

# 圧力波伝播実験

## 第4報 二次系縮尺モデルにおける試験結果

1977年5月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor  
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-  
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

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

## 圧力波伝播実験

### 第4報 二次系縮尺モデルにおける試験結果

報告者 菱田 誠 \*  
佐藤 健 \*\*  
堀 雅夫 \*\*\*

期間 1972年6月28日～1977年3月30日

目的 蒸気発生器内でナトリウム-水反応事故が起こった時の圧力波が二次系内を伝播する現象を調べるための実験で、本報では二次系の主要機器を含むループ内における圧力波伝播特性を調べた。

### 要

### 旨

原型炉二次系構成機器のうち、現在まで単体として試験してきた配管要素（分岐，ベンド），中間熱交換器，蒸気発生器などを連結した二次系ループを取りあげ，原型炉「もんじゅ」の約1/125の縮尺モデルについて圧力波伝播実験を行なった。

試験条件は

- (1) 圧力波伝播媒体としては水を使用した。
- (2) 立上り時間 2.5～7 msec，波高値約 2～7 Kg/cm<sup>2</sup> の第一パルス波を有する入力波形を使用した。

この試験の結果と圧力波伝播計算コード SWAC-5K および SWAC-5H による計算の結果を比較した。

試験結果から次のことが判った。

- (1) 二次系ループモデル内における圧力波伝播の計算結果と実験結果は中間熱交換器近辺を除けばよく一致している。
- (2) 中間熱交換器の内部および近傍においては圧力波の波形は類似しているが，波高値は計算結果の方が高い。すなわち計算結果は安全側の値を与える。
- (3) SWAC-5K または SWAC-5H コードによって「もんじゅ」二次系の圧力波伝播解析を行うことは妥当である。また，本報で採用した計算のモデルおよび考え方なども実機の解析に当て適用できると考える。

\* 現在日本原子力研究所      \*\* 現在北海道電力株式会社

\*\*\* 大洗工学センター 蒸気発生器開発部 高速炉安全性試験室

Experiment on Pressure Wave Propagation

(IV) The Result of Experiment with Secondary Loop Model

Makoto	HISHIDA *
Ken	SATO **
Masao	HORI **

Abstract

Pressure wave propagation in a FBR secondary loop was studied using 1/12.5 scale model of the prototype LMFBR "MONJU" for the purpose of establishing the analysis method for the pressure wave propagation through FBR secondary circuit in case of a sodium-water reaction.

The test were conducted using water as the coolant fluid instead of sodium. The first wave of input pressure had 2.5 ~ 7 msec rise time and 2 ~ 7 kg/cm<sup>2</sup> peak value.

The test results were compared with the calculation results by SWAC-5K and SWAC-5H codes which were developed for analyzing the pressure wave propagation in a FBR secondary circuit.

Following conclusions were obtained from this study;

- (1) The agreements between the experimental results and calculated results of the transmitted pressure were good in all the measuring points except in and near IHX.
- (2) In and near IHX, the calculated wave forms were similar to the experimental results, but the calculated peak values were higher than the experimental results, i.e. calculated results give safe side values.
- (3) It would be appropriate to analyse the pressure wave propagation of "MONJU" secondary circuit by SWAC-5K or SWAC-5H code. The calculation models and ideas used in this report could also be applied to the "MONJU" analysis.

---

\* Presently with Japan Atomic Energy Research Institute  
\*\* Presently with Hokkaido Electric Power Company  
\*\*\* Fast Reactor Safety Section, Oarai Engineering Center

目 次

1. ま え が き	1
2. 実験装置と実験方法	3
3. 実 験 結 果	20
3-1 圧力波測定結果	20
3-2 圧力波伝播速度	20
4. 実験結果と計算結果との比較	41
4-1 解析に使用した計算コード	41
4-2 二次系縮尺モデル実験装置の計算モデル化	43
4-3 実験結果と計算結果の比較	46
4-4 実験結果と計算結果の比較のまとめ	51
5. 結 論	84
6. 謝 辞	84
7. 参 考 文 献	85

図 表 リ ス ト

Fig.2.1 Experimental Apparatus of Pressure Wave Propagation  
 Test ..... 6

Fig.2.2 Test Section of the Simulated Secondary Loop of  
 " MONJU " ..... 7

Fig.2.3 Scaled Down Model of Steam Generator ..... 8

Fig.2.4 Scaled Down Model of Reheater ..... 9

Fig.2.5 Scaled Down Model of Intermediate Heat Exchanger ..... 10

Fig.2.6 Scaled Down Model of Expansion Tank ..... 11

Fig.2.7 Scaled Down Model of Overflow Column ..... 12

Fig.2.8 Scaled Down Model of Valve ..... 13

Fig.2.9 Scaled Down Model of Reducer ..... 14

Fig.2.10 Schematic Design of MONJU S.G. and its 1/125  
 Scaled Down Model ..... 15

