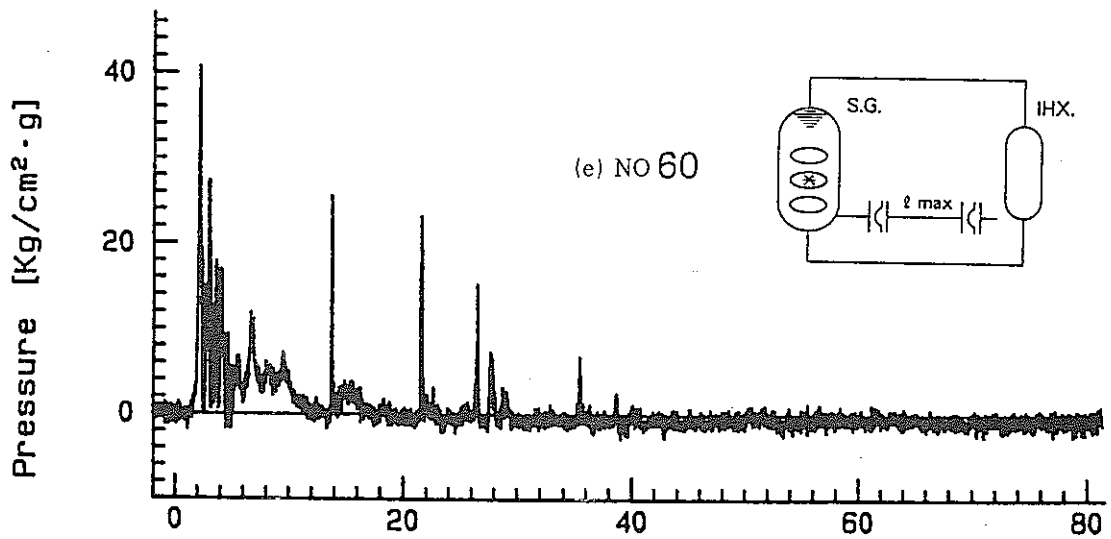
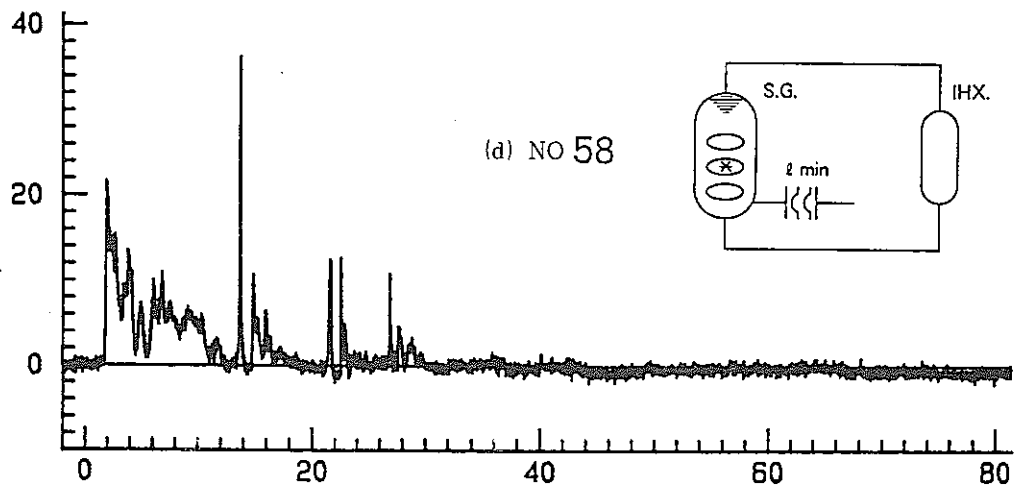
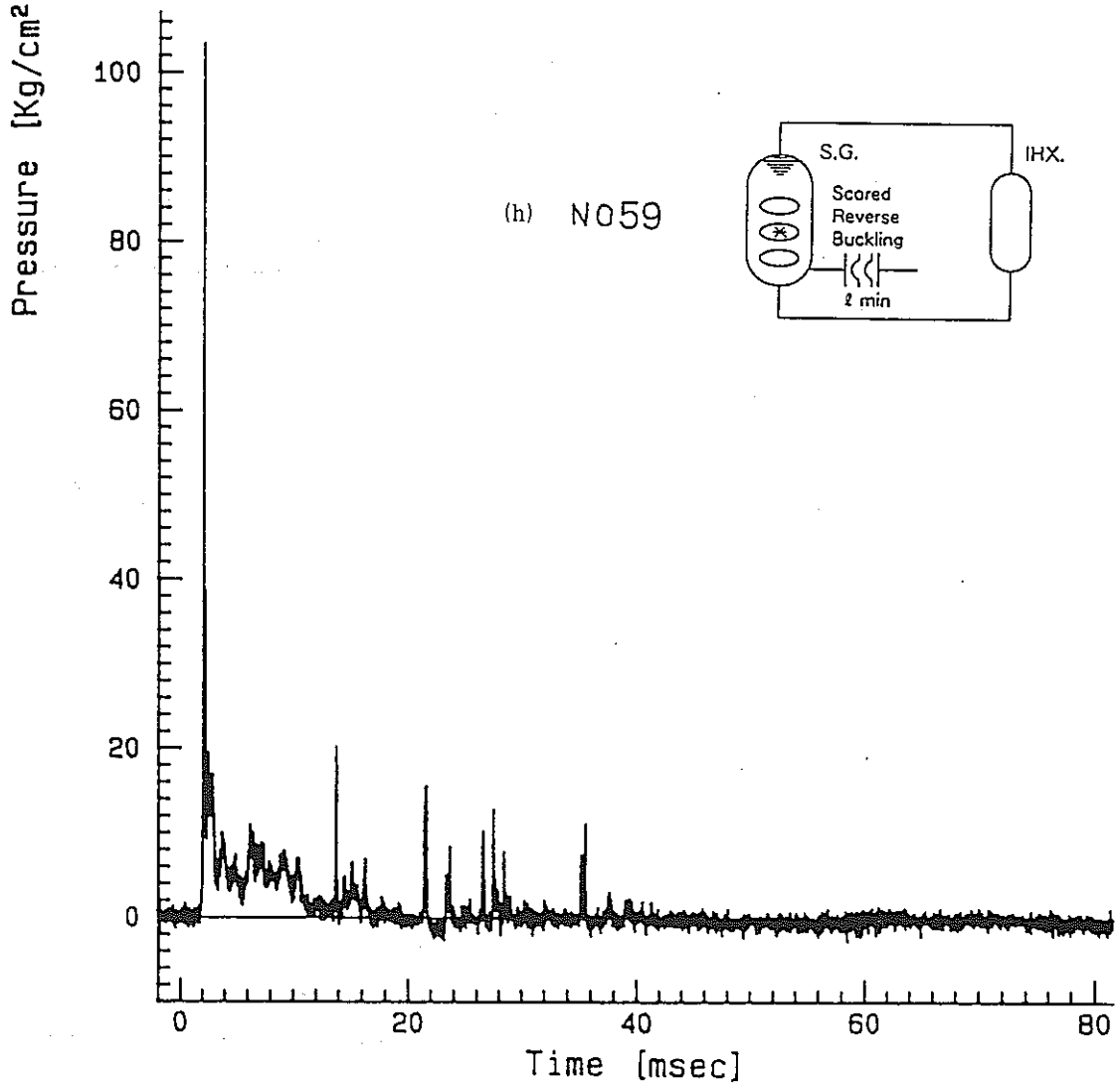
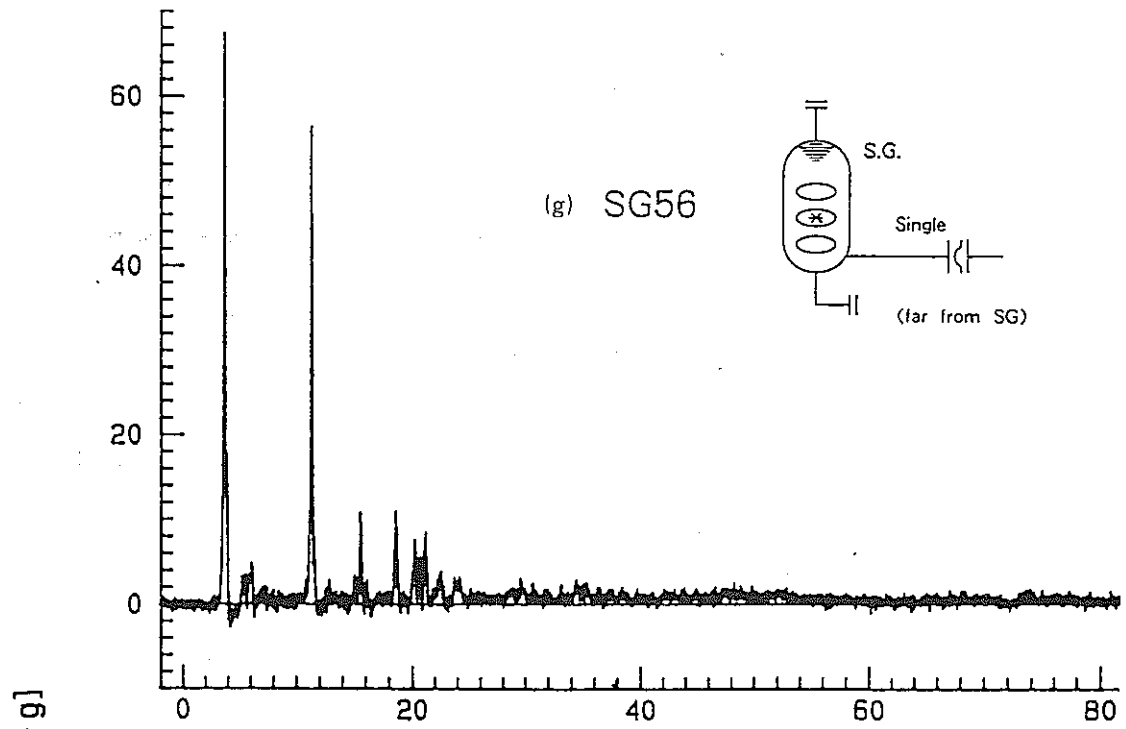
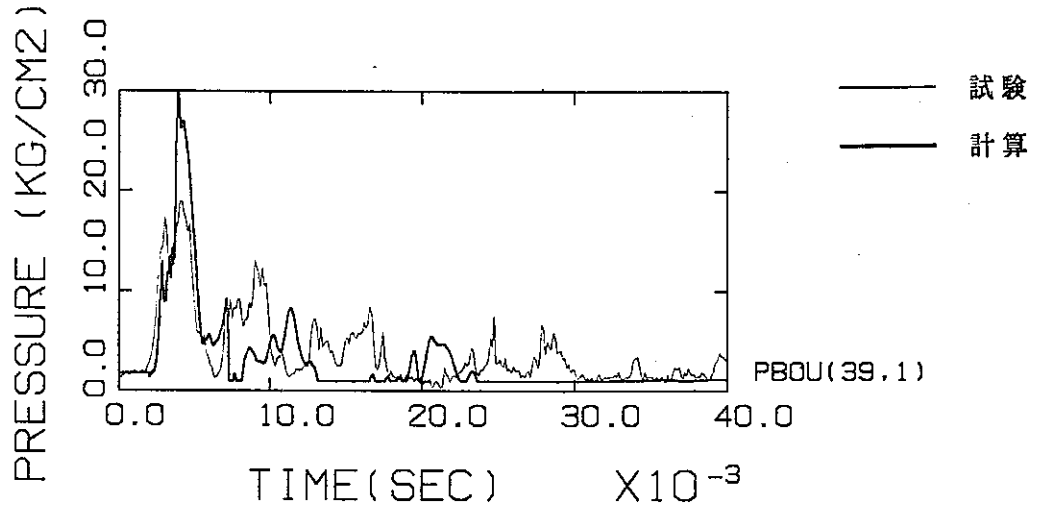


図4.4 P E P T 試験結果 (R D 手前での圧力波形)

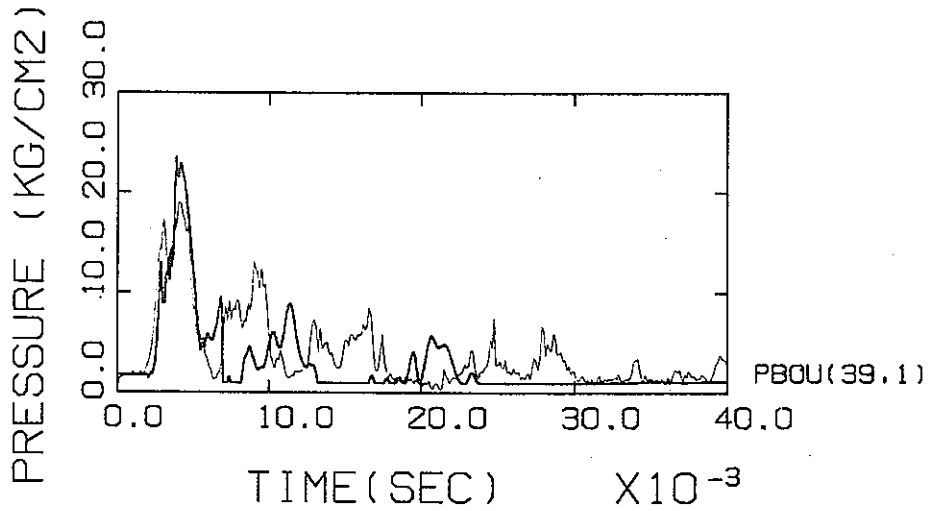




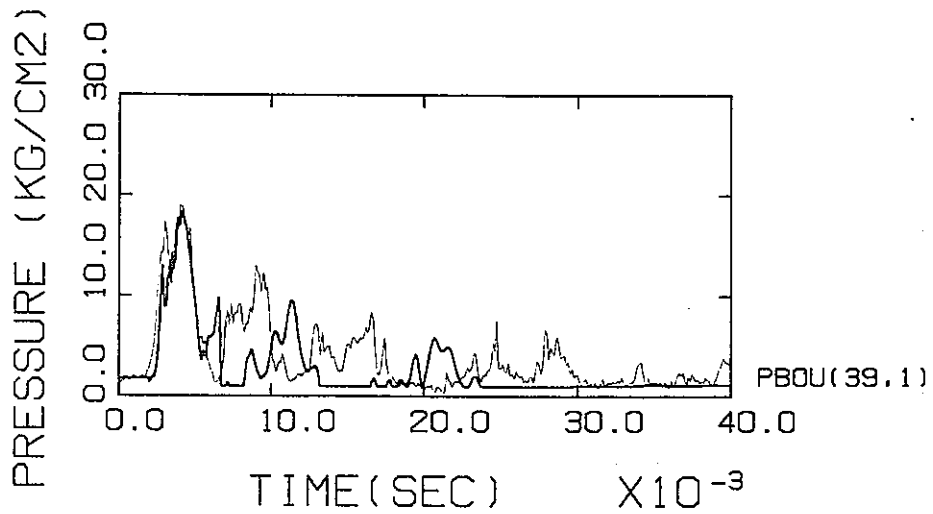




(a) GAR = 1.0, GVE = 0.5 のケース



(b) GAR = 0.8, GVE = 0.5 のケース



(c) GAR = 0.6, GVE = 0.5 のケース

図 4.5 検証用予備計算結果

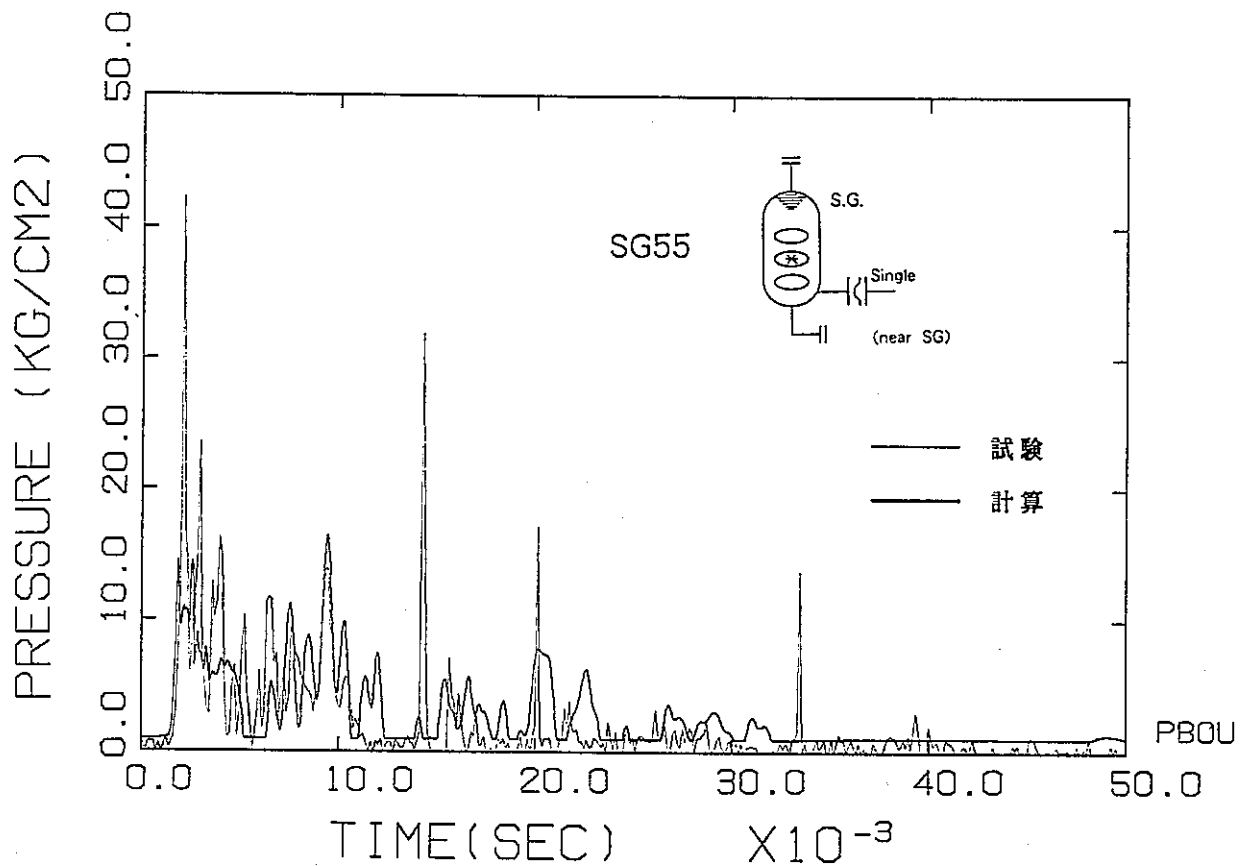


図4.6 検証計算結果 (ケースSG55)

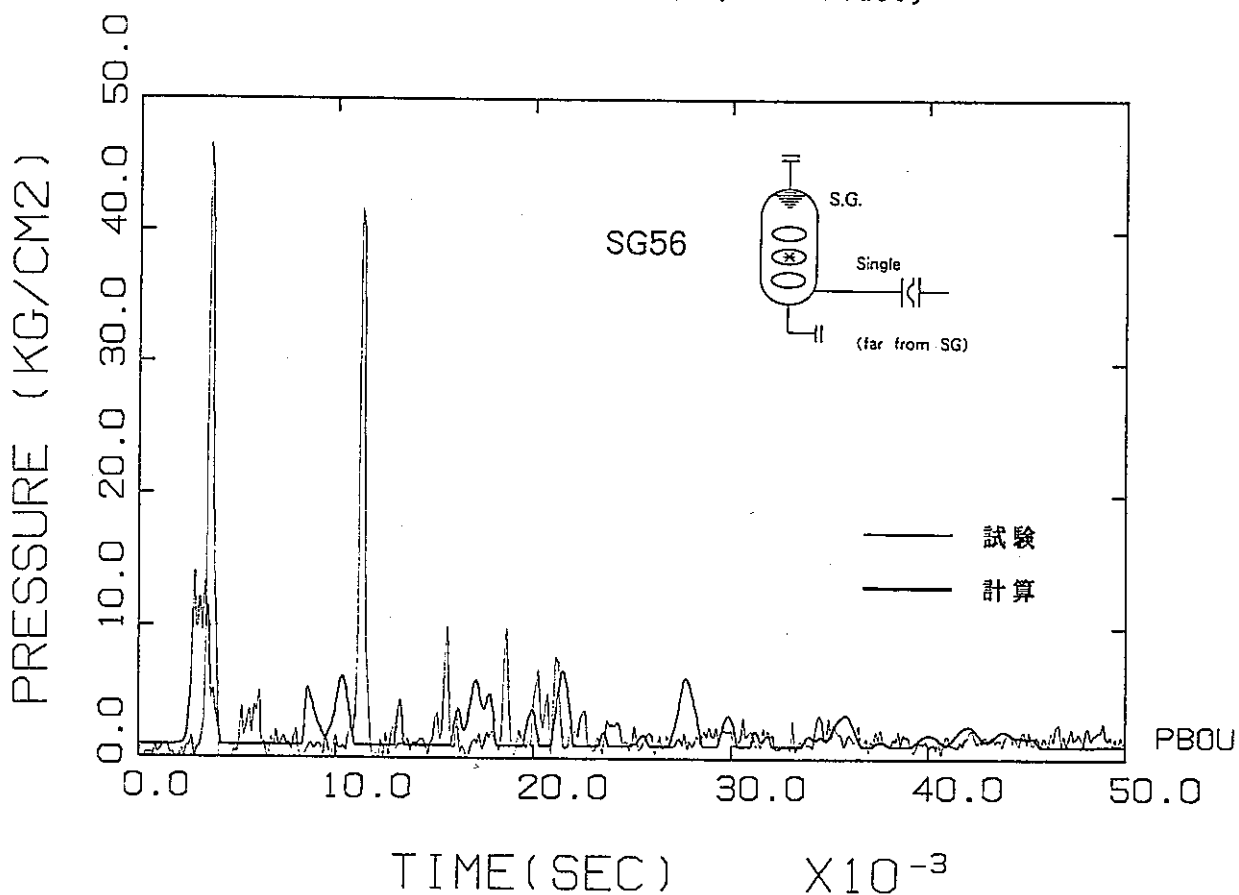


図4.7 検証計算結果 (ケースSG56)