Fig.2.11 Schematic Design of MONJU R.H. and its 1/125  
 Scaled Down Model ..... 16

Fig.2.12 Schematic Design of MONJU I.H.X. and its 1/125  
 Scaled Down Model ..... 17

Fig.2.13 S.G. Model ..... 18

Fig.2.14 I.H.X. Model ..... 18

Fig.2.15 R.H. Model ..... 19

Fig.2.16 Overflow Column Model ..... 19

Fig.3.1 Measuring Points at Each Test Series ..... 23

Fig.3.2 Experimental Data by Secondary Loop (R.H.) ..... 24

Fig.3.3 Experimental Data by Secondary Loop (R.H.) ..... 25

Fig.3.4 Experimental Data by Secondary Loop (I.H.X.) ..... 26

Fig.3.5 Experimental Data by Secondary Loop (I.H.X.) ..... 27

Fig.3.6 Experimental Data by Secondary Loop (I.H.X.) ..... 28

Fig.3.7 Experimental Data by Secondary Loop (Upper Piping) ..... 29

Fig.3.8	Experimental Data by Secondary Loop(Upper Piping)	3 0
Fig.3.9	Experimental Data by Secondary Loop(Lower Piping)	3 3
Fig.3.10	Experimental Data by Secondary Loop(Lower Piping)	3 4
Fig.3.11	Experimental Data by Secondary Loop	3 7
Fig.3.12	Wave Velocity	3 9
Fig.3.13	Time for pressure wave to propagate between measured points	4 0
Fig.4.1	Simplified View of the Scaled Down Secondary Loop	5 3
Table.4.1	Dimensions of Analytical Model of R.H.	4 4
Fig.4.2	Analytical Model of Reheater	5 4
Fig.4.3	Analytical Model of I.H.X.	5 5
Table.4.2	Dimensions of Analytical Models of I.H.X. Expansion Tank and Overflow-Column	5 6
Fig.4.4	Analytical Model of Expansion Tank	5 7
Fig.4.5	Analytical Model of Overflow-Column	5 7
Fig.4.6	Analytical Model of Reducer	5 8
Fig.4.7	Treatment of Valves	5 8
Fig.4.8	Analytical Model of Secondary Loop	6 1
Table.4.3	Dimensions of Analytical Model of Scaled Down Secondary Loop	5 9
Fig.4.9(a)	Measured Pressure Change of the Experiment HL-7 at PG-7	6 2
Fig.4.9(b)	Measured Pressure Change of the Experiment HL-7 at PG-11	6 3
Fig.4.10	Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-53	6 4
Fig.4.11	Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-50	6 5
Fig.4.12	Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-47	6 6

Fig.4.13 Comparison of Experimental Result and Calculated  
 Result at PG-41 ..... 6 7

Fig.4.14 Comparison of Measured Pressure Change of HI-5  
 and HK-6 at PG-7 and PG-11 ..... 6 8

Fig.4.15 Comparison of Experimental Result and Calculated  
 Result at PG-24 ..... 6 9

Fig.4.16 Comparison of Experimental Result and Calculated  
 Result at PG-27 ..... 7 0

Fig.4.17(a) Measured Pressure Change of the Experiment HH-8  
 at PG-7 ..... 7 1

Fig.4.17(b) Measured Pressure Change of the Experiment HH-8  
 at PG-11 ..... 7 2

Fig.4.18 Comparison of Experimental Result and Calculated  
 Result at PG-86 ..... 7 3

Fig.4.19 Comparison of Experimental Result and Calculated  
 Result at PG-65 ..... 7 4

Fig.4.20 Comparison of Experimental Result and Calculated  
 Result at PG-78 ..... 7 5

Fig.4.21 Comparison of Experimental Result and Calculated  
 Result at PG-74 ..... 7 6

Fig.4.22(a) Measured Pressure Change of the Experiment HI-5  
 at PG-7 ..... 7 7

Fig.4.22(b) Measured Pressure Change of the Experiment HI-5  
 at PG-11 ..... 7 8

Fig.4.23 Comparison of Experimental Result and Calculated  
 Result at PG-94 ..... 7 9

Fig.4.24 Comparison of Experimental Result and Calculated  
 Result at PG-98 ..... 8 0

Fig.4.25 Comparison of Experimental Result and Calculated  
 Result at PG-34 ..... 8 1



Fig. 426 Comparison of Experimental Result and Calculated  
Result at PG-38 ..... 8 2

Fig. 427 Analytical Models of I.H.X. .... 8 3

## 1. ま え が き

現在、動力炉核燃料開発事業団では、ナトリウム冷却高速原型炉“もんじゅ”が開発されている。“もんじゅ”原型炉二次系に取り付けられる蒸気発生器については、安全解析の一つとして、大リーク・ナトリウム-水反応事故を想定した場合の二次系内の圧力波伝播に関する解析を行なっておく必要がある。一般に、ナトリウム冷却高速炉では、蒸気発生器の伝熱管が破断する様な事故が起った場合には、いわゆる“大リーク・ナトリウム-水反応事故”を伴ない、その時、ピーク圧の高い圧力波が発生する。ナトリウムの配管中を伝わる圧力波の伝播速度は 1,000 m/sec 以上であり、ナトリウム-水反応事故時に発生した圧力波は、ほとんど瞬間的(1秒以内)に二次系内の各機器に伝播される。従って、例えば、ナトリウム-水反応事故を検出すると同時に蒸気発生器前後のバルブを閉める、等の方法によっても圧力波の伝播を遮断する事は不可能である。従って、ナトリウム-水反応の結果発生する圧力波が二次系内をどの様に伝播するかを調べ、各機器がその圧力波に対して充分健全である事を確認しておく必要がある。特に、中間熱交換器は、一次系との境界になっており、圧力波に対する健全性を充分評価しておかなければならない。

ところで、液体中を伝わる圧力波伝播の実験的研究や理論的研究は、水力発電所等で生ずる水撃の問題、<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>及び、軽水炉の一次冷却系破断事故の圧力波伝播等<sup>(5)</sup>に関連して数多く行なわれている。しかし、これらの実験や理論の大部分は、一次元流路系内における圧力波伝播を対象とした研究である。ナトリウム冷却高速炉の二次系内の圧力波伝播については、水撃や一次系破断事故時の圧力波伝播と同じ解析方法を使用した計算コード SWAC-5K<sup>(6)</sup>、SWAC-5H<sup>(7)</sup>等により解析が行なわれている。

ナトリウム-水反応事故時発生する圧力波の発生原因は水撃等の場合と異なるが、伝播現象は本質的に同じであり同様の取り扱いが可能である。しかし、ナトリウム冷却高速炉の二次系内には、中間熱交換器、蒸気発生器、再生熱交換器等内部構造が三次元的に複雑な機器が含まれている。また、ナトリウム-水反応事故時には、立上り時間の早い(数 msec 程度)圧力波が発生すると予想されている。この様に内部構造物が複雑な機器を含む二次系内を、立上り時間の短い圧力波が伝播する場合にも SWAC-5K、SWAC-5H の様な一次元計算コードで解析する事が可能であるかどうか、実験との比較によって確かめておく必要がある。

従って、我々は原型炉“もんじゅ”二次系内に含まれている主要な機器(蒸気発生器、

再熱器，中間熱交換器，バルブ，オーバーフローコラム等)を含む縮小モデル二次系でナトリウムの代わりに水を用いた圧力波伝播実験を行なった。

## 2. 実験装置と実験方法

実験装置を図 2-1, 図 2-2 に示す。装置は大別して下記のもので構成されている。<sup>(8)</sup>

- (1) 圧力波発生装置
- (2) 給水装置
- (3) 試験部
- (4) 圧力波計測装置

図 2-1 に、圧力波発生装置、給水装置、圧力波計測装置を示す。これらの各装置は、「圧力波伝播実験、第 1 報」<sup>(8)</sup> に記したものと全く同一であり、詳しくは、第 1 報に記してある。本報では、以下に概略を記す。

圧力波の発生は、蒸気発生器モデルの水面上に急激にガス圧力を加える事により行なつた。すなわち、ラプチャーディスクで仕切られた窒素ガス室にあらかじめ窒素ガスを充填しておき、(ガス圧  $2\text{Kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g} \sim 7\text{Kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$  程度) ラプチャーディスクを針で破る事により窒素ガス圧を蒸気発生器モデルの水面上に加え、蒸気発生器内に圧力波を発生させた。ラプチャーディスクの材質と厚みを変える事により、発生する圧力波の大きさを変えた。使用したラプチャーディスクの材質は、アルミニウム、黄銅、ステンレスである。

圧力波伝播の実験においては、水中にわずかな量の気泡が含まれていても実験結果に影響を及ぼす。従って、二次系モデル内へ給水する際には、 $60^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$  程度に加熱した水を脱気器内で充分脱気した後給水した。更に、給水中は、二次系モデル内を真空に引きながら給水し、わずかな量の気泡も混入しない様注意した。

圧力波を測定する為の圧力センサーは、豊田工機製半導体歪ゲージ式圧力計を使用した。圧力計の固有振動数は  $50\text{kHz}$  以上であり、フルスケールは  $10\text{Kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$  である。圧力計の取付位置は図 2-2 の中で PG-No. と示してある場所である。

図 2-2 に試験部である“二次系縮尺モデル”を示す。此の二次系縮尺モデルは原型炉“もんじゅ”の第一次設計の二次系を対象として製作した二次系モデルであり、含まれている主要機器のモデルとしては、蒸気発生器(以下、SG)、再熱器(以下、R・H)、中間熱交換器(以下、IHX)、膨張タンク、ポンプのオーバーフローコラム、ディフューザー、弁、配管等である。実験に使用した SG, RH, IHX, 膨張タンク, オーバーフローコラム, 弁, ディフューザー等のモデルの構造図を図 2-3 ~ 図 2-9 に示す。