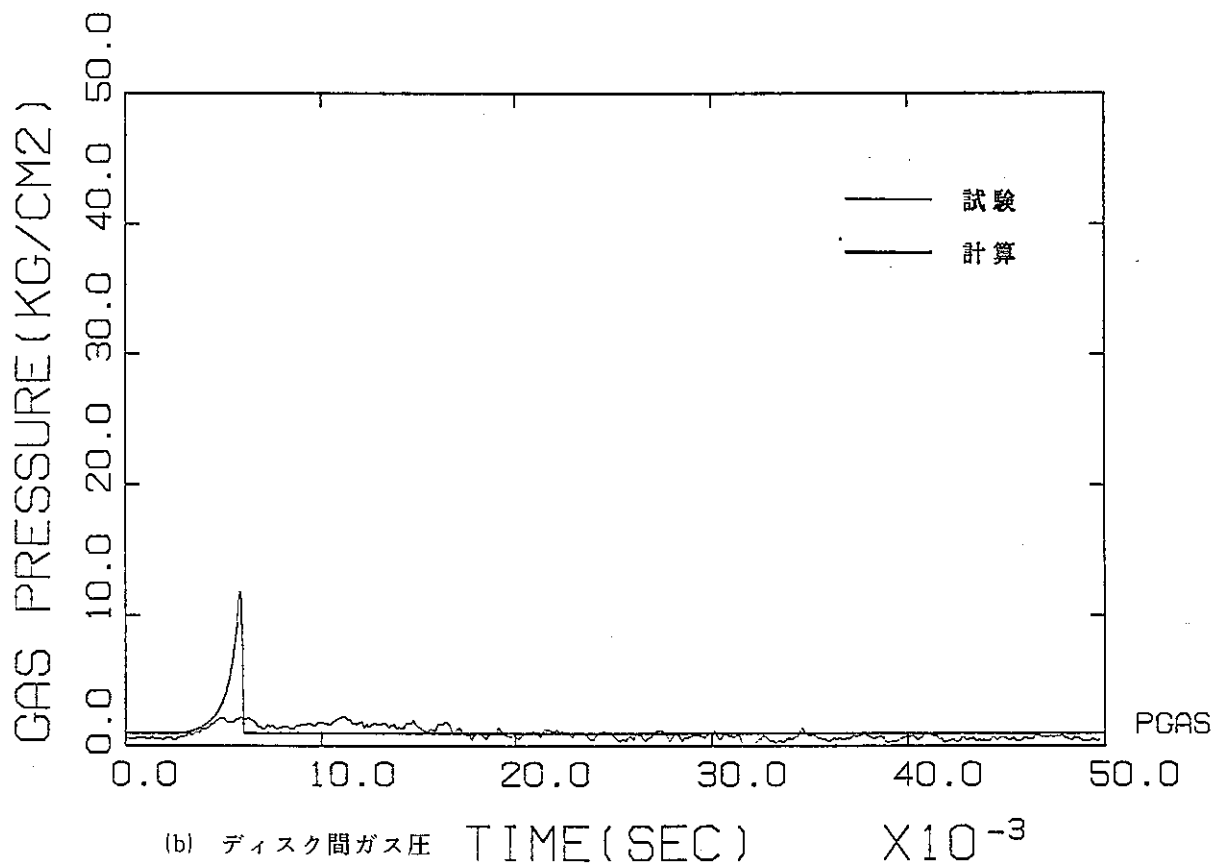
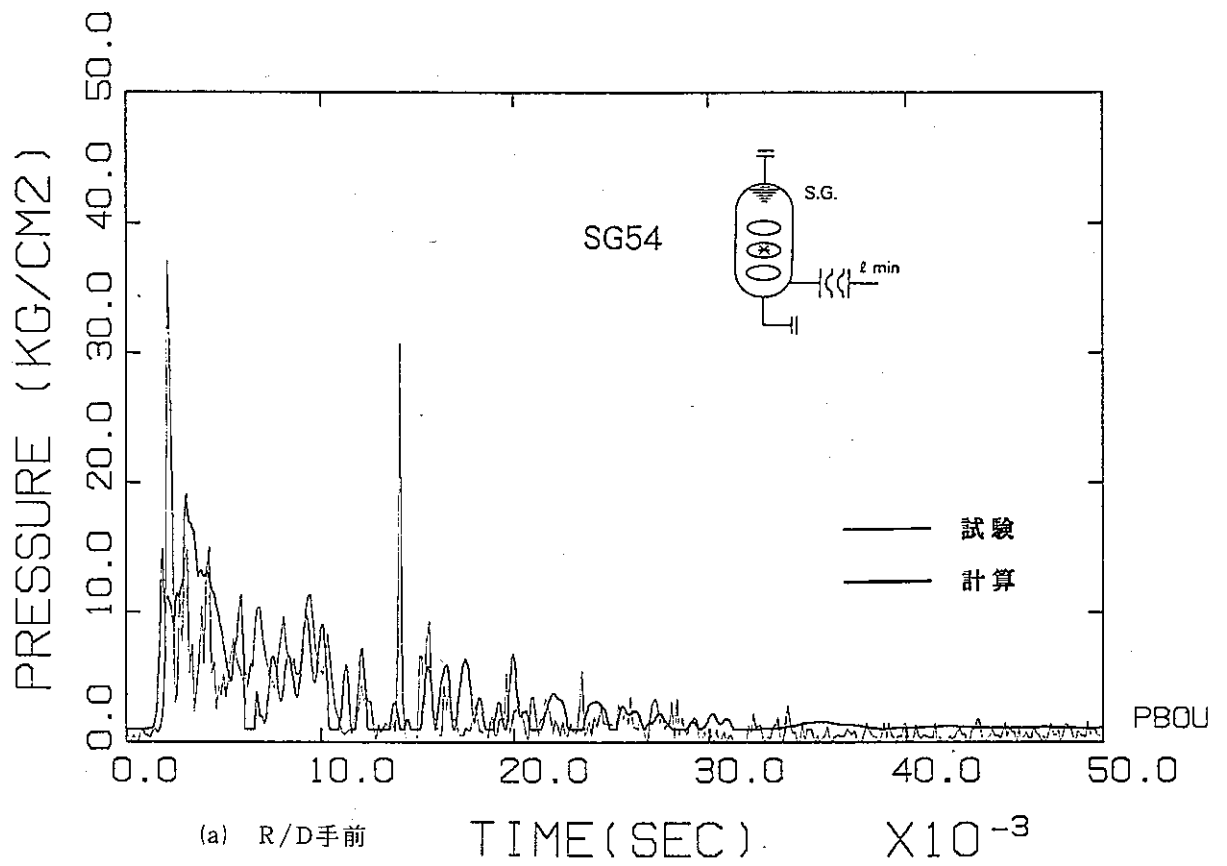


図4.8 検証計算結果 (ケースSG54)

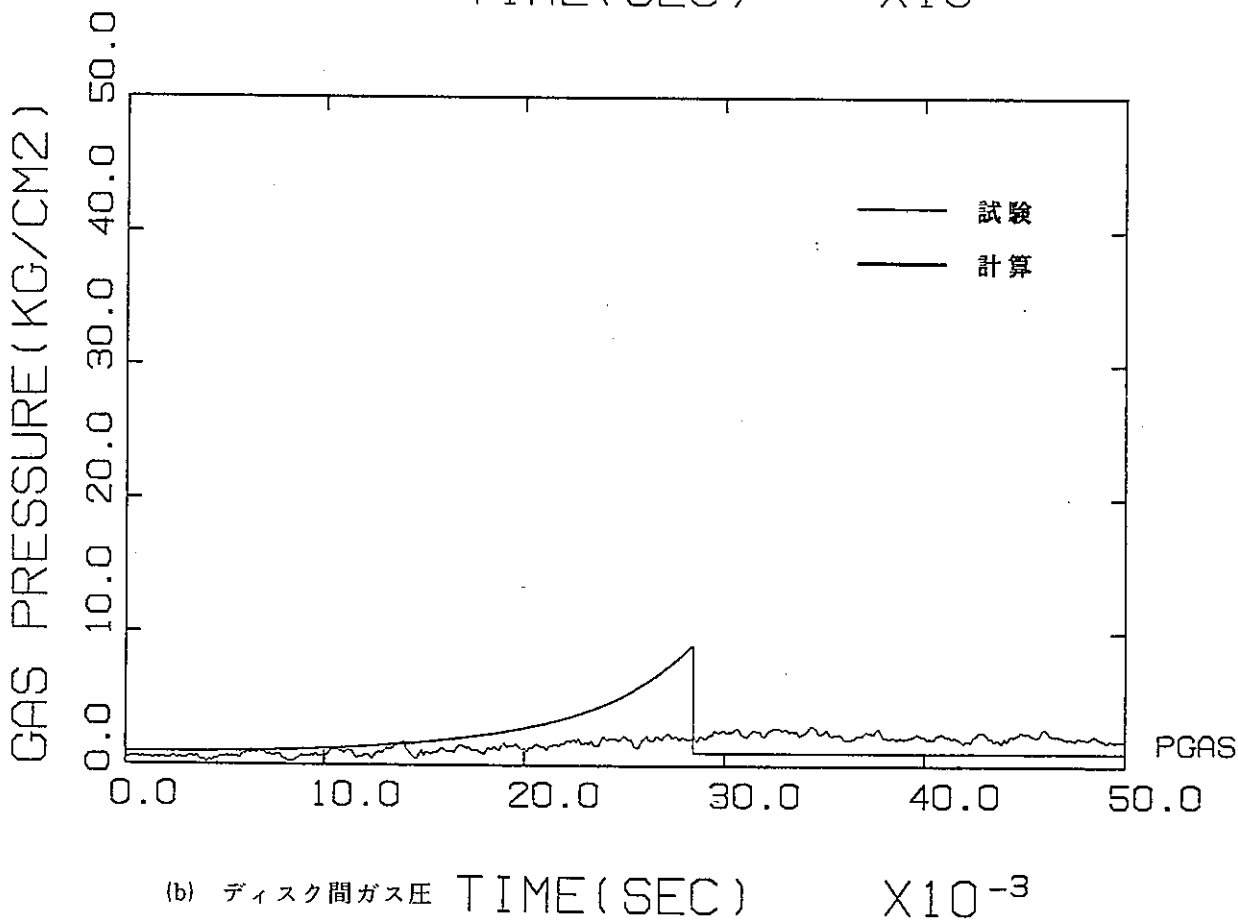
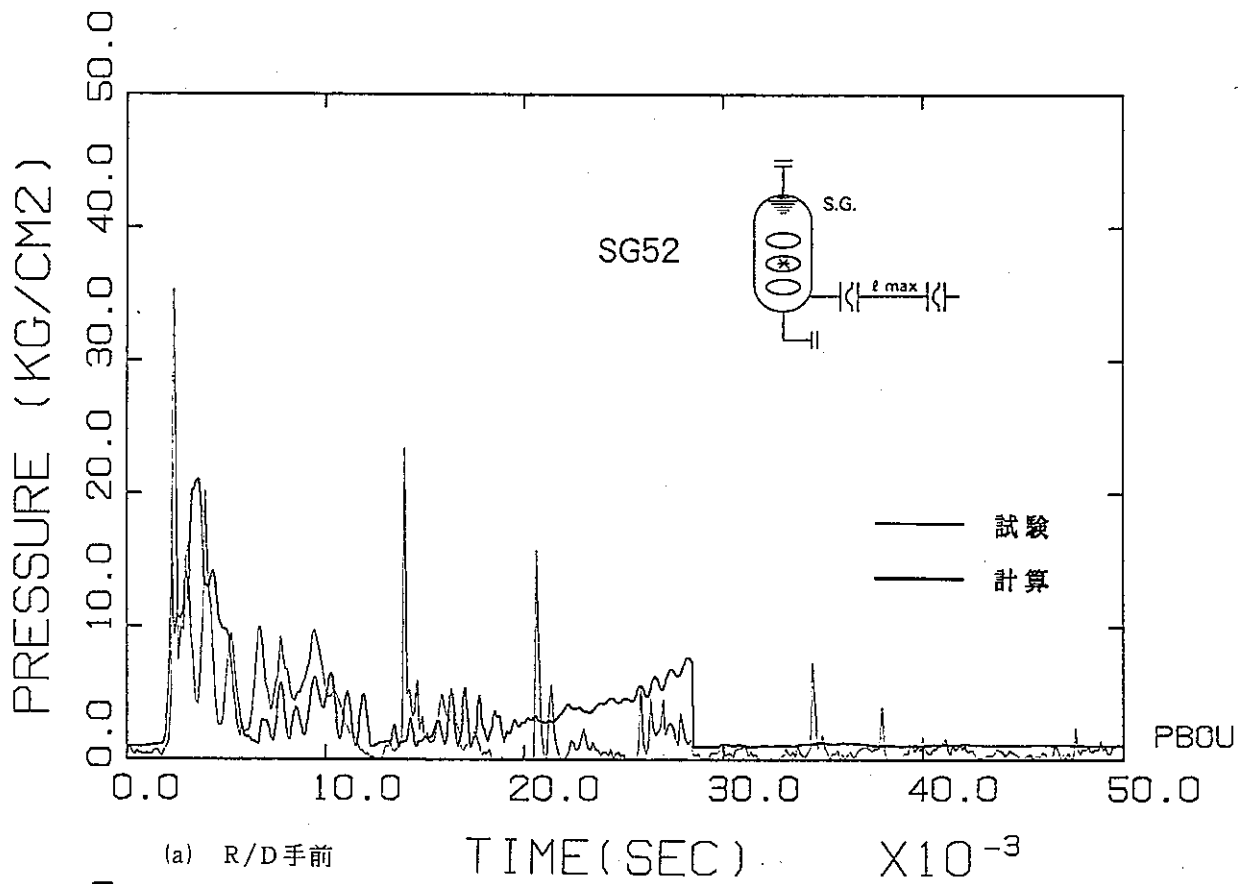


図4.9 検証計算結果 (ケースSG52)

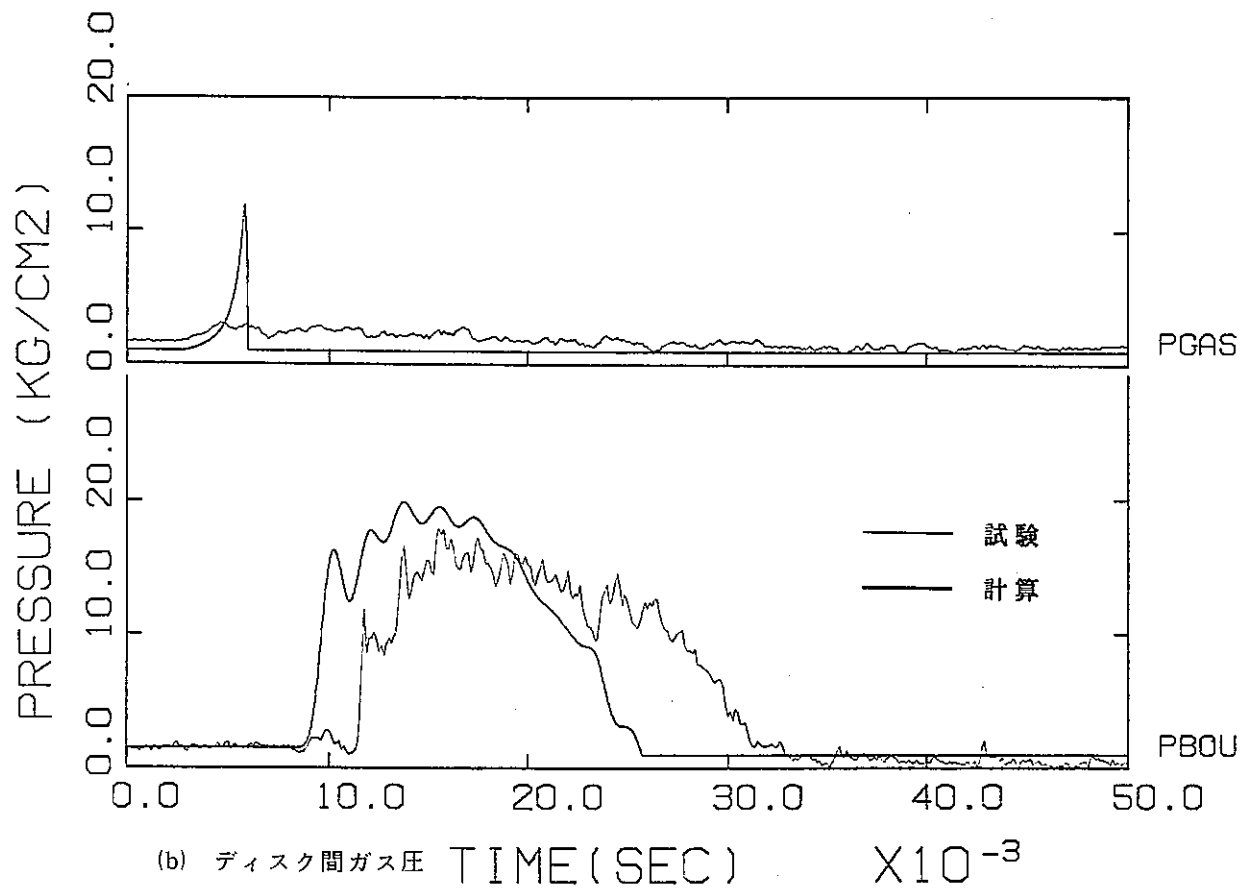
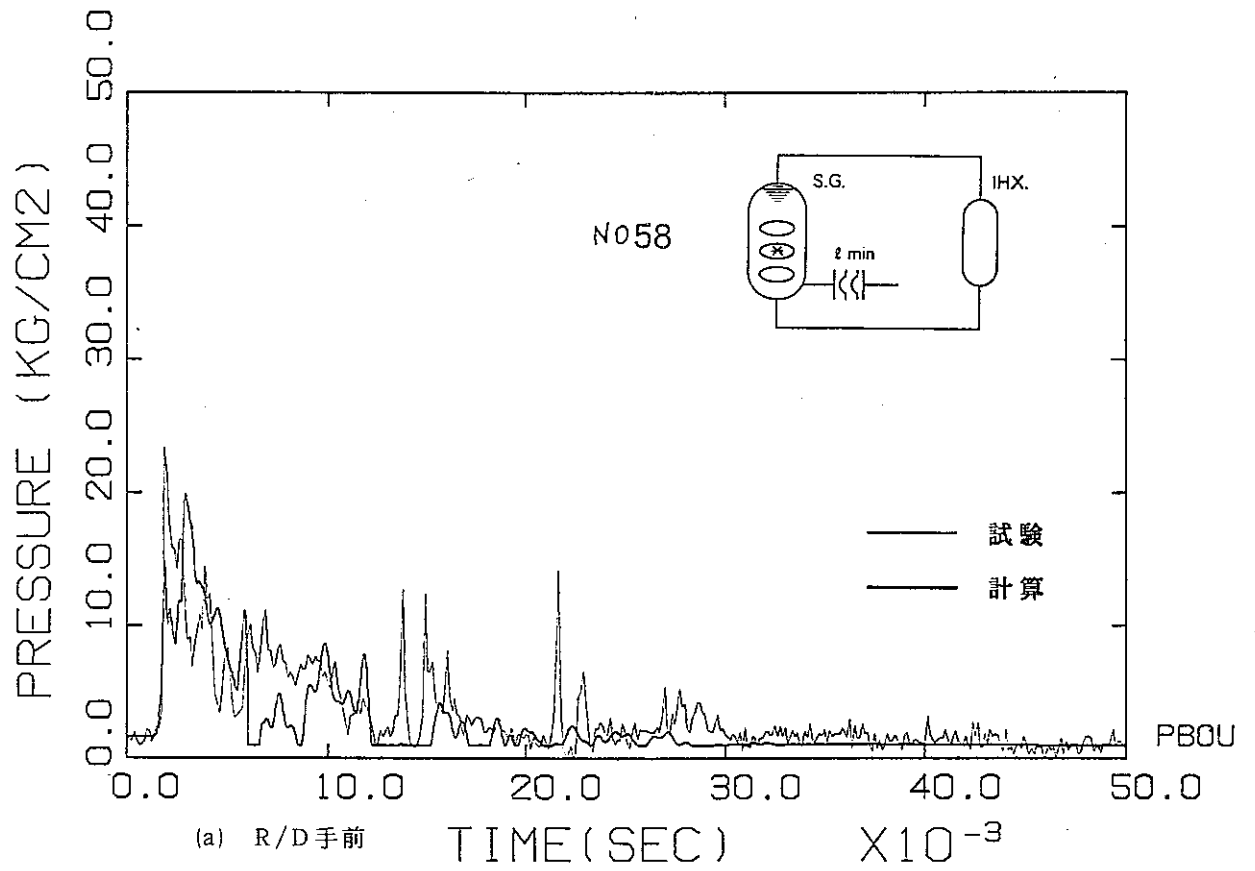


図4.10 検証計算結果 (ケースN058)