“もんじゅ”第一次概念設計による SG, RH, IHX と、実験に使用したそれぞれの

モデルの概略寸法及び構造の比較を図 2-10～図 2-11 に示す。SG, RHモデルでは主として上部プレナム, 下部プレナム, ノズル部, 伝熱管部等のナトリウム側の流路形状をできるだけ模擬できる様にした。伝熱管部には外径  $2\phi$  の針金がリング状に巻いてある。IHXは主として上部プレナム, 下部プレナム, 伝熱管部等, 二次系ナトリウム側の流路形状を模擬できる様に製作した。伝熱管部は内径  $9\phi$  のパイプ 82 本で構成されている。伝熱管の内径, 本数は (伝熱管の総断面積) / (プレナムの面積) の比が実物とモデルでほぼ等しくなるように選んだ。

SG, RH, IHX, 弁, 配管等主要機器のモデルの寸法は一次設計で設計された各々の機器の約  $1/125$  である。但し, 配管, 弁については口径のみを  $1/125$  としてある。各機器の配置については必ずしも一次設計の配置と同一の配置ではないが, 大よそフローシート状の位置関係が一致するようにしてあり, 各機器間の配管の長さ等は結果の検討がしやすい様にしてある。すなわち, 本試験の主要な目的は, 二次系の圧力波伝播を解析する計算コードが果して実際に適用できるかどうかを実験により確かめることにある。ところで, 圧力波は伝播する過程において, 流路形状の変化に起因する, 反射, 透過及び干渉の影響や, 直管部, 分岐部, ベンド部, 異径部等におけるエネルギー損失等の影響を受ける。しかし, 直管部, 分岐部, ベンド部, 異径部等におけるエネルギー損失等の影響を考えなければならぬのは, パイプの径の細い場合, 流体の粘性係数の大きい場合等に限られ, ナトリウム-水反応の結果生じた圧力波が, 高速原型炉の二次系内を伝播する様な場合には, エネルギー損失の影響は比較的小さい。従って, 本実験においては, 主として, 流路形状の変化に起因する圧力波の反射, 透過, 干渉の影響を調べる事ができる様, 直管部をできるだけ長くとってある。配管部は各所に支柱を取り付け, 固定してある。

実験装置の写真を, 図 2-13～図 2-16 に示す。図 2-13 には, 蒸気発生器モデルと, 膨張タンク及び, 圧力波発生用の窒素ガス室の外観図を示す。図 2-14 には, 中間熱交換器モデルの外観図を示す。図 2-15 には, 再熱器モデルの外観図を示す。図 2-16 には, オーバーフローコラムモデルの外観図を示す。

二次系縮尺モデルでの圧力波伝播実験では圧力波発生器は (図 2-13 から判る様に) SGモデルの上部に取りつけられ, 圧力はSG上部液面に加えられ, 発生した圧力波はSG上部, 下部ノズルから試験部へと伝播してゆく。

実験条件は下記の通りである。

入力圧力波の大きさ ;  $2\text{Kg/cm}^2 \cdot \text{g} \sim 7\text{Kg/cm}^2 \cdot \text{g}$

入力圧力波の立上り時間 ;  $2.5\text{msec} \sim 7\text{msec}$

水 温 ;  $25^\circ\text{C}$

実際の大リーク・ナトリウム-水反応事故では、 $10\text{Kg/cm}^2 \cdot \text{g} \sim 100\text{Kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  程度のピーク値を持った圧力波が発生すると言われている。液体ナトリウムの場合、圧力変化に対する音速の変化割合は低い。<sup>(1)</sup>従って、大リーク・ナトリウム-水反応の結果生ずる圧力の範囲内では、ほぼ音速一定と考えられる。また、本実験の様に、ナトリウムの代わりに水を用い、 $10\text{Kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  以下の圧力範囲で伝播実験を行なっても、圧力波伝播現象に関しては、実際の場合と本質的な差異はない。

水とナトリウムについて、圧力波伝播に関係する物性値の比較を下表に示す。

表 2.1 水 ( $20^\circ\text{C}$ ) とナトリウム ( $300^\circ\text{C}$ ) の物性値の比較

	ナトリウム ( $300^\circ\text{C}$ )	水 ( $20^\circ\text{C}$ )
音 速	$2,400\text{m/sec}$	$1,480\text{m/sec}$
比重量	$880\text{Kg/m}^3$	$998\text{Kg/m}^3$
動粘性係数	$0.392 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{sec}$	$1.01 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{sec}$
粘性係数	$0.352 \times 10^{-4}\text{Kg} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$	$1.03 \times 10^{-4}\text{Kg} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$