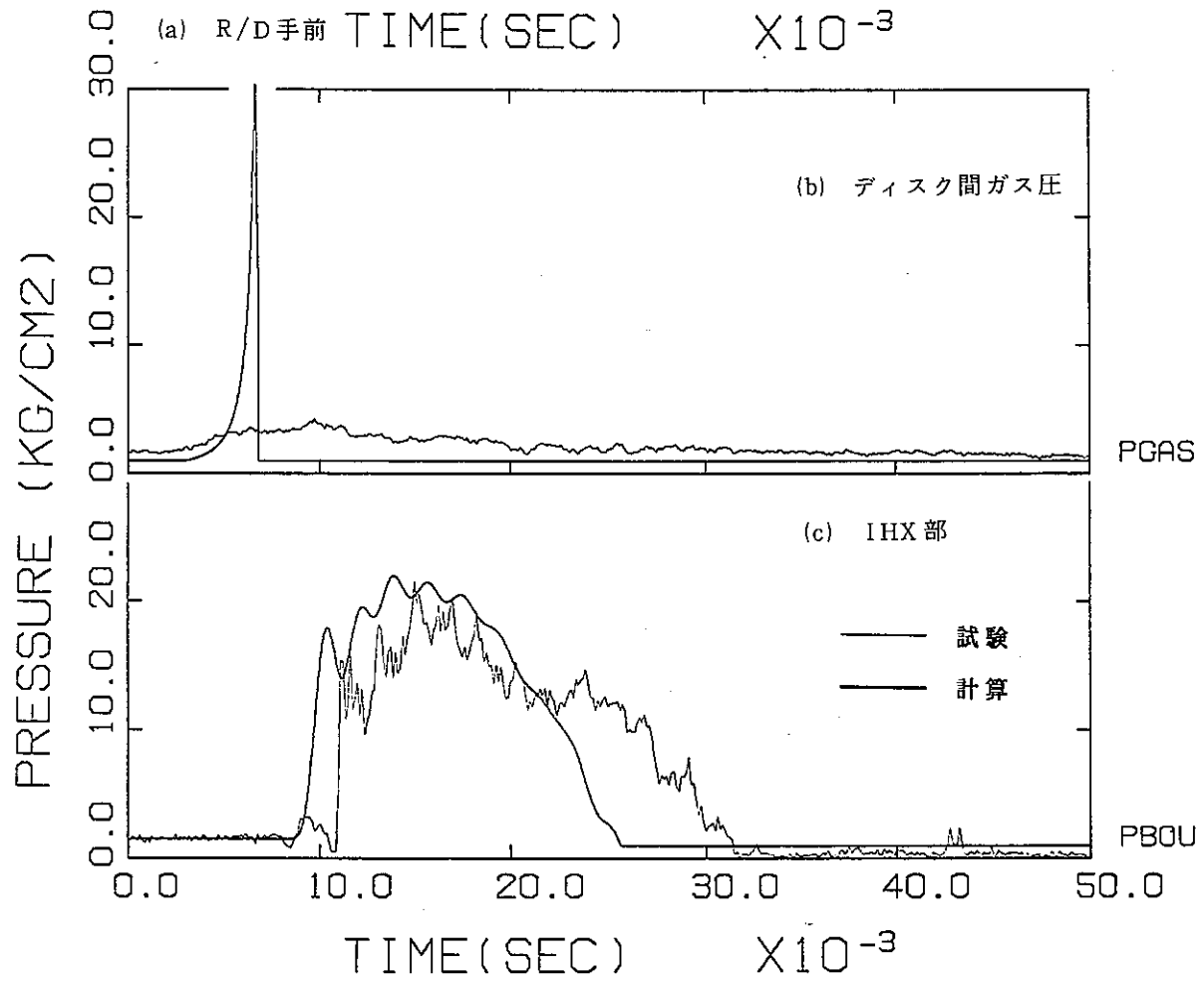
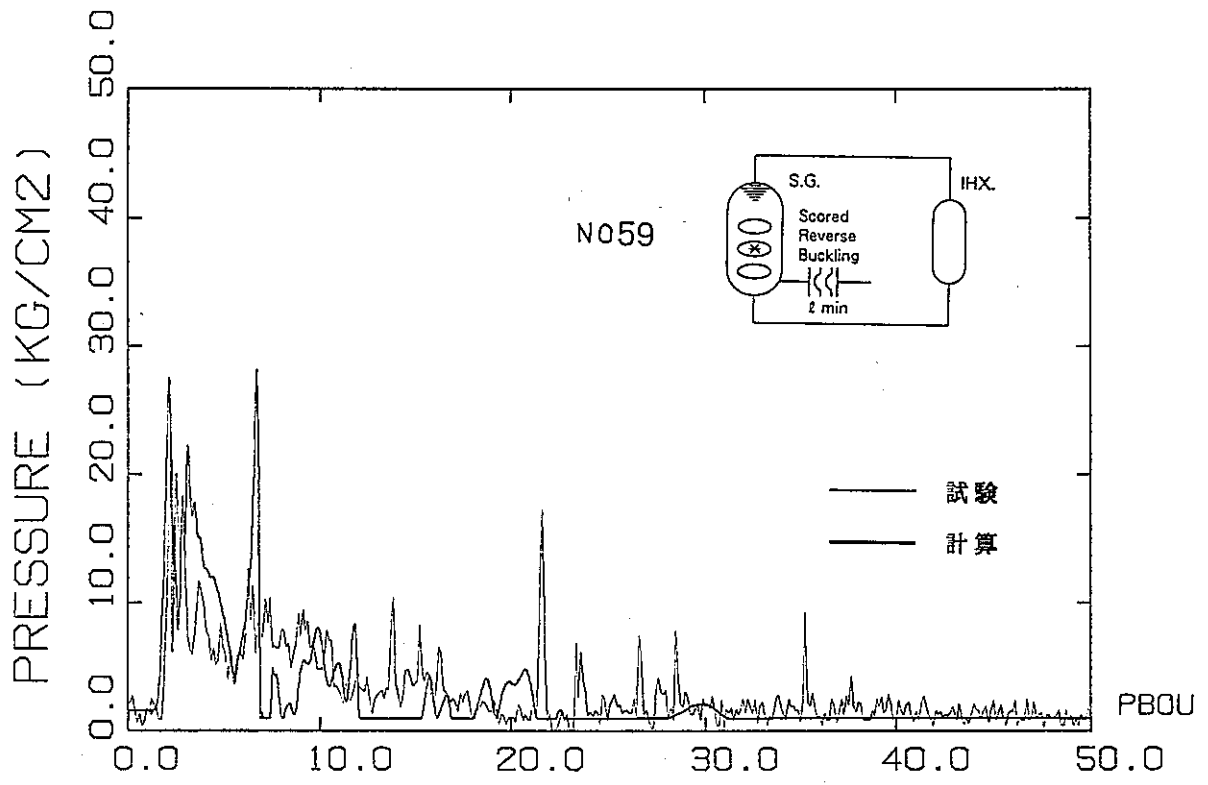


図4.11 検証計算結果 (ケースN059)



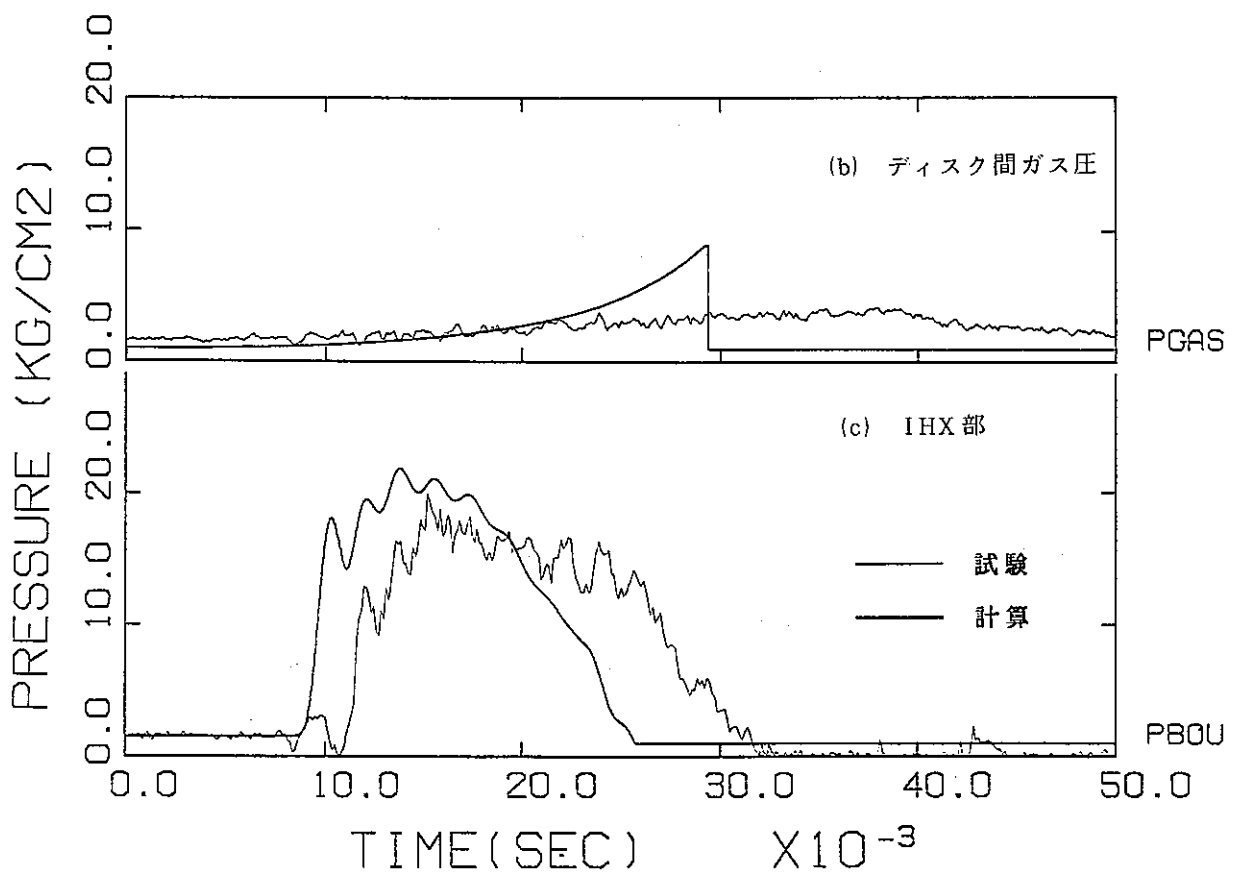
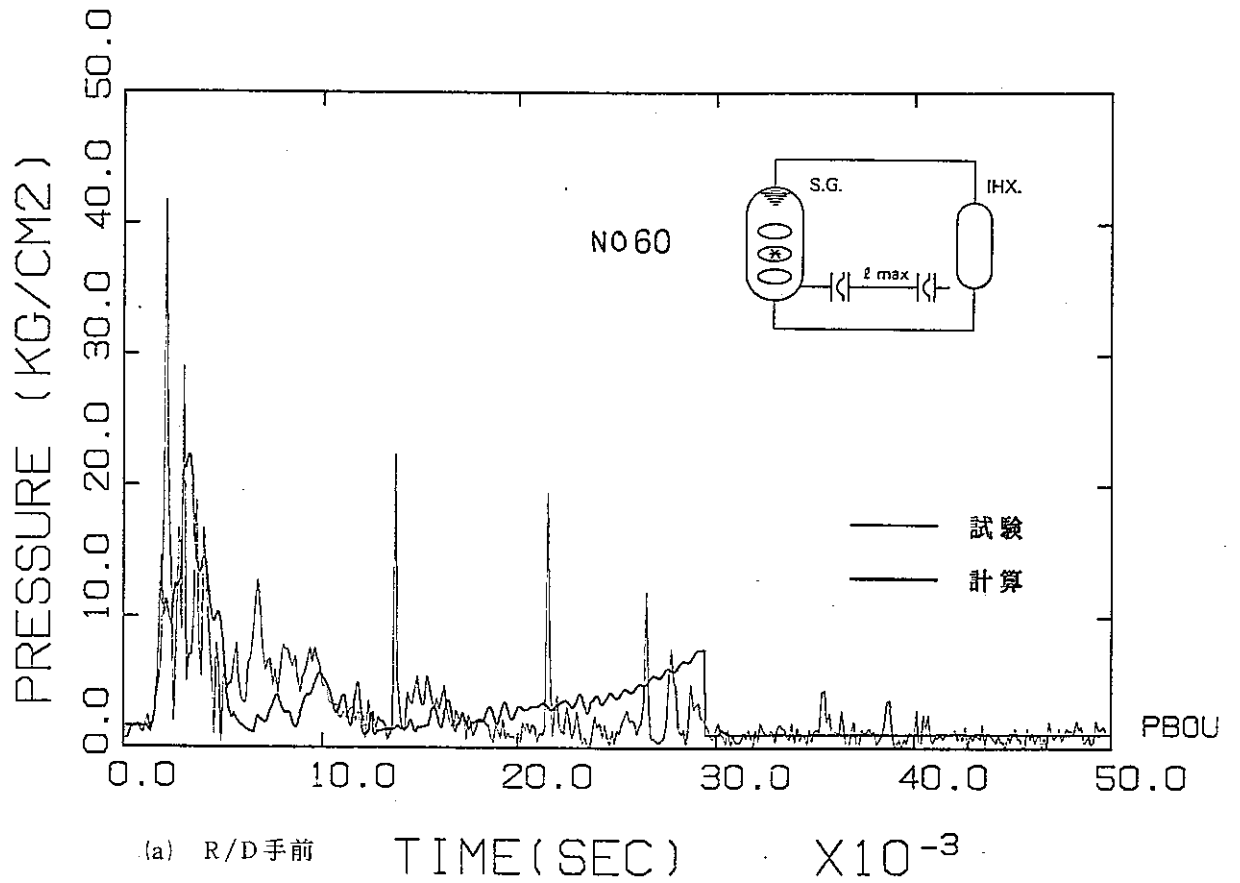


図4.12 検証計算結果 (ケースN060)

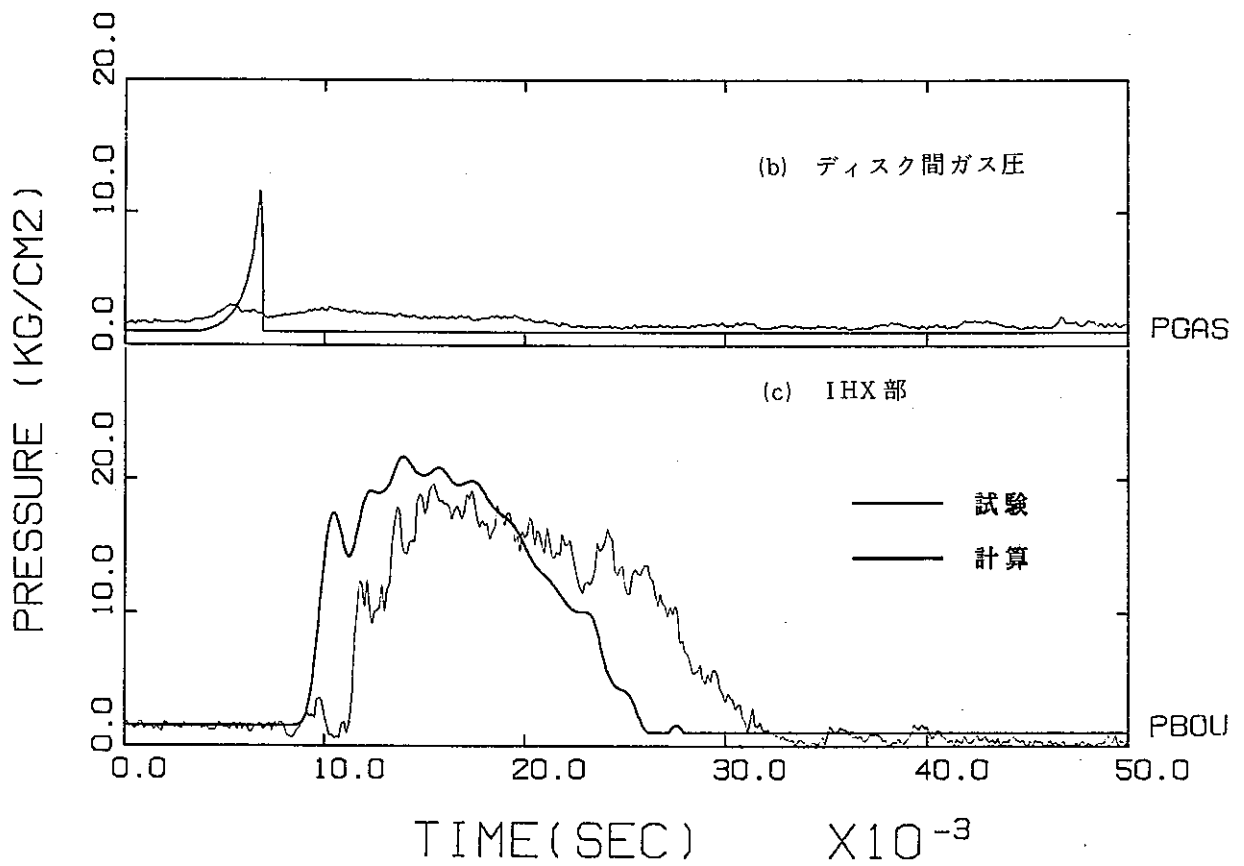
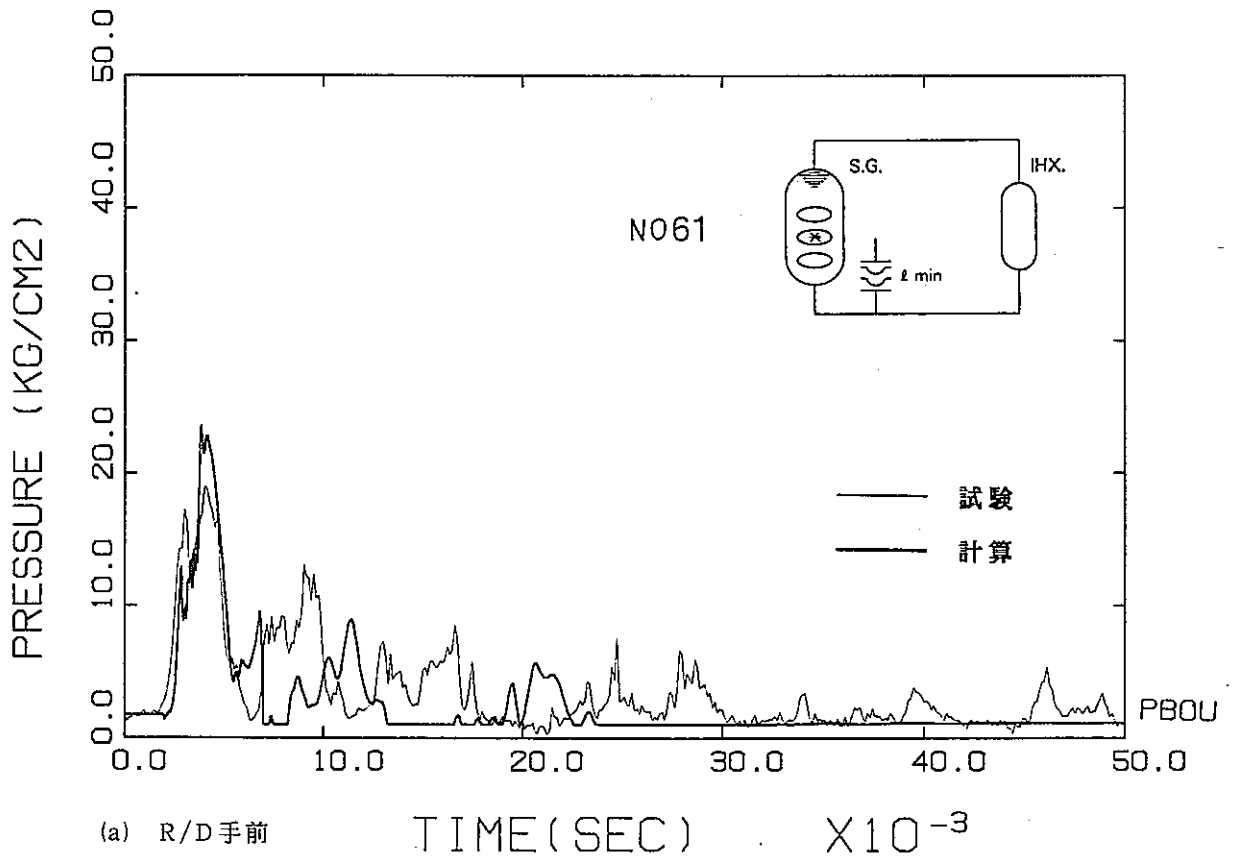


図4.13 検証計算結果 (ケースN061)