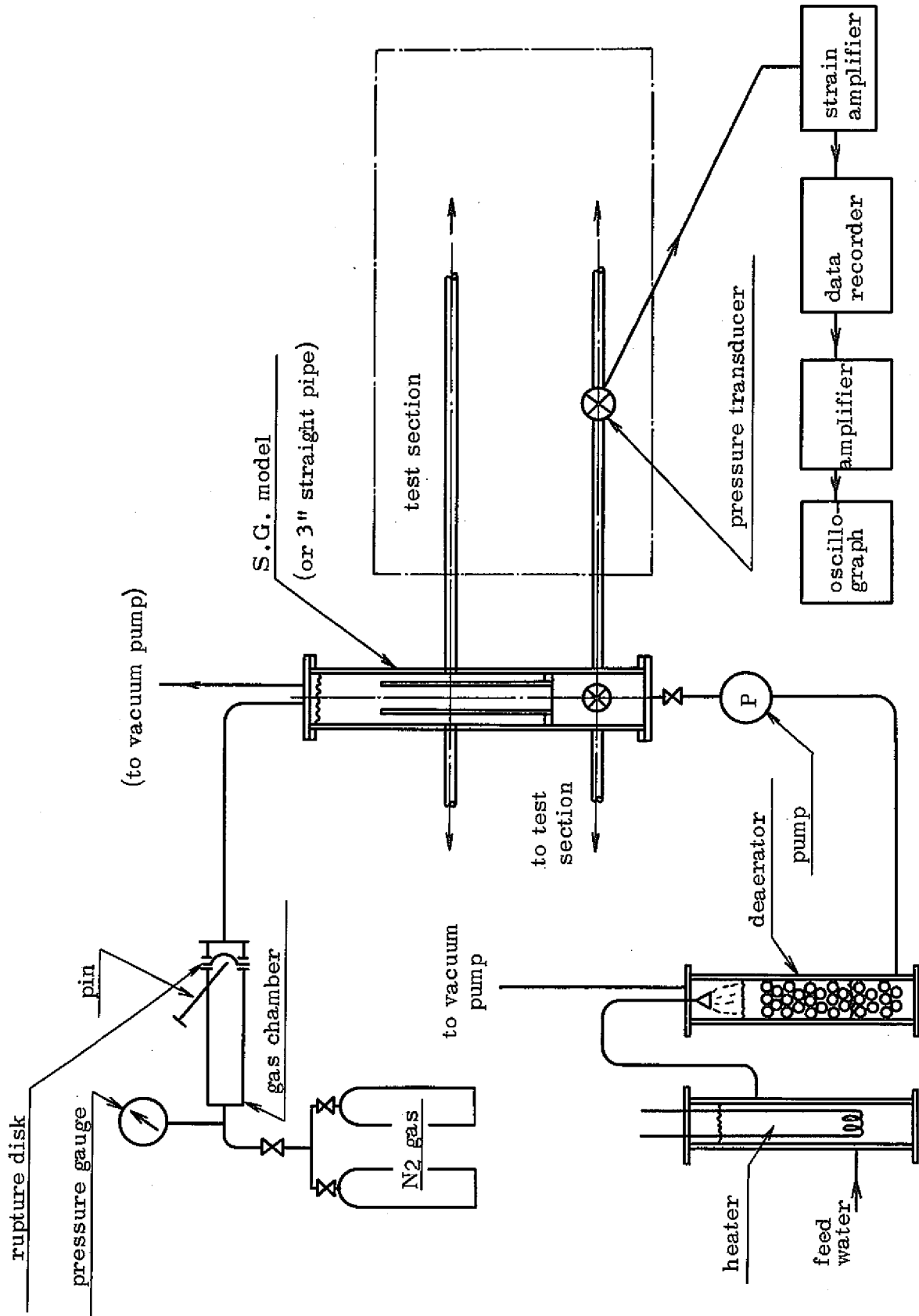


Fig. 2.1 Experimental Apparatus of Pressure Wave Propagation Test





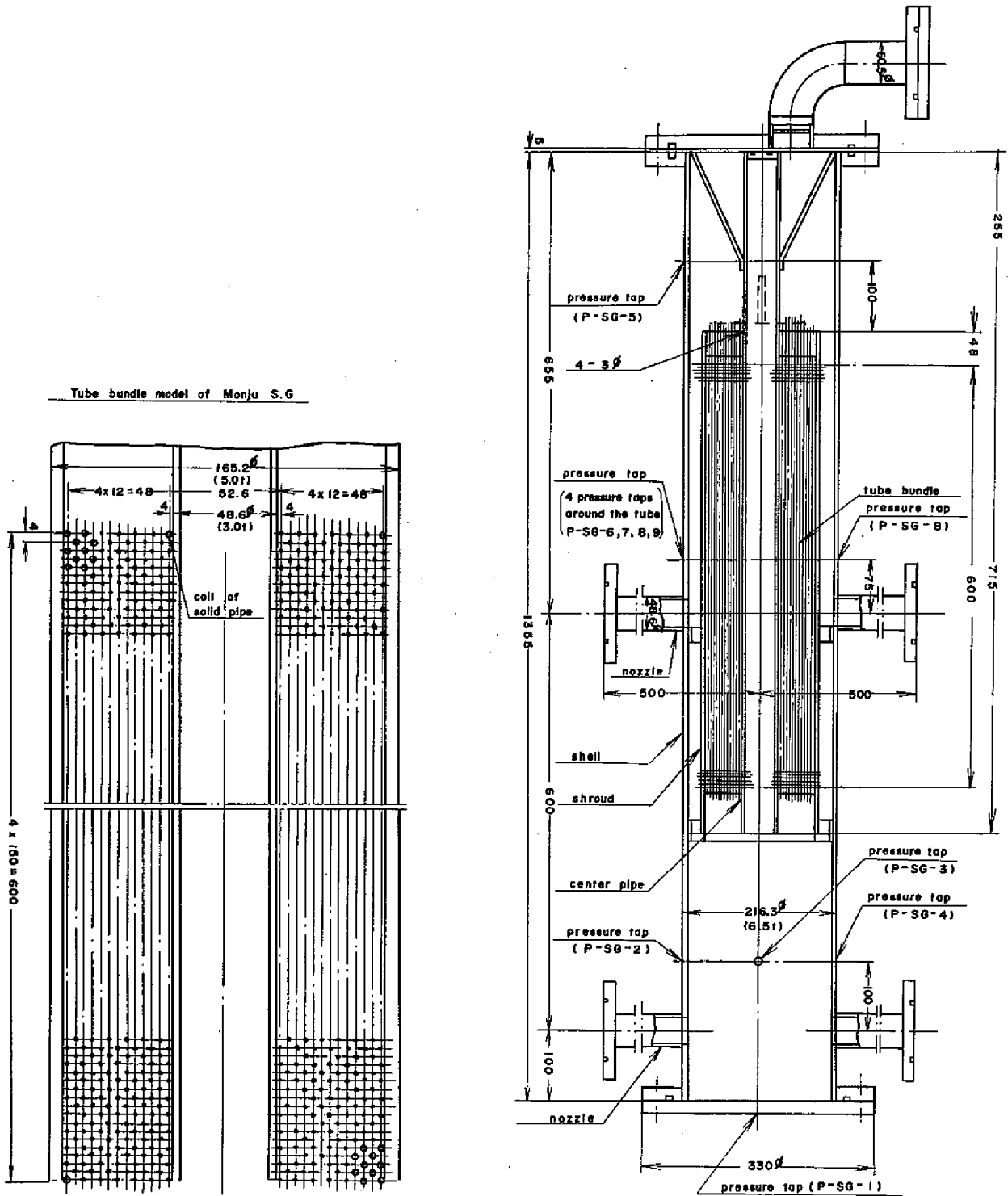


Fig. 2.3 Scaled Down Model of Steam Generator