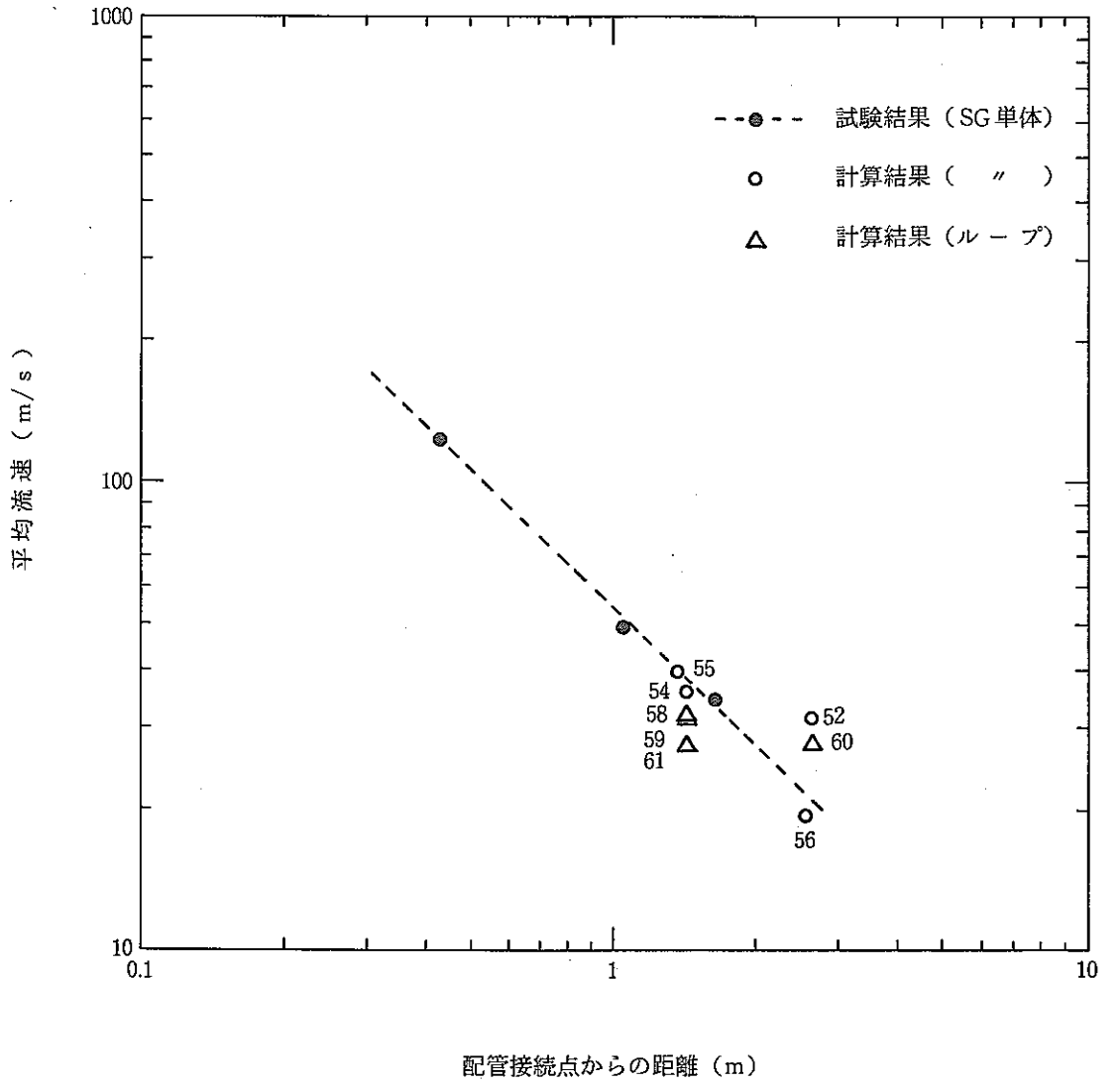


図 4.14 検証計算結果 (配管内流速)

## 5. 結言

### 5.1 検証解析

検証解析を実施し、RD 応答モデルや放出系配管の BTM の計算機能を検証した。RD 応答モデルについては、RD 破裂パラメータ ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $t_2 - t_1$ , GAR, GVE) を変えた計算を実施し、接液型 RD の圧力開放特性にディスクの破裂／開口特性が大きく関与することを明らかにし、その圧力波形に及ぼす解析モデル／各種計算パラメータの定性的な影響を把握できた。BTM については、現コードとの整合性を保つ上で RD 破裂後の圧損係数の取扱いが今後必要なことを明らかにした。

なお本報の検証解析では、長シミュレート時間の計算時に関係してくる Na - 水反応部での気液界面の固定境界（異径配管接続点、多分岐境界点等）移動モデル<sup>[6]</sup>を対象範囲外としたため、このモデルは今後の検証課題として考慮する必要があると考える。

### 5.2 試験解析

無液面型の大型炉 SG 体系の縮尺モデルである PEPT 試験装置で使用した RD の形状／物性データ、及び試験結果から選定したダブル型 RD の主要パラメータ値を用いて試験解析を実施し、試験結果と比較した。

その結果、2 枚目 RD 破裂時の圧力波形には放出水の衝突により変形・破裂する試験結果とガス圧で破裂し完全開口する解析とに対応した違いが見られたものの、RD 破裂パラメータに適切な値 ( $R_1=0$ ,  $R_2=1$ ,  $t_2 - t_1=0.004$ , GAR=0.8, GVE=0.5) を用いることで、1 枚目 RD の破裂時刻やディスク破裂時の圧力波形（最大ピーク圧）を精度よく（+20% 前後）保守側に評価可能であることを確認した。また、RD 部下流の放出系配管内の放出水流速についても試験と解析で概ね一致することが示された。

構造健全性評価上重要となる IHX 部での圧力波伝播の検証では IHX 部の波形等について試験と解析で良好な一致を得ることができ、特に最大ピーク圧の精度は +10% 前後となることが示され、これは有液面型の SG を対象に従来から実施してきた検証結果の評価精度を十分確保する<sup>[9]</sup>ことから、改良モジュールは無液面型 SG の安全設計解析コードとしても適用性があることを確認できた。

## 参考文献

- (1) 三宅, 進藤, 佐藤, 「大リーク・ナトリウム-水反応解析コード  
- SWACS / REG 3 - (概要説明書)  
- 大リーク・ナトリウム-水反応解析 (第3報・改訂版) -」,  
PNC SN952 79-19, 1979年9月
- (2) 三宅, 進藤, 佐藤, 「大リーク・ナトリウム-水反応解析コード  
- SWACS / REG 3 - (使用説明書)  
- 大リーク・ナトリウム-水反応解析 (第7報) -」,  
PNC SN952 79-20, 1979年9月
- (3) 坂野, 清水, 吉江, 岩崎, 進藤, 藤井, 「圧力波挙動測定試験」,  
PNC SJ9055 88-003(1), 1988年8月
- (4) 「圧力波挙動測定試験 データ集」, PNC SJ9055 88-003(2), 1988年8月
- (5) 吉江, 岩崎, 進藤, 矢野, 「圧力波挙動測定試験・シリーズII」,  
PNC SJ9055 89-002, 1989年10月
- (6) 浜田, 鈴木, 姫野, 「ナトリウム-水反応解析コードSWACSの改良と検  
証」, PNC SN9410 89-087, 1989年5月
- (7) 浜田, 鈴木, 姫野, 「大リーク・ナトリウム-水反応解析コード  
SWACS / REG 4 使用説明書」, PNC SN9520 89-016, 1989年7月
- (8) 浜田, 鈴木, 姫野, 「ナトリウム-水反応解析コードSWACSの無液面型  
SG向け改良と検証」, 日本原子力学会, 1989年秋の大会, 1989年10月

- (9) 三宅, 進藤, 山口他, 「大リーク・ナトリウム-水反応時の圧力波伝播解析  
(SWACSコードによるSWAT-3, RUN-3, 5, 7実験検証)  
-大リーク・ナトリウム-水反応解析(第11報)-」, PNC SN941 81-15,  
1981年1月

## 謝 辞

コードの改良から本報告書の作成に当たり、常に適切な指導と助言を頂いたプラント安全工学室の三宅収副主任研究員、コード改良にあたりご協力を頂いた茨城ソフトウェア(株)の鈴木道博氏、PEPT試験の計画・実施及びデータ処理にあたりご協力を頂いた下山一仁氏に謝意を表します。

A P P E N D I X



## A. コードの概要

### A.1 SWACS/REG4の概要

SWACSコードは、伝熱管破断が発生した事故SG、（分離型の場合）それと連結する健全なSG、2次主冷却系機器である中間熱交換器、ポンプ、弁、及び配管等を解析の対象とする。また、伝熱管に破断が生じてから、破断口から噴出した水／蒸気とナトリウムの反応で初期スパイク圧が発生し、この圧力が系内を伝播／減衰し、その後水素のビルドアップにより上昇する準定常圧が圧力開放系（放出系）により減衰され、ナトリウム－水反応が終了するまでの過渡現象を模擬するものである。

SWACS/REG4は、破断口からの水噴出、初期スパイク圧／圧力波伝播、準定常圧と現象別に異なる解析機能を持つ3つの計算モジュールから成り、その各々で独立した計算が可能である。各計算モジュールは計算結果の引渡しあるいは連動計算によって結合されている。その構成を図A.1に示す。

### A.2 SWAC57Rの概要

SWACS/REG4の初期スパイク圧／圧力波伝播計算モジュール（SWAC57R）は、ナトリウム－水反応により瞬時に発生した水素ガス気泡が球状あるいはパンケーキ状に等温膨張すると仮定し、そのときの事故SG及び2次主冷却系内を数ミリ秒オーダーで伝播する初期スパイク圧を計算する。

ナトリウム－水反応部の計算は、時間とともに注水されて生じる水素気泡を球／柱モデルあるいはパンケーキモデルで扱い、また、反応部で発生した初期スパイク圧が2次主冷却系内を伝播する過程の計算は、冷却系を接合点と部材で構成される等価な配管モデルに柱モデル化して扱い、何れもナトリウムの圧縮性を考慮した一次元水撃方程式を特性曲線法により解く。ただし、反応部で用いられる球／柱モデルあるいはパンケーキモデルの代わりに、圧力既知境界として特定の位置の圧力時間関数を入力で与えることもできる。

接合点の境界条件には、自由液面、盲端、流路分岐等の他、圧力開放系としてシングル及びダブルの接液型RD（RD下流の放出系配管とダンプタンク接合点）を考慮することができる。

## A.2 SWAC57Rの開発

旧バージョンのSWACS/REG3では、図A.2の破線内に示すように、ナトリウム-水反応事故に関連する解析事象を4つに分割し、各々を独立した計算モジュールとして区別していた。このバージョンの初期スパイク圧計算モジュールでは、ナトリウム-水反応部近傍の気泡を球モデル、離れた部分を柱モデルとする球/柱モデルを採用していたが、このモデルでは、伝熱管多数本破断等による総水注水量の増加に伴い気泡が成長しその半径が大きくなったりあるいは計算時間が延長すると、モデル上に不都合が生じ計算の継続を強制的に停止していた。

SWAC57Rの旧バージョンであるSWAC57Pは、SWACS/REG3の初期スパイク圧および圧力波伝播の計算モジュールを合体して1つにし、また計算時間領域の拡大を計るため、気泡成長モデルを改良してパンケーキモデルを付加した。この反応部の計算モデルでは、ナトリウム-水反応時の初期に生成した気泡は球形で成長すると仮定した従来の球モデルを用い、反応部の気泡径があらかじ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。気泡径が大きくなると、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座標からExtra-Pipeと名付けた仮想配管内の柱座標に移し、それ以降は仮想配管内での計算を継続する（このモデルをパンケーキモデルと呼ぶ）。なお球モデルの気泡成長計算には気液界面の移動を考慮したBTMを用い、Extra-Pipe内での気泡成長計算には気液界面の移動を考慮しないFBM (Fixed Boundary Model) かBTMのどちらかをオプションとして選択可能であった。しかし、BTMで気液界面が多分岐境界等の固定境界を通過する際の扱いはモデル上非常に煩雑であるため、SWAC57Pバージョンでは気泡界面が仮想配管の端部に達した時点で計算を強制的に停止するようにしており、計算の可能な時間にまだ上限があった。

SWAC57Rバージョンは、SWAC57Pの計算モジュールに無液面型SGに特有な解析機能を付加し、さらに、前述したSWAC57Pでの制限事項を改良したものである。その新たに付加したモデルは、以下のとおりである。

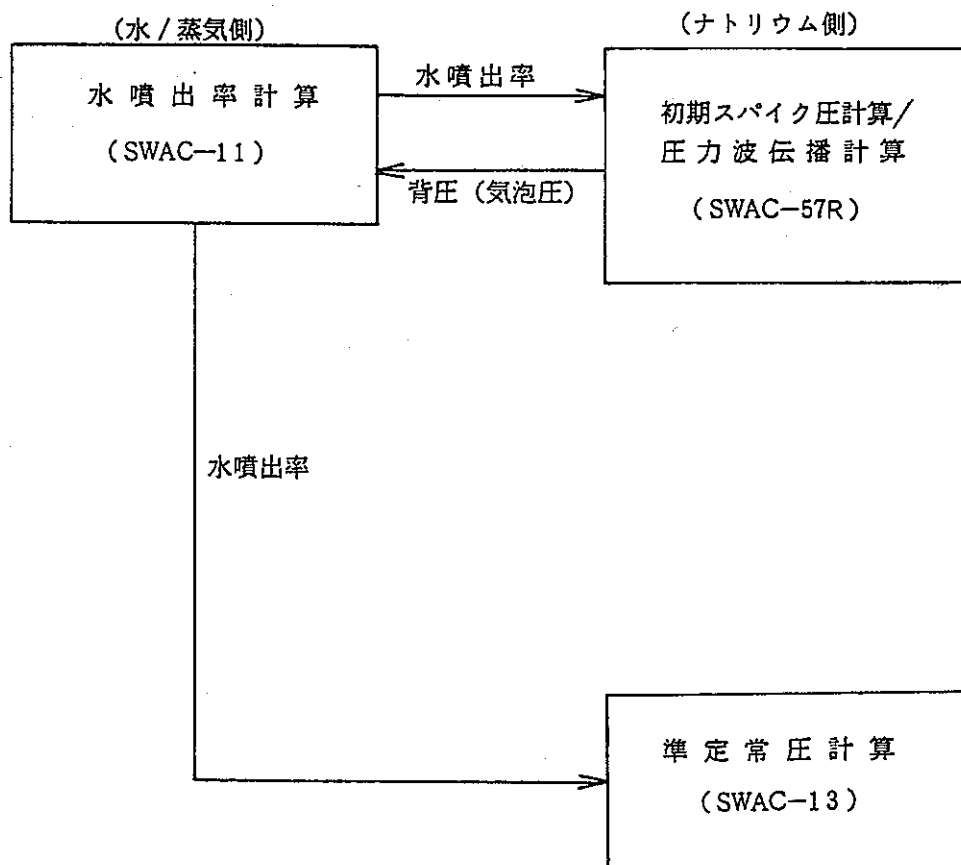
- (1)接液型RDの変形挙動を有限要素法で扱うモデル
- (2)ディスクの破裂後に圧力開放系の配管内での放出Naの流動を扱うモデル
- (3)反応部の気液界面が多分岐境界等の固定境界を通過する過程を扱うモデル

(1)では、設定圧以上の印加圧で瞬時に破裂し完全開口に至るモデルである破裂板1枚からなる従来のシングル型RDモデルを改良し、シングル及び破裂板2枚からなるダブル型RDのいずれも有限要素法を用いた弾塑性解析により、ディスクの変形挙動及び変形に伴う流体との相互作用を考慮した計算を可能とした。

(2)では、RDの破裂後に配管内を高速で移動するNaのピストン流をBTMでモデル化し、Na内を伝播する圧力波と流速を特性曲線法により時々刻々と計算することで、RD下流の圧力開放系配管内の放出Na流動の計算を可能とした。

(3)では、物理現象を忠実にモデル化するために、考慮し得る気液界面の固定境界移動パターンを摘出し、それを計算可能な様に数ケース程度まで分類・整理して計算の効率化を図った。そして、気泡界面が仮想配管の端部に達した以降の計算も継続可能とした。

以上で説明したコード改良の概要を、原子炉二次系と関連付けて図A.3に示す。図中、下が(1)のRDモデルを、左上が(2)の放出系配管モデルを、右上が(3)の気泡成長モデルを示している。



図A.1 SWACS/REG4の計算モジュール構成図

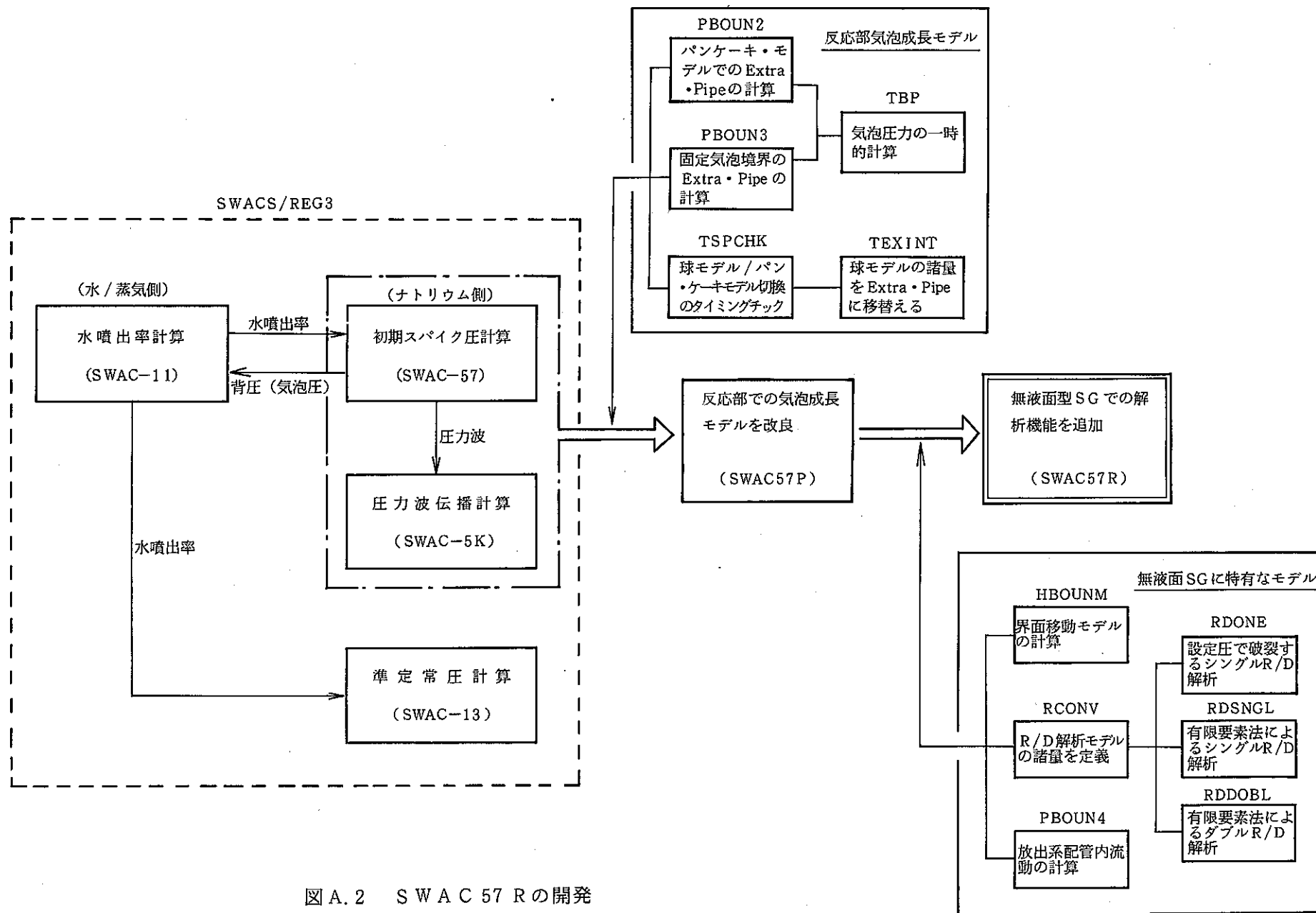
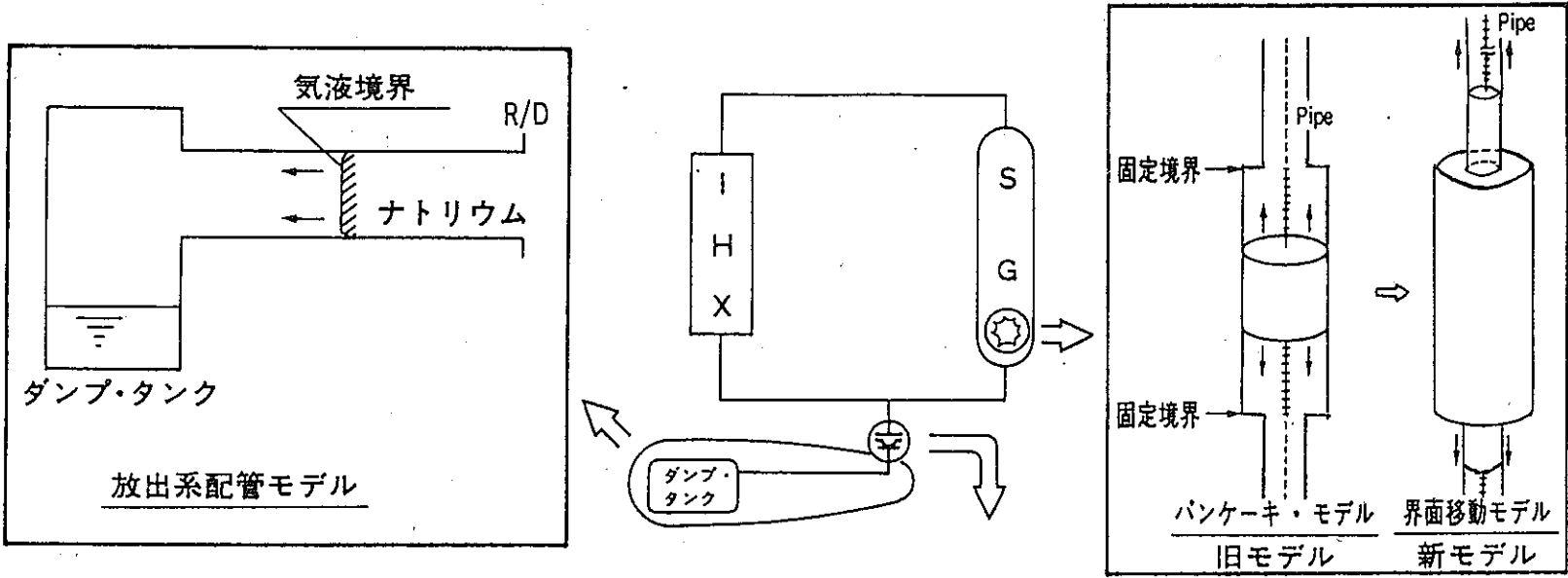


図 A.2 SWAC 57 R の開発



シングル・ラブチャディスク		ダブル・ラブチャディスク	
<p>設定圧による破裂 旧モデル</p>	<p>塑性変形による破裂 新モデル</p>	<p>塑性変形による破裂 新モデル</p>	<p>塑性変形による破裂 新モデル</p>

図 A.3 コード改良の概要

## B. SWAC57R解析用入出力データ

### B.1 入力データカードデッキ構成

SWAC57R解析用の入力データは以下の2種類のデータブロックから成る。

- (1) コントロール用のデータブロック
- (2) 初期スパイク圧/圧力波伝播計算用のデータブロック

各々のデータブロックは以下のデータで構成される。

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

整数および実数データは相対番地形式で入力する。初めのFORMAT "2I6"では、1枚のカード上での最初のデータの番地番号を"I6"で記載し、次の"I6"で1枚のカードで読み込まれるデータ数を記載する。後に続く整数データの"10I6"あるいは実数データの"5E12.5"で、2番目に記した"I6"のデータ数だけ数値を記載する。ここで記載されたデータは、計算の実行時に対応する番地にストアされる。

なお1枚のカード上では、最初の番地番号からデータの数だけ連続した番地番号でストアされるため、途中の入力番地に対応するデータがないものはブランクとするか、あるいは直前の連続番号までで区切って1枚のカードとし、新たな連続番号を別のカードで同様に続ける。特に記載されていない限りは、入力を省略したデータはゼロとみなされる。番地のデータが複数回入力された場合は、最後に入力されたデータが有効となる。

以降の説明文中で他のデータを引用する場合は次の略号を用いた。

CONT-ID	: コントロール用データ	整数データ番地
CONT-RD	: コントロール用データ	実数データ番地
ID	: 初期スパイク圧/圧力波伝播計算用データ	整数データ番地
RD	: 初期スパイク圧/圧力波伝播計算用データ	実数データ番地

## B.2 コントロールデータ

### B.2.1 コントロール整数データ

表B.1にコントロール整数データの番地、記号、及び内容を示す。

### B.2.2 コントロール実数データ

表B.2にコントロール実数データの番地、記号、内容、及び単位を示す。

### B.2.3 補足説明

コントロールデータは計算モジュールの指定ならびに入出力の指定を行うもので、どの計算モジュールを起動する場合にも必要である。計算の打ち切りは整数データ (CONT-ID6) と実数データ (CONT-RD3) で指定し、そのうち早く条件を満たされたデータが有効となる。

コントロールデータはSWACS/REG4のデータとも共用であるため、他の計算モジュール (水噴出率計算, 初期スパイク圧計算, 圧力波伝播計算, 準定常圧計算) の指定も行えるようになっている。本報告書で記載したSWAC57Rを実行する場合には、コントロールデータを"初期スパイク圧計算"の指定とする。またSWAC57Rでは、このコード自体で従来の初期スパイク圧計算及び圧力波伝播計算も実行可能である。



表B.1 コントロール整数データ (CONT-ID)

番地	記号	内 容
1	JIJCT	=1 水噴出率計算を行う。 =2 " をリスタート計算する。 =0 " を行わない。
2	JISPB	=1 初期スパイク圧計算*)を行う。 =0 " を行わない。 *)"初期スパイク圧"の指定で初期スパイク圧/圧力波伝播の計算が実施できる。これ以降のコントロールデータでは以下同様。
3	JQSTD	=1 準定常圧計算を行う。 =0 " を行わない。
4	JISPB2	=1 圧力波伝播計算を行う。 =0 " を行わない。
6 7 8	NSTEP JSTEP KSTEP	水噴出率計算と初期スパイク圧計算ステップ数 *1) 準定常圧計算ステップ数 圧力波伝播計算ステップ数  *1) 計算はCONT-ID6~8で指定するステップ数とCONT-RD2~5で指定する計算終了時刻の早い方で打ち切られる。
11 16	IOUT(i, 1) (i=1, 5) IOUT(i, 2) (i=1, 5)	水噴出率計算結果 (伝熱管内状態量) 出力コントロール*2) (リスタートデータの出力コントロールを兼ねる) *3) 水噴出率計算結果 (水噴出率) 出力コントロール*2) (水噴出率データファイルの出力コントロールを兼ねる) *4)

番地	記号	内 容
21	IOUT(i, 3) (i=1, 5)	初期スパイク圧計算結果出力コントロール*2)
26	IOUT(i, 4) (i=1, 5)	準定常圧計算結果出力コントロール*2)
31	IOUT(i, 5) (i=1, 5)	圧力波伝播計算結果出力コントロール*2)
		*2) i=1 初期プリント ステップ数 i=2 中期 " " i=3 後期 " " i=4 中期への切換ステップ i=5 後期への "
		*3) リスタートデータの有無はNTRSET(CONT-ID37)で指定。
		*4) 水噴出率データファイル(初期スパイク圧、準定常圧計算用)の出力の有無はNTWAT(CONT-ID38)で指定。
36	NTAPE	=1 初期スパイク圧計算のプロット用ファイルを作成する。 =0 " " 作成しない。
37	NTRESET	=1 水噴出率計算のリスタート用データファイルを作成する。 =0 " " 作成しない
38	NTWAT	=1 水噴出率データファイル(初期スパイク圧、準定常圧計算用) " を作成する。 =0 " 作成しない。

番地	記号	内 容
39	NTAPE2	=1 圧力波伝播計算のプロット用ファイルを作成する。 =0 " " " " を作成しない。
40	IPBACK	=1 水噴出率計算で背圧を考慮しない。 =0 " " " " 考慮する。 (水噴出率計算と初期スパイク圧計算を連動計算する)
41	ITER	水噴出率計算のリスタート計算時(JIJCT=2の時)、前回作成したリスタート用データファイルの何番目のデータよりスタートするか。(0を入力すると最後のデータが入力される)
42	NW57	=1 初期スパイク圧計算で、水噴出率データを水噴出率データファイルより入力する。(水噴出率計算時にNTWAT(CONT-ID38)=1として作成したファイル) =0 初期スパイク圧計算で水噴出率データをカードで入力する。(カード入力の場合は、初期スパイク圧計算データブロックにおいてNNIW(SWAC57-ID264)に入力点数、TIME(SWAC57-RD611)、TEMPO(SWAC57-RD711)に時間と水噴出率テーブルを入力する)
43	NW13	=1 準定常圧計算で水噴出率データファイル(水噴出率計算時にNTWAT(CONT-ID38)=1として作成したファイル)より入力する =0 準定常圧計算で水噴出率データをカードで入力する。(カード入力の場合は、準定常圧計算データブロックにおいてNWTR(SWAC13-ID901)に入力点数、TT(SWAC13-RD3121)、WTR(SWAC13-RD3141)に時間と水噴出率テーブルを入力する。)

番地	記号	内 容												
44	NP5	<p>=1,2 圧力波伝播計算で入力波を初期スパイク圧計算プロット用データファイルより入力する場合の圧力波（入力波）発生点数（初期スパイク圧計算時にNTAPE(CONT-ID36)=1として作成したファイル）</p> <p>NP5=1の場合はINPN05(CONT-ID45)に指定 NP5=2の場合はINPN05とINPNX5(CONT-ID59)に部材番号を入力</p> <p>初期スパイク圧計算の部材番号と圧力波伝播計算の圧力発生接合点番号の対応は以下の通りである。</p> <table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">初期スパイク圧計算</td> <td></td> <td style="text-align: center;">圧力波伝播計算</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">P(INPN05, 2)</td> <td style="text-align: center;">→</td> <td style="text-align: center;">P(JPWV(1))</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">P(INPNX5, 2)</td> <td style="text-align: center;">→</td> <td style="text-align: center;">P(JPWV(2))</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">部材番号</td> <td></td> <td style="text-align: center;">部材番号</td> </tr> </table> <p>=0 圧力波伝播計算で入力波をカードで入力する。</p>	初期スパイク圧計算		圧力波伝播計算	P(INPN05, 2)	→	P(JPWV(1))	P(INPNX5, 2)	→	P(JPWV(2))	部材番号		部材番号
初期スパイク圧計算		圧力波伝播計算												
P(INPN05, 2)	→	P(JPWV(1))												
P(INPNX5, 2)	→	P(JPWV(2))												
部材番号		部材番号												
45	INPN05	NP5=1,2の時、入力波の（初期スパイク圧計算時）部材番号、(NP5(CONT-ID44)の説明参照)												
46	MDAT57	NW57=1の時、ファイル上の水噴出率データ点数 (データ点数は水噴出率計算結果のプリントアウトにJTERとして示された数)												
47	MDAT13	NW13=1の時、ファイル上の水噴出率データ点数 (MDAT57と同じ)												

番地	記号	内容
48	MDAT5	NP5=1の時、ファイル上の圧力データ数 (初期スパイク圧計算結果のプリントアウトプロット用情報欄に TRANSFERED STOP NUMBERト示された数)
49	IOPT	=1 準定常圧計算時にイニシアライズの計算結果をプリントアウトする。 =0 準定常圧計算時にイニシアライズの計算結果をプリントアウトしない。
51	ISEL11	=1 水噴出率計算のプロット用ファイルを作成する。 =0 " " を作成しない。
52	ISEL13	=0 準定常圧計算のプロット用ファイルを作成する。 =1 " " を作成しない。
53	ISKIP7	≥1 初期スパイク圧計算のプロットファイルの間引きステップ間隔
54	ISKIP5	≥1 圧力波伝播計算 " "
55	ISKIP11	≥1 水噴出率計算 " "
56	ISKIP13	≥1 準定常圧計算 " "
		(間引き間隔=1で全ステップを記憶する。 " =NでNステップ毎に記憶しファイルの大きさは1/Nになる。)
58	IPRINT	=1 各プロット用データの最大、最小値をプリントアウトする =0 " " しない

番地	記号	内 容
59	INPNX5	NP5=2の時、入力波の（初期スパイク圧計算時）部材番号 （NP5(CONT-ID44)の説明参照）

表B.2 コントロール実数データ (CONT-RD)

番地	記号	内 容	単 位
1	TSTART	シミュレーション開始時刻(=0.0)	sec
2	TEIJ	水噴出率計算終了時刻	sec
3	TESP	初期スパイク圧計算終了時刻	sec
4	TEQS	準定常圧計算終了時刻	sec
5	TEPR	圧力波伝播計算終了時刻	sec

#### B.4 初期スパイク圧／圧力波伝播計算データ

##### B.4.1 整数データ

表B.3に、初期スパイク圧／圧力波伝播計算用の整数データの番地、記号、及び内容を示す。

##### B.4.2 実数データ

表B.4に、初期スパイク圧／圧力波伝播計算用の実数データ番地、記号、内容、及び単位を示す。



表B.3 初期スパイク圧／圧力波伝播計算整数データ (SWAC57R-ID)

番地	記号	内 容
1	NS	セッション数 $\leq 20$
2	NR(i) (i=1, NS)	各セッション内部材数 $\Sigma NR(i) \leq 50$
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, $\Sigma NR$ )	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, $\Sigma NR$ )	各部材分割数 $\leq 99$ (JN(i)と同順)
144	MT	サージタンクの個数 $\leq 5$
145	MR	ナトリウム中に設置されたラプチャディスクの個数 $\leq 10$
146	JT(i) (i=1, MT)	サージタンクの接合点番号
151	JR(i) (i=1, MR)	ナトリウム中に設置されたラプチャディスクの接合点番号
164	JB(i) (i=1, JBNO)	1分岐境界接合点番号 (必ずセッション端である事) JBが負(-) : 圧力一定境界 JBが正(+) : 流速一定境界

番地	記号	内 容
175	NOUT(1)	プリントアウトコントロール =0 標準プリントアウト (標準指定) =1 柱領域の全てのメッシュ点についてプリントアウト =2 球領域の全てのメッシュ点についてプリントアウト =3 柱領域、球領域の全てのメッシュ点についてプリントアウト
176	NOUT(2)	=0 標準プリントアウトを行なわない =1 標準プリントアウトを行なう (標準指定)
187	JBNO	1 分岐境界 (ID-164~173で指定した境界) の個数 $\leq 10$
201	MFS	自由液面の個数 $\leq 10$
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ディスクの個数 (MFS=MRFS) $\leq 10$
213	JRFS(i) (i=1, MRFS)	自由空間に設置したラプチャディスクの自由液面接合点番号 (JFS(i) : ID-202と一致させる)
231	NORIF	オリフィスの個数 $\leq 5$
232	JORIF(i) (i=1, NORIF)	オリフィスの接合点番号

番地	記号	内 容
237	NPWV	圧力波の発生点数 <span style="float: right;">≤ 2</span>
238	JPWV(i) (i=1, NPWV)	圧力波発生接合点番号
240	NPTM	圧力波入力的时间ステップ <span style="float: right;">≤ 50</span> (STIME(RD-426), PWAVE(RD-476, 526)の入力点数。 テープ入力の場合は0)
250	IOPT57	球モデル計算の選択 =0 球モデル計算をしない =1 球モデル計算をする (水噴出率の入力) =2 球モデル計算をする (圧力波の入力)
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) <span style="float: right;">≤ 99</span>
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、テープから入力の場合は0)
270	IOPT	キャビティ処理のオプション =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

番地	記号	内 容															
271	IOPTX	<table border="1"> <thead> <tr> <th>IOPTX</th> <th>衝突発生圧 の計算</th> <th>キャビティ発生 時刻制約</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>=0</td> <td>考慮しない</td> <td>考慮しない</td> </tr> <tr> <td>=1</td> <td>考慮する</td> <td>考慮しない</td> </tr> <tr> <td>=2</td> <td>考慮しない</td> <td>考慮する</td> </tr> <tr> <td>=3</td> <td>考慮する</td> <td>考慮する</td> </tr> </tbody> </table>	IOPTX	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
IOPTX	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	<p>反応部モデルのオプション (BTM(移動気泡境界モデル)/FBM(固定気泡境界モデル)=パンケーキモデル)</p> <p>=0 球モデルで計算する</p> <p>=1 球モデルで計算をスタートしBTMに切替える</p> <p>=2 球モデルで計算をスタートしFBMに切替える</p> <p>=-1 スタート時よりBTM</p> <p>=-2 スタート時よりFBM</p>															
273	NPEX	Extra-Pipe(=パンケーキモデル計算の柱座標)の分割数 ≤ 399															
274	KSPSW	<p>球モデルからBTM/FBMへの切替えタイミングのオプション</p> <p>=0 指定時刻 (TSPSW) で切り換える</p> <p>=1 気泡半径が球モデル半径に達すると切り換える</p> <p>=2 気泡とパンケーキの表面積が等しくなった時切り換える</p>															
275	IAPRX	<p>BTM/FBMでの特性曲線法計算時の近似の次数</p> <p>=1 1次近似</p> <p>=2 2次近似</p>															

番地	記号	内 容
277	NELE(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの要素分割数 <span style="float: right;">≤ 50</span> (1枚目ディスク: IFRD=2, 3のときのみ有効)
287	IFRD(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの解析モデルのオプション =0 SWACS/REG3での解析モデル (SWACS: 従来モデル) =1 シングル・ラプチャディスク・モデル (SWAAM-RD: 従来モデル) =2 シングル・ラプチャディスク・モデル (SWAAM-RD: 有限要素法) =3 ダブル・ラプチャディスク・モデル (SWAAM-RD: 有限要素法)
300	IRLIN(i, j) (i=1, 10) (j=1, MR)	放出系配管の部材番号 (ここで指定する配管はラプチャディスクの下流に接続されている 必要があり、その配管ではディスクの破裂後に放出ナトリウムのBTM計算が行われる。放出系配管を指定しないと、放出系は従来の大気開放モデルで計算される) IRLIN(1, 1) = 300番地 IRLIN(1, 2) = 310番地 : : IRLIN(1, 10) = 390番地
400	NELE2(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの要素分割数 <span style="float: right;">≤ 50</span> (2枚目ディスク: IFRD=3のときのみ有効)

表B.4 初期スパイク圧／圧力波伝播計算実数データ (SWAC57R-RD)

番地	記号	内 容	単 位
1	XL(i) (i=1, $\Sigma$ NR)	各部材の長さ (NRはID-2で指定)	m
51	CC(i) (i=1, $\Sigma$ NR)	各部材の音速	m/sec
101	AA(i) (i=1, $\Sigma$ NR)	各部材の流路面積	m <sup>2</sup>
151	DE(i) (i=1, $\Sigma$ NR)	各部材の等価直径	m
202	GAM	流体 (ナトリウム) の比重量	kg/m <sup>3</sup>
203	UU	流体 (ナトリウム) の動粘性係数	m <sup>2</sup> /sec
204	SR(i) (i=1, MR)	ナトリウム中に設置されたラブチャディスク の断面積 (MRはID-145で指定)	m <sup>2</sup>
214	ZR(i) (i=1, MR)	ナトリウム中に設置されたラブチャディスク の圧損係数	—
224	ST(i) (i=1, MT)	サージタンクの断面積 (MTはID-144で指定)	m <sup>2</sup>
229	SST(i) (i=1, MT)	サージタンク入口配管の断面積	m <sup>2</sup>

番地	記号	内 容	単 位
234	ZT(i) (i=1, MT)	サージタンク入口配管の圧力損失係数	—
239	PR(i) (i=1, MR)	ナトリウム中に設置されたラプチャディスクの破裂設定圧力 (IFRD(ID-287)=0, 1で有効)	kg/cm <sup>2</sup> ・a
249	HRO	開放系背圧 (ナトリウム圧力ヘッド換算)	m
250	PT	基準点の位置の圧力 ( " ) MFS(ID-201)=0の時のみ入力する	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)	—
257	ZN(i) (i=1, Σ NR)	各部材の形状圧損係数	—
307	HI(i) (i=1, 接合点数)	各接合点の高さ (MFS(ID-201)=1の時は自由液面高さを 基準点=0とする)	m
358	PG	カバーガス初期圧力	kg/cm <sup>2</sup> ・a
359	BJ(i) (i=1, JBNO)	1分岐境界条件 (圧力、または流速) JB(ID-164)が負(-) : P = CONST JB( " )が正(+) : V = CONST	圧力: m 流速: m/sec

番地	記号	内 容	単 位
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プチャディスクの 破裂設定圧力	kg/cm <sup>2</sup> ・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)	流路のオリフィス係数	-
426	STIME(i) (i=1, NPTM)	入力圧力波の時間目盛り (STIME(1)=0)	sec
476	PWAVE(i) (i=1, NPTM)	圧力波発生面1の入力圧力波 (接合点JPWV(1): ID-238に対応)	kg/cm <sup>2</sup> ・a
526	PWAVE(i) (i= 51, NPTM+50)	圧力波発生面2入力圧力波 (接合点JPWV(2): ID-239に対応)	kg/cm <sup>2</sup> ・a
601	FBB	1モルの水から発生するH <sub>2</sub> のモル数	mol/mol
602	XR	球モデルの等価半径	m



番地	記号	内 容	単 位
603	BPI	気泡の初期圧力	kg/cm <sup>2</sup> ・a
604	VT	気泡温度	°C
605	BRI	気泡の初期半径	m
606	RTRI	タイムメッシュを決めるパラメータ $\Delta t = \Delta XR/CC/RTRI$ (RTRI ≥ 1.0)	—
607	GGG	重力加速度	m/sec <sup>2</sup>
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(ID-264)=0の時は入力不要)	sec
711	TEMPO(i) (i=1, NNIW)	TIMEに対応する水噴出率 (NNIW(ID-264)=0の時は入力不要)	kg/sec
900	PSAT	キャビティ発生圧力	kg/cm <sup>2</sup> ・a
901	TSPSW	KSPSW(ID-274)=0の場合の切り換え時刻	sec
902	TBUR	接液型ラプチャディスクの破裂設定時刻 (IFRD(ID-287)=0,1のときのみ有効) TBURが負(-)かゼロ：圧力PRで破裂 TBURが正(+):時刻TBURで破裂	sec

番地	記号	内 容	単 位
905	QRAD(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの曲率半径 (1枚目ディスク: IFRD=2, 3のとき有効)	m
1005	QDIA(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの直径 (1枚目ディスク: IFRD=2, 3のとき有効)	m
1015	QTH(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの厚さ (1枚目ディスク: IFRD=2, 3のとき有効)	mm
1025	QYM(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクのヤング率 (1枚目ディスク: IFRD=2, 3のとき有効)	kg/mm <sup>2</sup>
1035	QPR(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクのポアソン比 (1枚目ディスク: IFRD=2, 3のとき有効)	-
1045	QEP(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの接線係数 (1枚目ディスク: IFRD=2, 3のとき有効)	kg/mm <sup>2</sup>
1055	QGAM(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの密度 (1枚目ディスク: IFRD=2, 3のとき有効)	kg/m <sup>3</sup>
1065	WMAX(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの最大変位 (1枚目ディスク: IFRD=2, 3のとき有効)	m
1075	QSY(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの設計降伏点 (1枚目ディスク: IFRD=2, 3のとき有効)	kg/mm <sup>2</sup>

番地	記号	内 容	単 位
1085	QSU(i) (i=1, MR)	接液型ラブチャディスクの設計引張り強さ (1枚目ディスク: IFRD=2, 3のとき有効)	kg/mm <sup>2</sup>
1100	GTEMP(i) (i=1, MR)	ラブチャディスク下流に接続された 放出系内のガス温度	°C
1110	PPGAS(i) (i=1, MR)	ラブチャディスク下流に接続された 放出系内のガス圧力	kg/cm <sup>2</sup> ・a
1120	VDUMP(i) (i=1, MR)	ラブチャディスク下流に接続された ダンプタンクのガス体積	m <sup>3</sup>
1130	QRAD2(i) (i=1, MR)	接液型ラブチャディスクの曲率半径 (2枚目ディスク: IFRD=3のとき有効)	m
1140	QDIA2(i) (i=1, MR)	接液型ラブチャディスクの直径 (2枚目ディスク: IFRD=3のとき有効)	m
1150	QTH2(i) (i=1, MR)	接液型ラブチャディスクの厚さ (2枚目ディスク: IFRD=3のとき有効)	mm
1160	QYM2(i) (i=1, MR)	接液型ラブチャディスクのヤング率 (2枚目ディスク: IFRD=3のとき有効)	kg/mm <sup>2</sup>
1170	QPR2(i) (i=1, MR)	接液型ラブチャディスクのポアソン比 (2枚目ディスク: IFRD=3のとき有効)	—