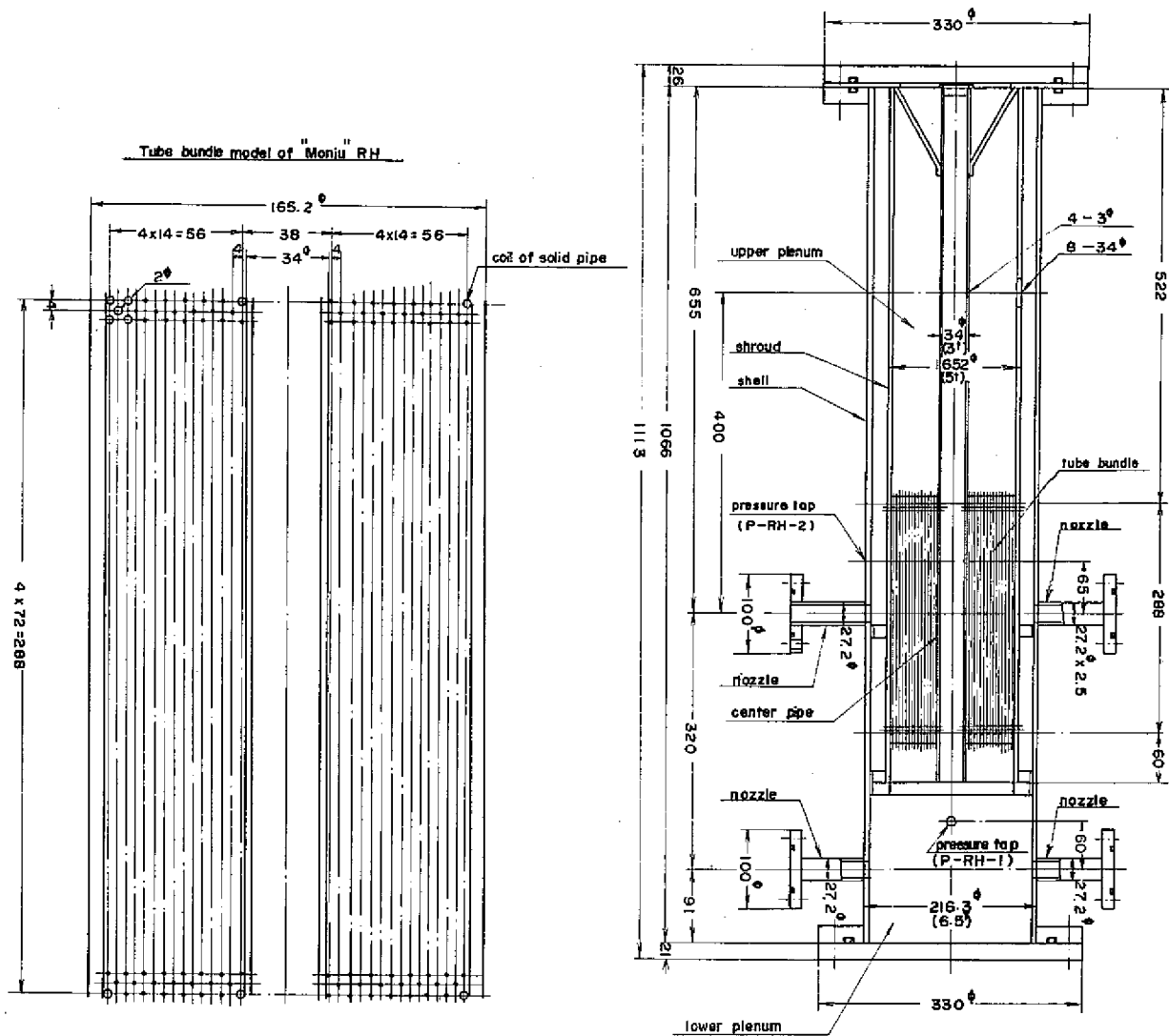
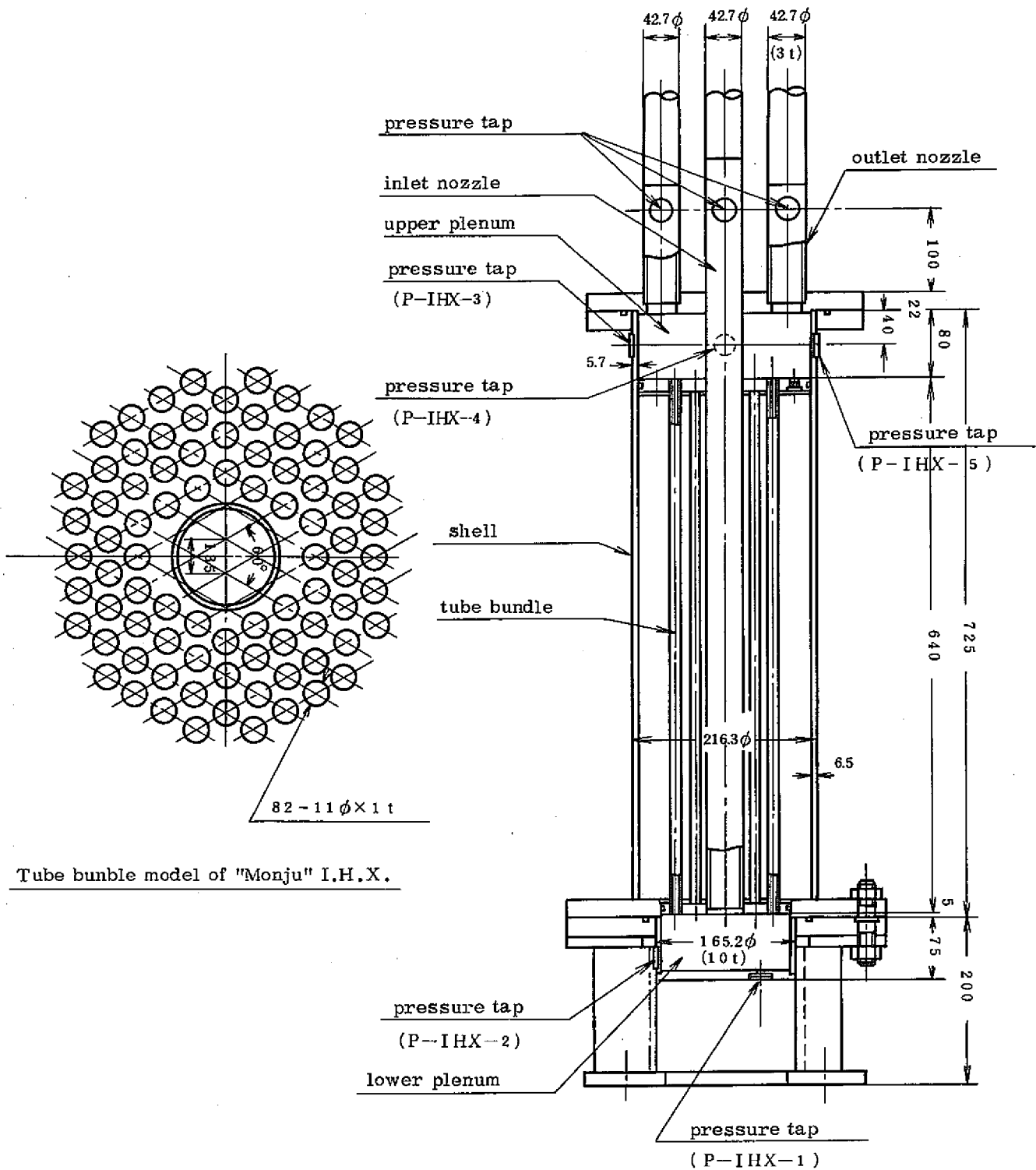