番地	記号	内 容	単 位
1180	QBP2(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの接線係数 (2枚目ディスク: IFRD=3のとき有効)	kg/mm <sup>2</sup>
1190	QGAM2(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの密度 (2枚目ディスク: IFRD=3のとき有効)	kg/m <sup>3</sup>
1200	WMAX2(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの最大変位 (2枚目ディスク: IFRD=3のとき有効)	m
1210	QSY2(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの設計降伏点 (2枚目ディスク: IFRD=3のとき有効)	kg/mm <sup>2</sup>
1220	QSU2(i) (i=1, MR)	接液型ラプチャディスクの設計引張り強さ (2枚目ディスク: IFRD=3のとき有効)	kg/mm <sup>2</sup>
1230	PBACK1(i) (i=1, MR)	1枚目と2枚目のラプチャディスク間の ガス圧力 (IFRD=3のとき有効)	kg/cm <sup>2</sup> ・a
1240	PBACK2(i) (i=1, MR)	2枚目のラプチャディスク下流の背圧 (2枚目ディスク: IFRD=3のとき有効)	kg/cm <sup>2</sup> ・a
1250	VRDUB(i) (i=1, MR)	1枚目と2枚目のラプチャディスク間の ガスボリューム (IFRD=3のとき有効)	m <sup>3</sup>
1260	GRDUB(i) (i=1, MR)	1枚目と2枚目のラプチャディスク間の ガス比熱比 (≒1.67: IFRD=3のとき有効)	—

番地	記号	内 容	単 位
1270	TOPN(i) (i=1, MR)	1 枚目ディスクの破裂時のギャップタイム (AINL(i)~AFIN(i)までの時間間隔：IFRD=3 のとき有効)	sec
1280	AINL(i) (i=1, MR)	1 枚目ディスクがナイフ先端に達した時刻で のディスクの初期開口度(面積割合) (IFRD=3のとき有効)	—
1290	AFIN(i) (i=1, MR)	1 枚目ディスク破裂後の最終的なディスクの 開口度(面積割合) (IFRD=3のとき有効)	—
1300	GAR(i) (i=1, MR)	1 枚目ディスク破裂後の開口度(面積割合)の 過渡的変化を表わすパラメータ (弁開度特性の式の乗数：IFRD=3のとき有効)	—
1310	GVE(i) (i=1, MR)	1 枚目ディスク破裂後のディスク変形速度の 過渡的変化を表わすパラメータ (IFRD=3のとき有効)	—

### B.4.3 補足説明

#### B.4.3-1 計算モデル

##### (1) 計算モデルの特徴

###### (i) 反応部

反応部の気泡およびそれを取りまくナトリウムは、一次元の球座標系（球モデル）で扱う。ナトリウム球の大きさ、初期気泡条件（半径、圧力、温度）は入力データで指定する。気泡が成長しその半径がSGベッセルの半径と等しくなると、特別に設けた一次元の直線座標系である仮想配管（Extra-pipe）部へ気泡体積が保存されるよう内挿近似して移され、その後はこの仮想配管で計算を継続する。

なお圧力波伝播計算の場合には、事故SGの入口／出口ノズル部の圧力時間変化は初期スパイク圧計算結果あるいは実験測定値として既に得られているものとし、時間関数として入力で与え境界条件として扱う。

###### (ii) 流路

SG内の各流路及び2次冷却系の機器、配管は一次元の直線座標系（柱モデル）で扱う。

###### (iii) 境界条件

計算モデルで考慮できる境界条件は一分岐（圧力または流速一定）境界、自由液面境界、サージタンク接合点、オリフィス接合点、ナトリウム中のラプチャディスク境界（あるいはダンプタンク接合点）である。

###### (iv) ラプチャディスク

ラプチャディスクはカバーガス設置型の他に接液型も扱え、接液型にはシングル及びダブル型が選択できる。

###### (v) 放出系配管

接液型のラプチャディスクが破裂した以降は、放出系として指定した配管内の計算を気泡界面の移動を考慮したBTMで扱うことが可能である。

(2) 計算モデルの定義

以下に入力データで用いられるモデル上の用語の定義を説明する。

2-1) 柱モデル

計算体系を部材（断面積一定の配管）と接合点（圧力、流速の評価点）で構成されるネットワークにモデル化する。

(i) セクション (Section)

1分岐境界、自由液面境界、多分岐境界、接液型ラプチャディスク境界（あるいはダンプタンク境界）で挟まれた流路を1つのセクションと定義する。

(ii) 部材 (Member)

1つのセッション内で次のような場合部材として分割する。

- ① 流路断面積が変化する場合
- ② 音速が変化する場合
- ③ ザージタンク、ナトリウム中ラプチャディスク、オリフィスがある場合
- ④ 形状圧損がある場合

なお、初期スパイク圧計算／圧力波伝播計算では、計算結果（圧力、流速）を部材両端（=接合点）ごとに出力する。従って特定の位置（例えば実験測定位置）について計算結果を出力したい場合は上述の定義に関係なく部材として分割する必要がある。

(iii) 接合点 (Member)

1つの部材の両端を接合点と定義する。すなわち接合点はセッションの端を含めて計算上のすべての境界条件を指定する点となる。入力データにより部材番号で指定するものと、接合点番号で指定するものがあるので注意が必要である。

(iv) 部材内分割数

各々の部材は、更に最大99分割までの計算メッシュ巾（ $\Delta x$ ）に分割でき、（部材長さ）／（部材内分割数）が数値計算上の空間メッシュ巾となる。

## 2-2) 球モデル

球モデルは、上半球と下半球に分けて各々計算する。各々の半球は中心に気泡が存在すると仮定し、そのまわりをナトリウムが囲んでいるモデルを考える。球モデル部の計算メッシュ巾 ( $\Delta R$ ) は (球モデル半径 - 初期気泡半径) / (球モデル分割数) となる。

## 2-3) パンケーキモデル

従来モデルでは、ナトリウム-水反応時に発生する水素ガス気泡を球形 (上半球と下半球に分離して考えてその2つの半球を重ねた形) で扱い、その周囲のナトリウム領域も球座標系で扱っていた。気泡が成長しその半径が大きくなると、特別に設けた一次元の直線座標系である仮想配管 (Extra-pipe) 部へ物理量が移され、その後はこの仮想配管で計算を継続する。この仮想配管部での計算をパンケーキモデルと呼び、球モデルからパンケーキ形の気泡と直線座標系のナトリウムに切り換えて扱うことで、計算時間領域の拡大を計ったものである。

パンケーキモデルでの初期スパイク圧計算には以下で説明するFBMとBTMがオプションで選択できる。

## (i) 固定気泡境界モデル (FBM)

固定気泡境界モデルは、境界の移動を簡易的に扱う計算法 (境界の移動を計算しない) で、気泡が成長して界面の位置が初期反応点より遠くなっても計算上は気泡界面が初期反応点に定在しているかのように取り扱うものである。このモデルは、「液柱分離計算モデル」などでも使用されている。FBM計算は簡易モデルであるため誤差が累積しやすく長時間領域の計算にはあまり適していないと考える。

## (ii) 移動気泡境界モデル (BTM)

移動気泡境界モデルは、境界の移動を厳密に扱う計算法 (境界の移動を考慮した圧力波伝播を扱う計算法) である。そのため、FBMに比べ計算は複雑になるが、誤差の蓄積は少なくなると考えられる。このモデルは、従来の気泡成長モデルで用いていた計算法と内容的にはほぼ同じである。



(iii)球モデルからパンケーキモデルの切り換え

球モデルからパンケーキモデルへの切り換えオプションには、MODBUB(ID-272)とKSPSW(ID-274)があり、以下の4通りが可能である。

- (a)計算の開始時刻よりBTM/FBMで計算する。
- (b)指定時刻TSPSW(RD-901)で切り換える。
- (c)球座標中で気泡境界が最大球モデルメッシュに達した時刻で切り換える。
- (d)気泡表面積が、切り換え後のパンケーキ表面積と等しくなった時刻で切り換える。

このうち(b)と(d)を選択した場合、プログラムの計算時に(c)についても自動的にチェックを行い、(c)の条件が優先されて切り換わる。

(3) モデル作成上の制約

以下にモデル作成時の制約事項を述べる。

- 1)最大セクション数NS(ID-1)は20である。
- 2)部材数は全体系の総数が50である。
- 3)部材、接合点の番号付けは球モデルを含むチャンネル(破断チャンネル)の上端から下方に向かって順につける。分岐以降の他チャンネルの番号付けは任意である。
- 4)部材内及び球領域の最大分割数は99である。
- 5)Extra-Pipeの最大分割数NPEX(ID-273)は399である。
- 6)1分岐境界, 自由液面境界, サージタンク境界, ナトリウム中ラプチャディスク境界の最大数は10である。
- 7)オリフィス境界の最大数は5である。
- 8)放出系配管の最大数は10である。
- 9)パンケーキ部に1分岐境界または3分岐境界があってはならない。また、パンケーキ部の断面積は球領域に隣接した上下の柱領域の断面積と等しくなくてはならない。
- 10)放出系配管を指定(ID-300)する場合には、接液型ラプチャディスクの下流側に向い連続した配管の番号を指定する。また放出系配管の上流側配管の長さは、放出系配管のメッシュ間隔の3倍以上の長さで、音速、流路断面積等価直径が等しくなるようにする。

## B.4.3-2 計算条件

## (1) 初期条件

初期スパイク圧計算では、初期条件として反応点の気泡の初期半径、初期圧力を入力で与える必要がある。また、気泡の温度についても定数として入力で与える。気泡の初期半径、初期圧力の与え方は任意であるが通常、初期半径は破断伝熱管の内半径相当、初期圧力はナトリウム中の破断位置初期圧力をとる。

圧力波伝播計算では、各接合点及び部材内の圧力は、基準となるカバーガス圧力よりナトリウムのヘッド差を差し引いた圧力に設定される。また、初期ナトリウム流速は考慮せず、ゼロである。

## (2) 境界条件

初期スパイク圧／圧力波伝播計算で扱われる境界条件ならびに計算に必要な入力データをまとめて表B.5に示す。以下では、今回変更になった主な境界条件の計算上の扱いについてのみ説明する。

## (i) 圧力一定境界と盲端境界

- (a) 流路の端は1分岐境界（圧力一定、盲端）、自由液面境界、接液型ラプチャディスク境界（あるいはダンプタンク接合点境界）、圧力源境界のいずれかでなくてはならない。
- (b) 1分岐境界は圧力一定境界あるいは盲端（流速一定=0m/sec）とする。
- (c) 1分岐境界はその接合点番号をJB(ID-164)で指定する。その際、圧力一定境界の場合は接合点番号に負の符号を付ける。
- (d) 境界条件はBJ(RD-359)に入力する。その際、圧力一定境界の場合の入力値は静圧（ヘッド）(m)単位で入力する。
- (e) 放出系配管を指定した場合、その下流側の境界条件はプログラム内で自動的にダンプタンク接続点として考慮される。

(ii) ナトリウム中ラプチャディスク境界

(a) 設定圧破裂型ラプチャディスク (IFRD(ID-287)=0,1の場合)

ラプチャディスク破裂前は、特別な計算は行わない。ラプチャディスク接合点の圧力が破裂設定圧PR(RD-239)を越えた後は自動的に大気開放モデルあるいは放出系配管との2分岐境界モデルで計算される。

(b) 最大変位破裂型ラプチャディスク

(1) シングル型 (IFRD(ID-287)=2の場合)

1枚のラプチャディスクについて、ナトリウムとディスクの相互作用を考慮した圧力波伝播解析を行う。その際、流体の状態を考慮し、ディスクの変形を有限要素法により弾塑性解析する。

流体/ディスクの相互作用を計算する時には圧力(P)と変位速度(V)は未知のため、両者を求めるときには、繰り返し計算により上式を満足するPとVの組合せとして解を求める。そしてラ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、ラプチャディスクは完全開口する。

このモデルはIFRD(ID-287)で2を選択する。ラプチャディスク要素分割数: NELE(ID-277)は、ラプチャディスクを1次元化した時の空間メッシュの分割数/2であり、以下の設定も行う必要がある。

- ・ラプチャディスク曲率半径(RD-905)
- ・ラプチャディスクの直径(RD-1005)
- ・ラプチャディスクの厚さ(RD-1015)
- ・ヤング率(RD-1025)
- ・ポアソン比(RD-1035)
- ・ラプチャディスクの接線係数(RD-1045) (設定しなくてもよい)
- ・ラプチャディスクの密度(RD-1055)
- ・ラプチャディスクの最大変位(RD-1065)
- ・ラプチャディスクの設計降伏点(RD-1075)
- ・ラプチャディスクの設計引張り強さ(RD-1085)

## (2)ダブル型 (IFRD(ID-287)=3の場合)

ダブルラプチャディスクは、ディスク間の空間をガスで満たした2枚のラプチャディスクで構成されている。1枚目ディスク(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、前項のシングルラ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瞬時に完全開口する。

コード上は、ラプチャディスク接合点に2枚のラプチャディスクとガス空間を模擬しているため、ディスク間に新たなパイプを設ける必要はない。ラプチャディスク解析コードの選択パラメータIFRD(ID-287)で3を選択する。1枚目ラプチャディスク要素分割数NELE(ID-277)、2枚目ラプチャディスク要素分割数NELE2(ID-400)は、ラプチャディスクを1次元化した時の空間メッシュの分割数/2であり、以下の設定も行う必要がある。

## ① 1枚目ラプチャディスク

- ・上記(1)項のシングル型と同様なのでここでは省略する。

## ② 2枚目ラプチャディスク

- ・ラプチャディスク曲率半径(RD-1130)
- ・ラプチャディスクの直径(RD-1140)
- ・ラプチャディスクの厚さ(RD-1150)
- ・ヤング率(RD-1160)
- ・ポアソン比(RD-1170)
- ・ラプチャディスクの接線係数(RD-1180) (設定しなくてもよい。)
- ・ラプチャディスクの密度(RD-1190)
- ・ラプチャディスクの最大変位(RD-1200)
- ・ラプチャディスクの設計降伏点(RD-1210)
- ・ラプチャディスクの設計引張り強さ(RD-1220)
- ・ラプチャディスク間のガス圧力(RD-1230)

- ・ 2 枚目ラプチャディスク後の背圧 (RD-1240)
- ・ ラプチャディスク間のガスボリウム (RD-1250)
- ・ ラプチャディスク間のガス比熱比 (RD-1260)
- ・ 破裂のギャップタイム (RD-1270)
  - ( 1 枚目ラプチャディスクが破裂してから完全に開ききるまでの時間)
- ・ 初期状態でのラプチャディスク開口度 (RD-1280)
  - ( 閉じている : =0.0、100%開口 : =1.0)
- ・ 破裂後のラプチャディスク開口度 (RD-1290)
  - ( 閉じている : =0.0、100%開口 : =1.0)
- ・ 破裂後の開口度変化のパラメータ (RD-1300)
- ・ 破裂後の流速変化のパラメータ (RD-1310)

### (3) 放出系配管モデル

放出系配管の解析モデルには、反応部でのパンケーキモデルと同じ B T M を用いて配管内の計算を行う。その際、ラプチャディスクの破裂直後には、放出系配管の接続点にナトリウム界面が位置しているものと考えて計算を開始するため、気液界面がラプチャディスク部近辺に位置しているときの配管内 B T M 計算時には、気泡界面及び界面近傍の配管内のノード点を上流側配管のディスクに近い側のノード数点 ( 3 点以内 ) の圧力と流速から内挿近似して計算する。よって、放出系の上流側配管の長さは放出系配管の 3 メッシュ分以上の長さとし、放出系とその上流配管は部材音速、流路面積、等価直径を同じとする必要がある。

また、放出系配管の下流側には、ダンプタンクが接続されているものとして計算を行う。そのため、時間とともに移動する界面の圧力は、放出系へのナトリウムの流入により次第に断熱膨張するガス圧の変化を受ける。

解析では、シングル型及びダブル型のラプチャディスクの下流側に接続した配管に対して IRLIN (ID-300) の放出系配管部材番号 ( 1 部材のみ ) を指定する。

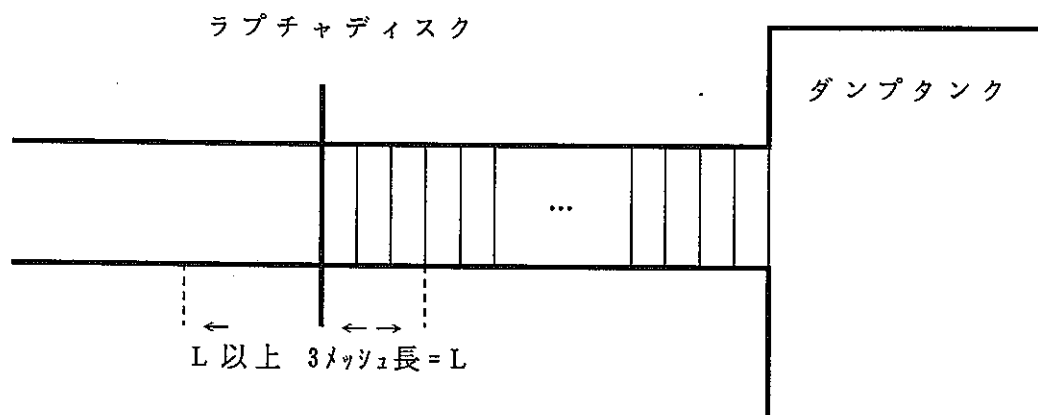
例) IRLIN(300)=12 .. ラプチャディスク番号 1 の放出系配管部材番号 12  
 IRLIN(310)=24 .. ラプチャディスク番号 2 の放出系配管部材番号 24  
 : .. 最大 10 個まで

さらに、実数データとして以下の項目を指定する。

- ・ 放出系のガス温度 (RD-1100)
- ・ 放出系のガス圧力 (RD-1110)
- ・ ダンプタンクのガス体積 (RD-1120)

なお、注意事項として以下の制限がある。

- ① モデル上、ラプチャディスク下流には 1 つの放出系配管とその出口にダンプタンクが接続されており、そのダンプタンクのガス体積を VDUMP (RD-1120) に与える。
- ② 放出系配管の流路面積、等価直径及び音速は、そのラプチャディスクの上流側配管と同じにする。
- ③ 上流側配管の長さは、放出系配管のメッシュ間隔の 3 倍以上となるようにする。
- ④ 接合点及び部材の番号は、上流から下流 (ナトリウム放出方向) へ連続して付ける。



B.5 初期スパイク圧計算／圧力波伝播計算の境界条件

No	境界条件	指定入力データ
1	反応部気泡境界	<p>IOPT57(ID-250)=1</p> <hr/> <p>(気泡条件)</p> <p>FBB (RD-601) ..... モル転換比</p> <p>BPI (RD-603) ..... 初期圧力</p> <p>VT (RD-604) ..... 温度</p> <p>BRI (RD-605) ..... 初期半径</p> <hr/> <p>(球モデル条件)</p> <p>JJNH (ID-261) ..... 中心接合点番号</p> <p>JJSP (ID-262) ..... 両端接合点番号</p> <p>NNSP (ID-263) ..... 分割数</p> <p>XR (RD-602) ..... 半径</p> <p>CCCP (RD-610) ..... 音速</p> <hr/> <p>(パンケーキモデル)</p> <p>NPEX (ID-273) ..... 分割数</p> <p>KSPSW (ID-274) ..... 切り換え</p> <p>TSPSW (RD-901) ..... 切り換え時刻</p> <hr/> <p>(水噴出率)</p> <p>NNIW (ID-264) ..... テーブル点数</p> <p>TIME (RD-611) ..... 時刻</p> <p>TEMPO (RD-711) ..... 水噴出率</p>

No	境界条件	指定入力データ
2	圧力源境界 (圧力波伝播計算)	(初期スパイク圧計算結果ファイルを用いる場合)  NPS (CONT-ID44)=1 or 2 INPN05 (CONT-ID45) ..... 入力部材番号 INPNX5 (CONT-ID59) ..... 入力部材番号 MDAT5 (CONT-ID48) ..... 入力データ数 NPWV (ID-237) ..... 境界接合点数 JPWV (ID-238) ..... 境界接合点番号 (入力データカードで圧力波を入力する場合) NP5 (CONT-ID44)=0 NPWV (ID-237) ..... 境界接合点数 JPWV (ID-238) ..... 境界接合点番号 NPTM (ID-240) ..... テーブル点数 STIME (RD-426) ..... 時刻 PWAVE (RD-476, 526) .. 圧力
3	圧力一定境界	JBNO (ID-187) ..... 個数 *) JB (ID-164) ..... 接合点番号 BJ (RD-359) ..... 圧力値
4	盲端 (流速一定境界)	JBNO (ID-187) ..... 個数 *) JB (ID-164) ..... 接合点番号 BJ (RD-359) ..... 流速値 (=0.0)

\*)JBNOは一分岐点の個数で圧力一定境界個数と盲端(流速一定)境界個数の和である。



No	境界条件	指定入力データ
5	自由液面境界	<p>MFS (ID-201) ..... 個数</p> <p>JFS (ID-202) ..... 接合点番号</p> <p>HFS (RD-391) ..... 自由空間長さ</p> <p>AKAPA (RD-401) ..... 入力部材番号</p> <p>PG (RD-358) ..... 入力部材番号</p> <hr/> <p>(カバーガス中ラプチャディスク)</p> <p>MRFS (ID-212) ..... 個数=MFS</p> <p>JRFS (ID-213) ..... 接合点番号=JFS</p> <p>PRFS (RD-402) ..... 破裂圧</p> <p>ZFS (RD-412) ..... 圧損係数</p> <p>HRO (RD-249) ..... 開放系背圧</p>
6	サージタンク接合点	<p>MT (ID-144) ..... 個数</p> <p>JT (ID-146) ..... 接合点番号</p> <p>ST (RD-224) ..... タンク断面積</p> <p>SST (RD-229) ..... 入口配管断面積</p> <p>ZT (RD-234) ..... 圧損係数</p>
7	ナトリウム中 ラプチャディスク	<p>MR (ID-145) ..... 個数</p> <p>JR (ID-151) ..... 接合点番号</p> <p>SR (RD-204) ..... 断面積</p> <p>ZR (RD-214) ..... 圧損係数</p> <p>PR (RD-239) ..... 破裂圧</p> <p>HRO (RD-249) ..... 開放系背圧</p>

No	境界条件	指定入力データ
7		(シングルラプチャディスク、1枚目) NELE (ID-277) ..... 要素分割数 QRAD (RD-905) ..... 曲率半径 QDIA (RD-1005) ..... 直径 QTH (RD-1015) ..... 厚さ QYM (RD-1025) ..... ヤング率 QPR (RD-1035) ..... ポアソン比 QEP (ID-1045) ..... 接線係数 QGAM (ID-1055) ..... 密度 WMAX (RD-1065) ..... 最大変位 QSY (RD-1075) ..... 設計降伏点 QSU (RD-1085) ..... 引張り強さ
		(2枚目ラプチャディスク) NELE2 (ID-400) ..... 要素分割数 QRAD2 (RD-1130) ..... 曲率半径 QDIA2 (RD-1140) ..... 直径 QTH2 (RD-1150) ..... 厚さ QYM2 (RD-1160) ..... ヤング率 QPR2 (RD-1170) ..... ポアソン比 QEP2 (ID-1180) ..... 接線係数 QGAM2 (ID-1190) ..... 密度 WMAX2 (RD-1200) ..... 最大変位 QSY2 (RD-1210) ..... 設計降伏点 QSU2 (RD-1220) ..... 引張り強さ

No	境界条件	指定入力データ
7		PBACK1 (ID-1230) ..... ガス圧力 PBACK2 (RD-1240) ..... 背圧 VRDUB (RD-1250) ..... ガス体積 GRDUB (RD-1260) ..... ガス比熱比 TOPEN (RD-1270) ..... ギャップタイム AINL (RD-1280) ..... 初期開口度 AFIN (RD-1290) ..... 破裂後開口度 GAR (RD-1300) ..... 開口度変化パラメータ GVE (RD-1310) ..... 速度パラメータ
8	オリフィス接合点	NORIF (ID-231) ..... 個数 JORIF (ID-232) ..... 接合点番号 AORIF (RD-421) ..... オリフィス係数
9	放出系配管	IRLIN (ID-300) ..... 配管番号 GTEMP (RD-1100) ..... ガス温度 PPGAS (RD-1110) ..... ガス圧力 VDUMP (RD-1120) ..... ダンプタンクガス体積

## B.4.3-3 計算メッシュ巾

数値計算に使用される空間メッシュ巾および時間メッシュ巾は各々次のように決める。

(1)空間メッシュ巾 ( $\Delta X$ 、 $\Delta R$ )

柱モデル部については、次のように設定される。

$$\Delta X_i = X L (i) / N N (i)$$

ただし、  
 $\Delta X_i$  : 部材*i*の空間メッシュ巾 (m)  
 $X L (i)$  : 部材*i*の長さ (RD-602)  
 $N N (i)$  : 部材*i*の分割数 (RD-92)

球モデル部については、次のように設定される。

$$\Delta R = (X R - B R I) / N N S P$$

ただし、  
 $\Delta R$  : 球モデル部の空間メッシュ巾 (m)  
 $X R$  : 球モデル部の半径 (RD-602) (m)  
 $B R I$  : 初期気泡半径 (RD-603) (m)  
 $N N S P$  : 球モデル部の分割数 (RD-263)

(2)時間ステップ ( $\Delta t$ )

時間ステップ巾は次式のCourant条件よりプログラム内で処理決定される。

$$\Delta t = | \Delta X_i (\text{or } \Delta R) / (C_i \cdot RTRI) |_{\min}$$

ここで、 $\Delta X_i$ 、 $\Delta R$ は(1)で述べた空間メッシュ巾(m)、 $C_i$ は対応する音速(m/sec)、 $RTRI$ は入力(RD-606)で与える係数で通常1.0とする。

## B.5 入出力ファイル

### B.5.1 概要

SWAC57Rではカード入力(U05)、プリンター(U06)以外にいくつかの入出力を使用する。これらのデータファイルは以下の2つに分類される。

プロッタ用データファイルは計算結果(諸量VS時間)をプロッタプログラムを使用して図示するためのデータファイルであり、U09,U10,U90に出力されるが、U9とU10の出力については、どちらか一方を指定すればよい。なお、プロッタプログラムの詳細についてはAPPENDIX-Cに示す。

テーブルファイルは、各モジュール間の計算の引継を行うためのデータファイルで、水噴出率テーブル、あるいは初期スパイク圧計算の圧力波テーブル(プロッタ用ファイルを兼ねている)をさす。

### B.5.2 プロッタ用データファイル

プロッタ用のデータファイルはコントロールデータで出力の有無を指定する。出力ユニット番号と指定入力データをまとめて表B.6に示す。

### B.5.3 テーブルデータファイル

テーブルデータファイルは各計算モジュールのデータの引渡しを行うもので水噴出率テーブルと圧力波テーブルの2種類使用することができる。コントロールに必要なデータを表B.6にまとめた。

#### (1)水噴出率テーブル

水噴出率計算を実行した際に作成し、その内容は各時刻での水噴出率(kg/cm<sup>2</sup>)である。このデータファイルは入力データとして使用することができる。

#### (2)圧力波テーブル

圧力波テーブルは圧力波伝播計算における圧力発生点(圧力既知境界)の圧力時間変化のテーブルを指し通常、事故SGのナトリウム入口/出口ノズル部の圧力を用いる。これには初期スパイク圧計算の計算結果を用いることもできる。ファイルとしては、プロッタ用データファイルを共用して圧力波伝播計算のイニシアライズ時にそのファイルより圧力波テーブルを作成する。

表B.6 入出力ユニットと指定データ

ユニット番号	入出力	説明	入出力時の指定	出力時のステップ間隔
U5	入力	カード入力	必須	—
U6	出力	プリンタ出力	IOUT (CONT-ID21 or CONT-ID31)	IOUT (CONT-ID16)
U9	出力	圧力波伝播計算の プロッター出力	NTAPE2 (CONT-ID39)	ISKIP5 (CONT-ID54)
U10	入力	初期スパイク圧計算の プロッター出力ファイル を圧力波テーブルと して入力	NP5 (CONT-ID44) INPN05 (CONT-ID45) MDAT5 (CONT-ID48) INPNX5 (CONT-ID59) INPNO (ID-44)	—
	出力	初期スパイク圧計算の プロッター出力	NTAPE (CONT-ID36)	ISKIP7 (CONT-ID53)
U15	入力	水噴出率計算結果のテ ーブルファイルを入力	NW57 (CONT-ID42) MDAT57 (CONT-ID46) NNIW (ID-264)	—
U90	出力	ラプチャディスク変形 挙動のプロッター出力	IFRD (ID-287)	ISKIP7 (CONT-ID53)

## C. プロッタプログラム

### C.1 概要

コードの計算結果を図示するためにSWACS.PLOTが用意されている。これは、CALCOMPプロッタ用に作成されたもので、横軸を時間に任意のスケールで圧力や流速等の計算結果をプロットでき、また、プログラムをCALCOMP以外の他の標準的なプロッタ用に変換することも容易である。出力形式は、従来と同様な形式-1と1枚のプロット用紙に10枚の図示が可能な形式-2の2種類が用意されている。図の重ね書きについては、その本数 $n$ に制約はなく、太さの異なる5種類の線種を順次使用するが、 $n$ が大きくなると、最初の線種に戻り再度繰り返す。コードでの計算結果と実験データ(X-Yデータ)を同時に図示する機能も用意されている。

### C.2 入出力手続き

プロットプログラムのコントロールデータはFT05F001で入力し、プリントアウトはFT06F001で出力する。プロッタ用データファイルは任意の番号で入力するが、FT05F001, FT06F001は使用できない。(後述するように、初期スパイク圧/圧力波伝播(SWAC57R)の計算結果の場合のデータファイルについてのみ、FT60F001~FT69F001あるいはFT90F001を使用するものとする)

入力データは、コードの実行で作成されたプロッタ用データファイルまたは実験データのテーブルファイルであり、ファイルは磁気テープ(MT)上、あるいはディスク上に保存されているものとする。SWACS.PLOTによりプロッタをオフラインで作動させるか、オンラインとするかは計算機システムにより異なる。

### C.3 プロット形式

#### C.3.1 プロット形式-1

図C.1にプロット形式-1の例を示す。タイトル文字はグラフの上部あるいは下部に書くことができる。

#### C.3.2 プロット形式-2

図C.2にプロット形式-2の例を示す。ここでは、タイトル文字はすべてグラフ内上部に固定である。この形式の場合には、グラフの枚数は10枚以内で、入力データの順に左下から右上に順次グラフが書かれる。

なお、C.3.1, C.3.2の出力例では以下のような指定となる。

- ① 共通タイトル : カード入力
- ② グラフタイトル : カード入力
- ③ Y軸タイトル : プログラムが選択
- ④ X軸タイトル : "TIME (SEC)"に固定

### C.4 コントロールデータ・カードデックの構成

コントロールデータのカードデックは、整数カードとモジュールカードから成る。整数カードは、コントロールカードの最初に必ず入力する必要があり、モジュールカードは必要の数だけ入力する。1つのモジュールが、1枚のグラフに対応する。各モジュールカードの区切れは、ゼロを入力した1枚のモジュール終了カードで識別する。以下では、整数カードとモジュールカードの説明をする。



C.4.1 整数カード

(1) 諸量を出力する整数カード(I)

通常のプロット用の整数カードで、データカードデッキの最初に入れる。  
そのデータ形式を以下に示す。

COM1.							(A80)
XLENG	YLENG	IPTYPE	IPRINT	ITTY	IGRID	ICASE	(2E12.5, 516)

- COM1 : データカードのタイトル (非実行文)
- XLENG : X軸の長さ (cm)
- YLENG : Y軸の長さ (cm)
- IPTYPE = 0 : グラフ上部にタイトル文字を入れる
- = 1 : グラフ下部にタイトル文字を入れる
- IPRINT = 1 : SOLA-LOOPカードのプロットデータをプリントアウトする
- = 0 : SOLA-LOOPカードのプロットデータをプリントアウトしない
- ITTY = 0 : CALCOMPによる出力
- = 1 : TEKTRONディスプレイによる出力 (マニュアル)
- = 2 : TEKTRONディスプレイによる出力 (オート )
- = 3 : 標準プロッタ出力
- IGRID = 0 : 図面に格子線を入れる
- = 1 : 図面に格子線を入れない
- ICASE : プロットファイル形式の指定
- = 1 : S W A C S に対応 ..... 形式 - 1
- = 2 : S W A C 5 7 R に対応 ..... 形式 - 1
- = 3 : S W A C 1 3 E に対応 ..... 形式 - 1
- ( = 4 : ラブチャディスク(RD)変位出力の整数カード(II)参照)
- = -1 : S W A C S に対応 ..... 形式 - 2
- = -2 : S W A C 5 7 R に対応 ..... 形式 - 2
- = -3 : S W A C 1 3 E に対応 ..... 形式 - 2

(2) ラプチャディスクの変位を出力する整数カード(II)

SWAC57Rに特有な出力であるラプチャディスクの変位をプロットするには、特別な入力データの指定が必要であり、連続出力はできず1枚の出力となる。ラプチャディスク変位を図示する場合のコントロールデータは、前述の整数カード(I)に一部準じているので、ここでは主な変更点を以下に示す。

COM1	(A80)
XLENG YLENG IPTYPE IPRINT ITTY IGRID ICASE	(2E12.5, 5I6)
IPLT MR IR1 NUMEL RAD1 DIA1	(4I4, 2E12.5)
TSTR TEND DTIM	(3E12.5)

- COM1 : データカードのタイトル (非実行文)
- XLENG : X軸の長さ (cm)
- YLENG : Y軸の長さ (cm)
- IPTYPE = 0 : グラフ上部にタイトル文字を入れる
- = 1 : グラフ下部にタイトル文字を入れる
- IPRINT = 1 : 固定
- ITTY = 1 : 固定
- IGRID = 1 : 固定 (図面に格子線を入れない)
- ICASE = 4 : 固定
- IPLT = 1 : シングル型RD
- = 2 : ダブル型RD (1枚目)
- = 3 : ダブル型RD (2枚目)
- MR : Na中に設置されたRD个数 (計算入力データと同じ値とする)
- IR1 : 出力したいRD番号
- NUMEL : RDの要素分割数 (計算入力データと同じ値とすること)
- RAD1 : RDの曲率半径 (m) (計算入力データと同じ値とすること)
- DIA1 : RDの直径 (m) (計算入力データと同じ値とすること)
- TSTR : プロット開始時刻 (sec)
- TEND : プロット終了時刻 (sec)
- DTIM : プロット出力間隔 (sec)

注意) 整数データ(II)の場合には、ラプチャディスクの変位出力であるプロットファイルをPT90F001で指定する必要がある。

C.4.2 モジュール単位のカード構成

(1) BLOCK1の構成

NMOD	NDX	XSTR	XLST	M1	(216, 2E12.5, 16)
COM2					(A80)

- NMOD = 0 : プログラム終了 (必ずカードの最後に入れる)
- = 5 : 圧力波伝播計算モジュール
- = 7 : 初期スパイク圧計算モジュール
- = 11 : 水噴出率計算モジュール
- = 13 : 準定常圧計算モジュール
- = 52 : ダウンスマ圧力波伝播計算モジュール
- = 99 : SOLA-LOOPカード
- NDX : X軸 (時間軸) の分割数  $\geq 2$
- XSTR : X軸の左端の値 (プロットさせたい開始時間) (sec)
- XLST : X軸の右端の値 (プロットさせたい終了時間) (sec)
- M1 : ユニット番号  
(60~69: SWAC57Rのみに用いる指定ユニット番号)
- COM2 : 共通タイトル (80文字)  
グラフの上部 (IPTYPE=1の場合は下部) の1行目にかくタイトル文字で、そのモジュール中の全部のプロットに共通して同じタイトルをかく。

注意)

1. NMOD=0はプログラム終了カードとみなす。
2. X軸をNDXで分割し、その分割点にX軸の値をかくので(XLST-XSTR)とNDXはうまく割り切れるようにする。  
例) NDX=5, XSTR=0.0, XLST=1.0のときX軸値は、0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0と分割されることになる。
3. X軸のスケールは、XSCALE=(XLST-XSTR)/XLENG (cm<sup>-1</sup>)となる。

## (2) BLOCK2の構成

1本のグラフについて次の2枚のカードが必要となる。従ってN本のグラフをかかせるには $2 * N$ 枚がBLOCK2のカード枚数となる。ただし、重ね書きをする時は2枚目のカードは不要でありその分だけ枚数は減る。

NA	NB	NC	NPP	NDY	YSTR	YLST	(516, 2E12.5)
COM3							(A80)

- NA, NB, NC : データを指定するパラメータ (表C.1参照)
- NPP = 1 : 紙送りを行い新しい座標軸をかきプロットする
- = 0 : 前回プロットした座標に同スケールで重ねてプロットする  
(NDY, YSTR, YLSTは無効で、2枚目カードのCOM3も不要)
- NDY : Y軸の分割数  $\geq 2$
- YSTR : Y軸下端の値 (プロットの最小値)
- YLST : Y軸上端の値 (プロットの最大値)
- Y軸スケール =  $(YLST - YSTR) / YLENG$  ( $cm^{-1}$ )
- COM3 : グラフの上部2行目に入るタイトル文字で、そのグラフに対するコメント等を記入する (80文字)  
(NPP=0の場合このカードは不要)

## 注意1) 実験結果との重ね書き

計算結果と実験結果を重ね書きする場合の指定は、以下となる。

NA : 重ね書きする指定パラメータ (表C.1参照) にマイナス(-)をつける

NB : = -99 (固定)

NC : 実験データファイルを指定するユニット番号

その他の指定は同じである。なお、実験データファイルのフォーマットは、X-データとY-データを空白あるいはコンマ(,)で区切って並べた行を、必要回数だけ繰り返して入力する。

例) 0.0, 1.0  
0.2, 2.0  
0.3, 3.0  
: :

注意2) 計算結果の重ね書き(I) ----- (一つの計算結果の重ね書き)

一つのプロットデータファイル内での計算結果の重ね書きをする場合、重ね書きしたい本数だけBLOCK2のカードを繰り返せばよい。従って、N本のグラフをプロットしたい場合は、N回の繰り返しとなる。(ただし、2本目以降のグラフについてはNPP=0を指定する)

```

例)      7   4       0.0   0.08  60           (BLOCK1の1枚目カード)
COMMENT-1                                (BLOCK1の2枚目カード)
      10   8   1   1   5       0.0   50.0 (BLOCK2の1枚目カード)
COMMENT-2                                (BLOCK2の2枚目カード)
      10  10   1   0                                (BLOCK2の1枚目カード)
      10  20   1   0                                (BLOCK2の1枚目カード)
      :   :   :   :                               :
      0                                           (モジュール終了カード)
    
```

注意3) 計算結果の重ね書き(II) ----- (複数の計算結果の重ね書き)

複数の計算結果(複数のプロットファイル)の重ね書きは、BLOCK1のカードとBLOCK2のカードを重ね書きしたい本数だけ繰り返す。(ただし、各プロットファイルには異なるユニット番号を指定し、また、2本目以降のグラフにはNPP=0を指定する)

```

例)      7   4       0.0   0.08  60           (BLOCK1の1枚目カード)
COMMENT-1                                (BLOCK1の2枚目カード)
      10   8   1   1   5       0.0   50.0 (BLOCK2の1枚目カード)
COMMENT-2                                (BLOCK2の2枚目カード)
      0                                           (モジュール終了カード)
      7   4       0.0   0.08  61           (BLOCK1の1枚目カード)
COMMENT-1                                (BLOCK1の2枚目カード)
      10  10   1   0                                (BLOCK2の1枚目カード)
      0                                           (モジュール終了カード)
      7   4       0.0   0.08  62           (BLOCK1の1枚目カード)
COMMENT-1                                (BLOCK1の2枚目カード)
      10  10   1   0                                (BLOCK2の1枚目カード)
      :   :   :   :                               :
      0                                           (モジュール終了カード)
    
```

## (3) モジュール終了カード

0	(16)
---	------

ゼロカードを読むとモジュール終了とみなし、次のモジュールに移りBLOCK1のカードを読む。

## (4) プログラム終了カード

0	(16)
---	------

データカードの最後にゼロカードを入れてプログラムを終了させる。従ってプログラムを終了する場合には、モジュール終了カードとプログラム終了カードの2枚のゼロカードが連続して並ぶことになる。

## C.5 プロットデータの指定方法

プロットするデータの選択はBLOCK2の1枚目カードのNA, NB, NCの3つの整数で指定を行う。初期スパイク圧圧力波伝播計算モジュールのNA, NB, NCは表C.1に示した整数で指定を行う。

例1) 初期スパイク圧計算	(NMOD=7)
気泡半径上側	(NA=16, NB=1)
圧力、部材No. 5、JOINT-1	(NA=10, NB=5, NC=1)

なお、NA, NB, NCでまちがった(存在しないデータ)の番号を指定してしまった場合は、それを無視しエラーメッセージを出力し次のデータのプロットに移る。

表C.1 初期スパイク圧/圧力波伝播計算プロットデータ (SWAC57R)

No	データ名称	単位	NA	NB	NC
1	時刻	sec	1	—	—
2	自由液面レベル	m	2	液面番号	—
3	自由液面圧力	kg/cm <sup>2</sup>	3	液面番号	—
4	サージタンクレベル	m	4	タンク番号	—
5	R/Dナトリウム流出量	m <sup>3</sup>	5	R/D番号	—
6	R/Dナトリウム流速	m/sec	6	R/D番号	—
7	不使用	—	7	—	—
8	不使用	—	8	—	—
9	不使用	—	9	—	—
10	圧力	kg/cm <sup>2</sup> a	10	部材番号	ジョイント 番号
11	流速	m/sec	11	部材番号	( 1 or 2 )
12	水噴出率 (上流側)	kg/sec	12	—	—
13	水噴出率 (下流側)	kg/sec	13	—	—
14	水噴出率 (合計)	kg/sec	14	—	—

No	データ名称	単位	N A	N B	N C
15	水噴出量	kg	15	—	—
16	H <sub>2</sub> 気泡半径	m	16	* 1	—
17	H <sub>2</sub> 気泡圧力／体積	kg/cm <sup>2</sup> a m <sup>3</sup>	17	= 1 (圧力) = 2 (体積)	—
18	H <sub>2</sub> 気泡成長速度	m/sec	18	* 2	—
19	不使用	—	—	—	—
20	不使用	—	—	—	—
21	不使用	—	—	—	—
22	放出系内ガス圧力	kg/cm <sup>2</sup> a	22	R / D 番号	—
23	放出系内ガス総体積	m <sup>3</sup>	23	R / D 番号	—
24	放出系内界面移動距離	m	24	R / D 番号	—
25	ダンプタンク N a 流出量	kg/sec	25	R / D 番号	—

\*1) モデル切替以前は、N B = 1 : 上半球, N B = 2 : 下半球の半径

モデル切替以降は、気泡体積を球半径に換算した等価半径(NB=1,2とも同じ)

\*2) モデル切替以前は、N B = 1 : 上半球, N B = 2 : 下半球の気泡成長速度

モデル切替以降は、Extra-Pipeの始端(NB=1), 終端(NB=2)側境界移動速度



No	データ名称	単位	NA	NB	NC
26	1枚目R/Dの変化量	kg/cm <sup>2</sup> a	26	R/D番号	-
27	2枚目R/Dの変化量	kg/cm <sup>2</sup> a	27	R/D番号	-
28	R/D間のガス圧力	kg/cm <sup>2</sup> a	28	R/D番号	-
-	実験データ(X-Yデータ) ファイルの重ね書き	-	-NA	--99(固定)	X-Yデータの ユニット番号

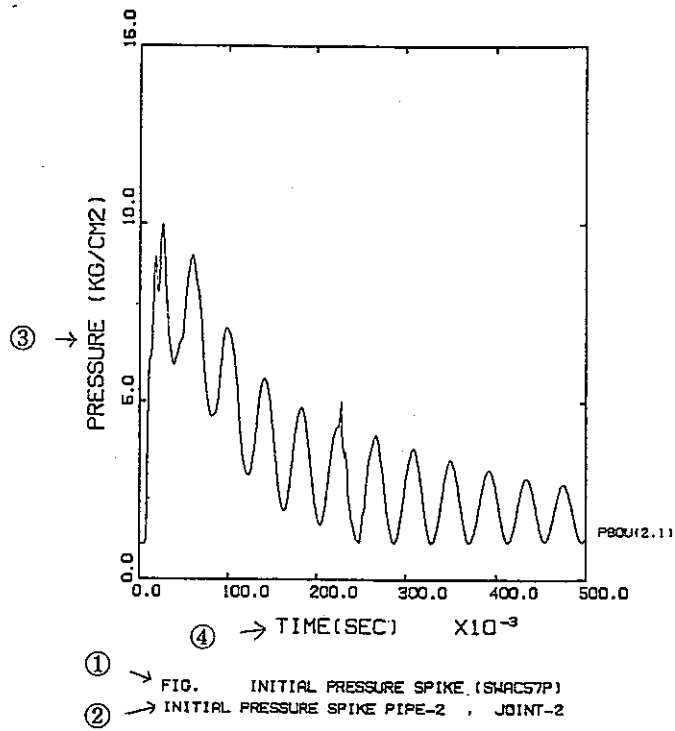


図 C.1 プロッタプログラムの出力：形式 - 1

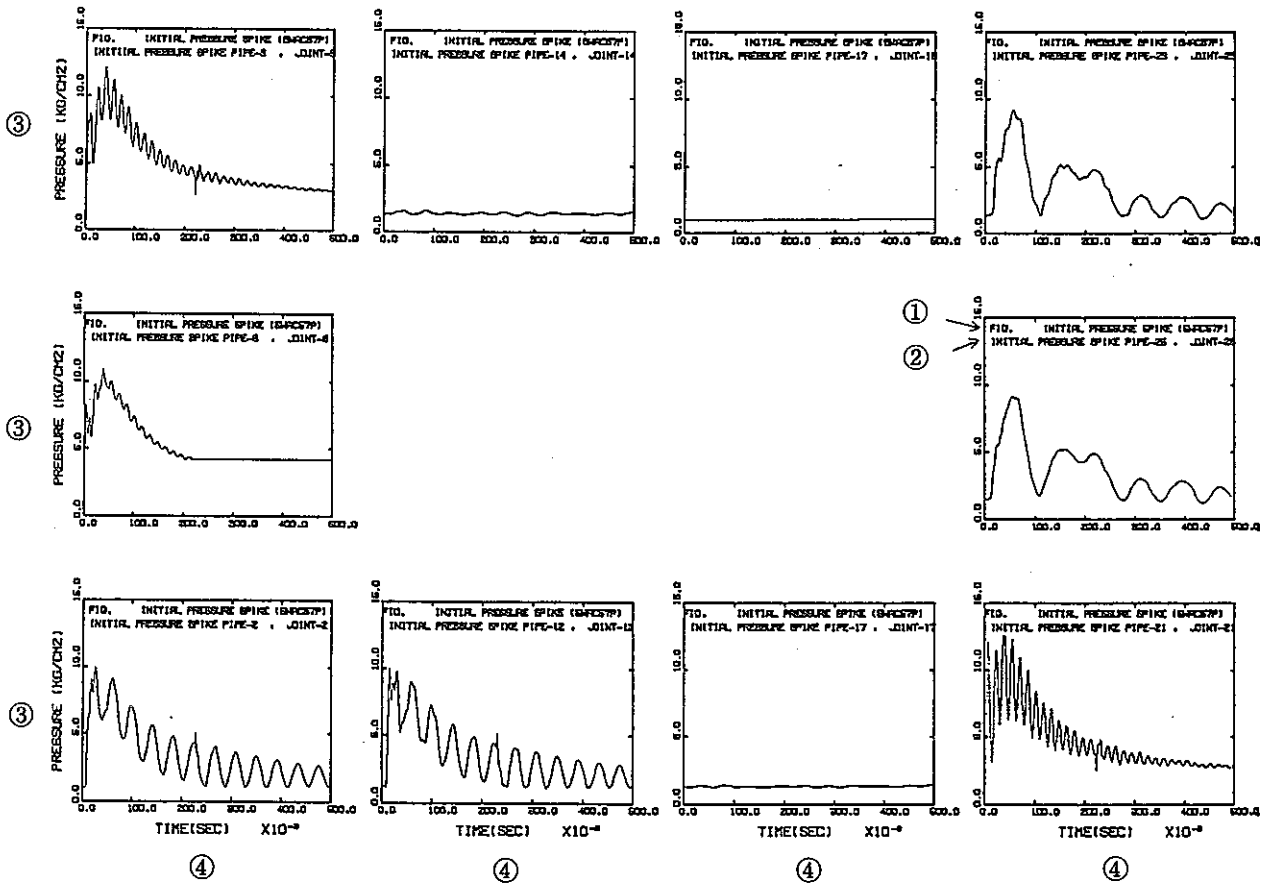


図 C.2 プロッタプログラムの出力：形式 - 2

## D. PEPT試験のデータ変換

PEPT試験データは、①3.5インチバイナリ形式データからHP9000を用いて②3.5インチASCII形式データに変換し、PC-9801を用いて、③MS-DOSフォーマットのデータに変換し、次に大型計算機用に④IBMフォーマットのデータに変換し、最終的に大型計算機を用いて⑤大型のDASDにデータを変換する。この一連の作業の流れを図D.1に示す。ここでは、図の斜線で囲まれた部分の変換作業について述べる。

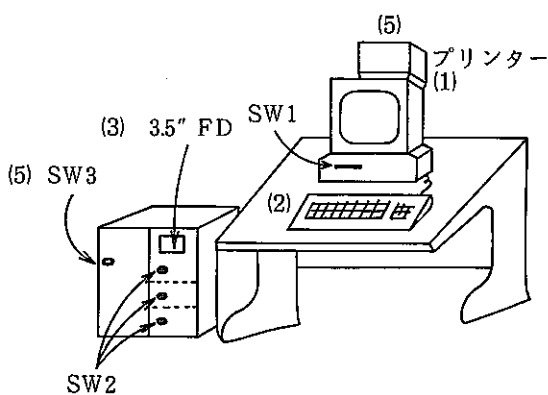
### D.1 PEPT試験データのバイナリ／アスキー変換

#### D.1.1 概要

D.1章は、川重より入手した試験データ（3.5インチ、フロッピーディスク、HPフォーマット、バイナリ形式データ）の変換に関するものである。ここでは、HP9000を用いて、試験データをバイナリ形式からASCII形式に変換する方法について述べる。

#### D.1.2 システム構成

作業に必要なシステム（炉工の水流動試験室にある）の構成は、以下の図に示すように、(1)ディスプレイ、(2)キーボード、(3)3.5" FDドライブ、(4)メモリー、(5)磁気ディスクドライブ、(6)プリンター等からなる。



- (1) ディスプレイ
- (2) キーボード
- (3) 3.5" FDドライブ
- (4) メモリー
- (5) 磁気ディスクドライブ
- (6) プリンター

⋮  
etc

#### D.1.3 HP-BASICの立上げ

- (1) 3.5" FDドライブに、HP-BASICのシステムディスクをセットする。
- (2) 以下の電源スイッチON
  - ① ディスプレイ（画面の下にスイッチ有）
  - ② フロッピーディスク、メモリー（図のSW2）
 注）SW3はoffとしておく事。

D. 1.4 データ変換プログラムの使用法

(1) プログラムのロード

ディスプレイがコマンド入力状態になったら、変換プログラムをメモリーへロードする。変換プログラムは、HP-BASICのシステムディスクにある。

ロードの方法は、以下のコマンドによる。

LOAD  DATA\_CONV  }  
 or GET  data\_conv  } どちらでも可

注) ファイル名は、大文字と小文字を区別するので注意の事。

[ DATA\_CONV はプログラム (バイナリ) 形式である。  
 data\_conv はASCII形式である。 ]

(2) プログラムの実行

① プログラムのロードが終了したら、実行に移る。実行は以下のコマンドを入力のこと。

RUN       あるいは    f3 キー

② その後、プログラムは必要な情報 (データファイル名、アドレス等) を聞いてくるので、そのつどキーボード or ファンクションキーを入力する。以下にその概要を述べる。

(3) プログラムの概要 / 応答

① Set the disk and press the cont. key  
 処理すべきデータ・ファイルの入ったディスクをセットし、ファンクションキー (f2) を押す。

② Input file name to be read:  
 処理すべきデータ・ファイル名を入力する。(大文字と小文字に注意する事!!)  
 例) SG52

③ Input data Address:  
 読むべきデータ・アドレス (チャンネル番号) を入力する。プログラムの実行を中止する場合は、21以上の数値を入力する。  
 例) 3     --- 3 chのデータ読み込み  
 25     --- プログラム終了

注) データ・アドレスは、各試験により異なるので、リストにより事前に調べておく事。

④ その後CRTに以下の出力がなされる。

```
*****
Gauge      Data_max   Time_max   Data_min   Time_min   Ndata     Tdelt
   P2         33.6      1.150     -1.2      112.000   5000     2.500E-05
*****
  ↓           ↓           ↓           ↓           ↓           ↓           ↓
ゲージ番号   データの最大値   その時の時間   データの最小値   その時の時間   データ数   収録時間幅
                (kg/cm2・g)   (msec)         (kg/cm2・g)   (msec)         (最大5100)   (sec)
```

⑤ Input skip\_data number:

CRTに出力すべき、データの間隔を入力する。

例) 1  — 全データをCRT表示する。

5  — 5個おきにデータを出力する。

注) ・データは全部で5000点ほどあるので、注意の事。

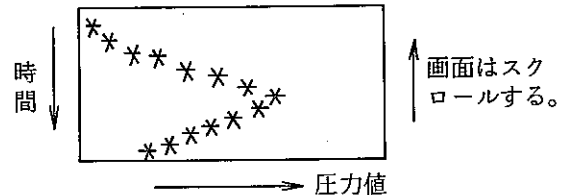
・出力の際、データの先頭にあるゼロ・データは飛ばされて出力される。

CRTイメージ

⑥ データのCRT出力

・CRT上で、データの値に対応した位置に  
"＊"マークが出力される。

・同時に、CRTの最下部にデータのデジタル値も出力される。



⑦ Write the data ? [Y/N]

CRTに出力したデータをファイルにASCIIセーブするか否かを聞いてくる。"Y" or "N"を入力する。

例) Y  — ファイルにセーブする。 → ⑧へ移る。

N  — " " しない。 → ③へ移る。

⑧ Change the disc, if you need. Followed by cont. key

ASCII形式のデータを格納すべきフロッピーディスクをドライブにセットする。  
そしてファンクションキー (f2) を押す。

注) フロッピーディスクは必ずイニシャライズされている事。イニシャライズの行い方は、後述する。

⑨ プリンター出力 - その 1 -

以下のフォーマットで、情報が出力される。

```
*****  
Disk label is      B9826  
Input file name is SG52  
Gauge      Data max  Time max    Data min  Time min  Ndata    Tdelt  
  P2          33.6    1.150      -1.2     112.000   5000    2.500E-05  
Address is          2
```

⑩ Input file name to be written:

格納すべきファイル名を入力する。

注) このファイル名は、ディスク上で他に存在するファイル名であってはならない。(大文字と小文字に注意して入力する事)

⑪ Input record length(rec/file):

格納すべきファイルの大きさ(レコード数)を入力する。

注) ・ 1レコード=256バイト  
・ 600レコード程度あれば、データを収録できる。  
・ レコード数が少なくても、全データを収録できなくても、プログラムは対応して処理してくれるので、画面上のメッセージに注意の事。

⑫ Input data-skip number:

格納すべきデータの間引き間隔を入力する。

⑬ プリンター出力 - その 2 -

以下のフォーマットで情報を出力するので、ファイル名及びファイル内容を確認できる。

```
Output file name is SG52 P2  
***** No. 1  
Start of data No. is 100  
Data-skip number is 1  
End of data No. is 120
```

⑭ データがファイルに格納しきれない時

(i) Out-put data are too much, change the disk followed by cont. key  
新しいディスク(空きのディスク容量が少ない時) or そのままの状態ではファンクションキー(f2)を押す。

(ii) プリンター出力

以下の出力をするので、確認の事。

Disk label is B9826

Input file name is SG52

Address is 2

その後は、上記の⑨から⑬を必要回数だけ繰り返す。

⑮ ファイルの格納が終了

注1) 1つのアドレスについての作業は終了。異なるアドレスをデータ変換するか、作業を中断する場合はf2キーを押すと③へ移る。

注2) 入力すべきデータ・ファイルを変える時は、本プログラムを終了（アドレスに21以上の値を入力）し、(2)①から再度実行する。

D.1.5 プリンター出力の例

プリンター出力例とその説明を以下に示す。

```
*****
Disk label is    MICROS ① フロッピーディスクのラベル名
Input file name is SG52 ② データ変換すべきファイル名（入力データ）
Gauge   Data_max Time_max Data_min Time_min Ndata   Tdelt
  P1      36.8    2.825    -1.9    29.925   5000   2.500E-05 ③ 入力データの概要
Address is      1 ④ アドレス番号
Output file name is N1 ⑤ 変換後のファイル名（出力データ）
***** No. 1
Start of data No. is 100 ⑥ 最初のデータ番号
Data-skip number is 1 ⑦ データ間引間隔
End of data No. is 120 ⑧ 最後のデータ番号
```


```
Disk label is    MICROS
Input file name is SG52
Address is      1
Output file name is N2
***** No. 2
Start of data No. is 121
Data-skip number is 50
End of data No. is 5071
```

⑨ データがファイルに納めきらなかった場合に、上記の①、②、④～⑧が繰り返し出力される。


D.1.6 フロッピーディスクのイニシャライズ

(1) イニシャライズすべきフロッピーディスクをドライブにセットする。




- (2) ディスクに重要なファイルが無い事、あるいは何も入っていない事を確認する。確認は以下のコマンドで可能。

例) CAT 

- (3) コマンド入力により、イニシャライズする。

例) INITIALIZE :CS80,700,1"

注) フロッピーにラベルを付ける時は、以下のコマンドで可能。

PRINT\_LABEL ラベル名 TO :CS80,700,1"

## D.2 高速ファイルコンバータの使用法

(HP9000(LIF)/MSDOZ)

### D.2.1 概要:

本ファイルコンバータは、マイクロソフト製の製品であるが、これを用いて、パソコンシステム上で使用する方法を述べる。

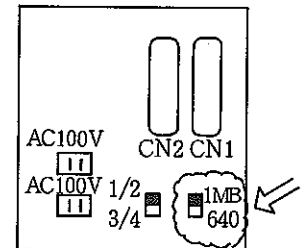
### D.2.2 使用するシステム

- ① ハード: PC-9801VX41 (3.5"FDドライブ外付け)
- ② ソフト: HP9000(LIF)/MSDOS高速ファイルコンバータ用システム

(裏面)

### D.2.3 使用法

- ① 外付けの3.5"FDドライブの後にある右下側のスイッチが"1MB"になっているのを確認する。  
(右図参照)
- ② 上記2. ②のソフトをPC本体のAドライブにセットし、システムを立ち上げる。
- ③ システムのBOOTが完了したら、上記①のスイッチを"1MB"から"640KB"に切替える。これでシステムが使用可となる。



(注意) 3.5"FDドライブの“ドライブ1”は -dh2 に対応

“ドライブ2”は -dh3 に対応

- ④ データ変換方法: 次項で説明
- ⑤ 作業終了後は、3.5"FDドライブのスイッチを"640KB"から"1MB"に戻し、上記②のシステムディスクを抜取ってリセットしておく事。

### D.2.4 高速ファイルコンバータのコマンド

コマンドについては、ユーザズ・マニュアルがあるので、詳細な説明はそちらを参照の事。ここでは、必要最小限なコマンドの使用法について、簡単に説明する。



① ディレクトリ情報の表示

A:¥>hdir└dh ( $\frac{2}{3}$ )└[-f(ファイル名)]└

② 全ファイル削除

A:¥>hinit└dh ( $\frac{2}{3}$ )└

③ ファイルコンバート

A:¥>hconv└dh( $\frac{2}{3}$ )└1(ファイル名)└0(ファイル名)└

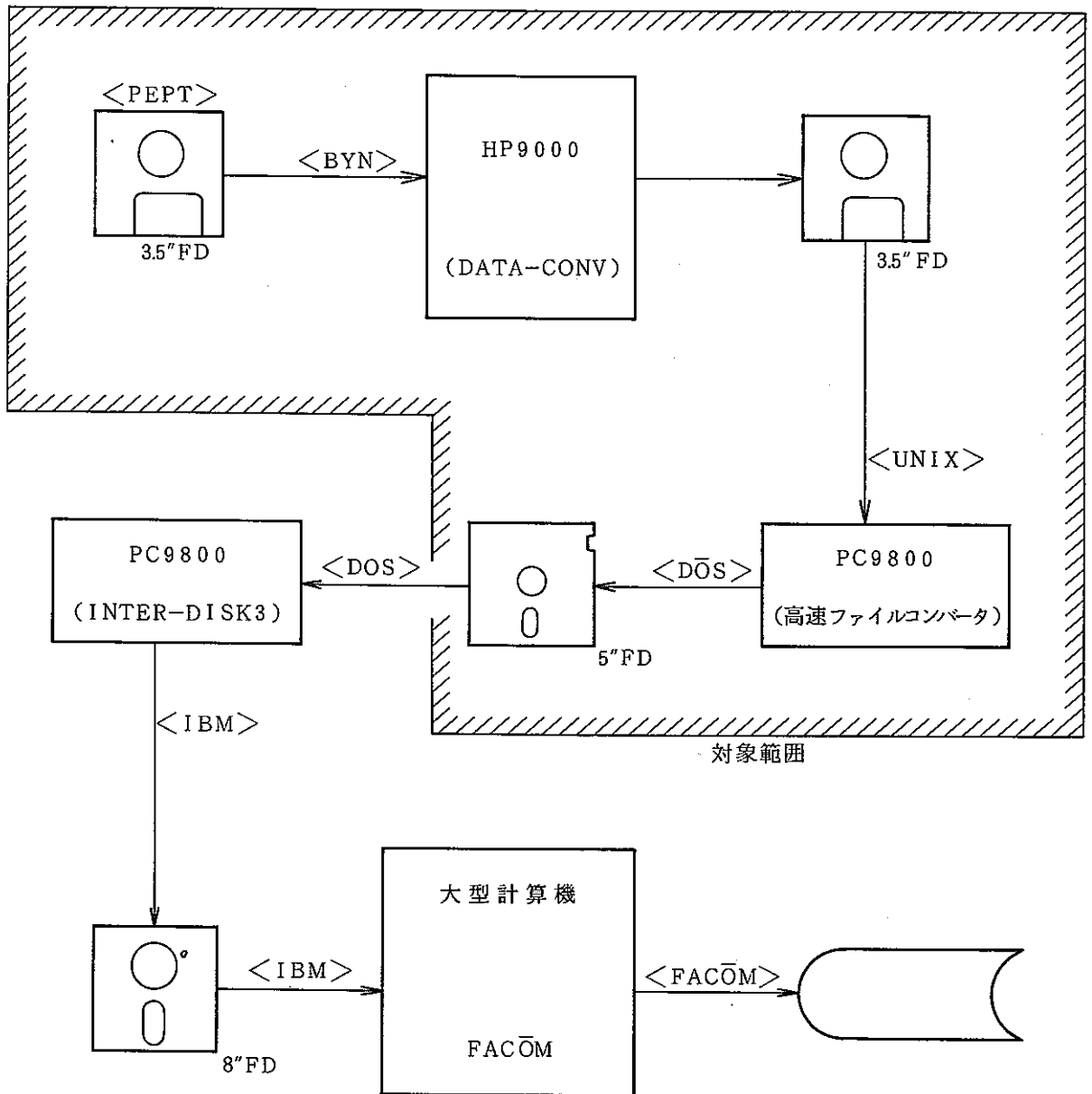
④ フォーマット (HP/LIF用フォーマット)

A:¥>hformat└dh( $\frac{2}{3}$ )└

(注意) (i) ファイル名には、ワイルド・カード・キャラクタ(\*,?)が使用できる。

(ii) ms-dosのファイル名 (-0(ファイル名)の事) には、上記(i)の他に、  
ドライブ番号 (A, B, ...)、バス名、CON (マンソール出力)、PRN (プ  
リンター出力) ができる。

(iii) 上記①, ②は、HP/LIFのディスクについてのみ有効である。



図D.1 PEPT試験データ変換の流れ