Fig. 2.4 Scaled Down Model of Reheater



Tube bundle model of "Monju" I.H.X.

Fig. 2.5 Scaled Down Model of Intermediate Heat Exchanger

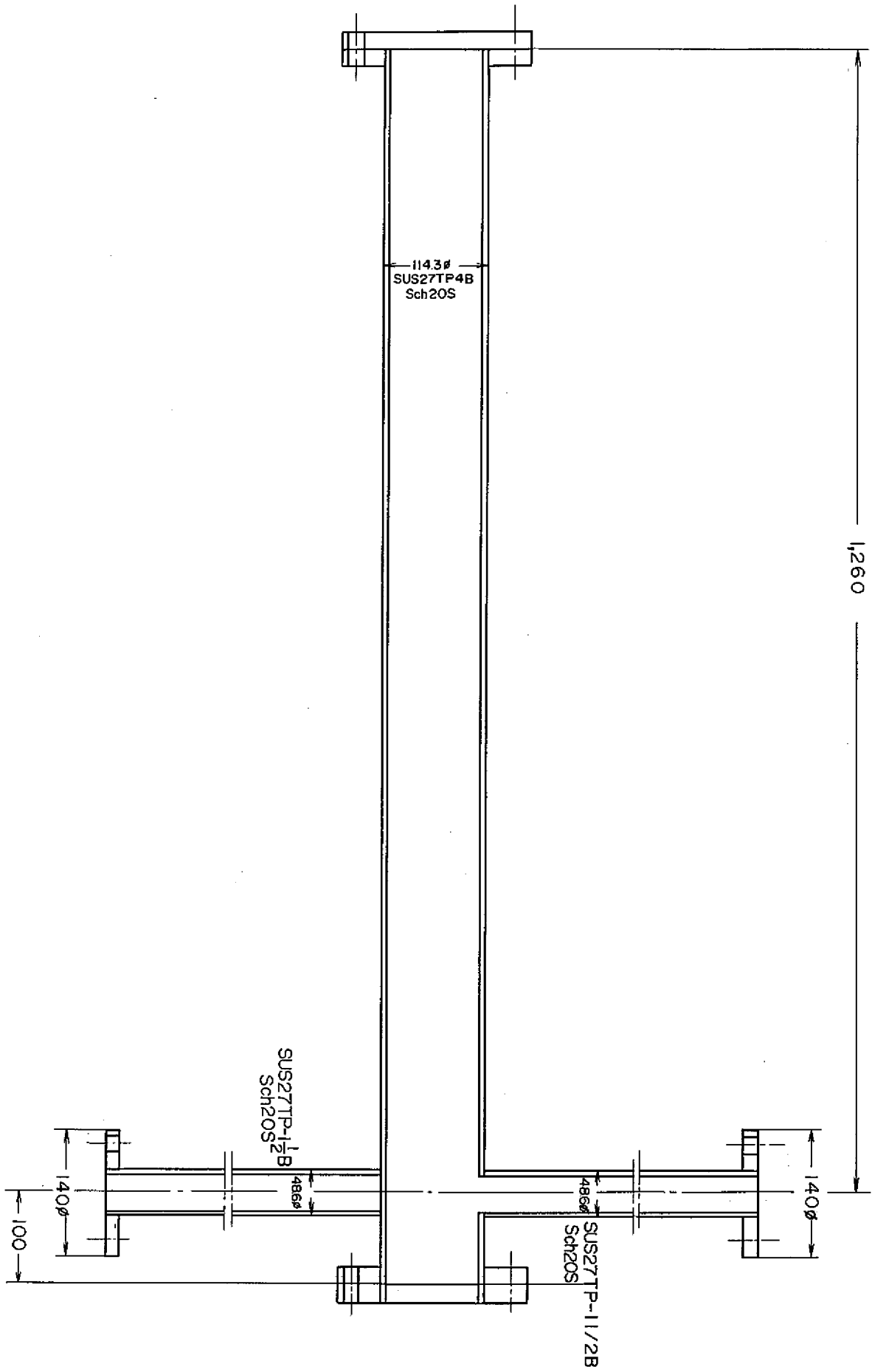


Fig. 2.6 Scaled Down Model of Expansion Tank

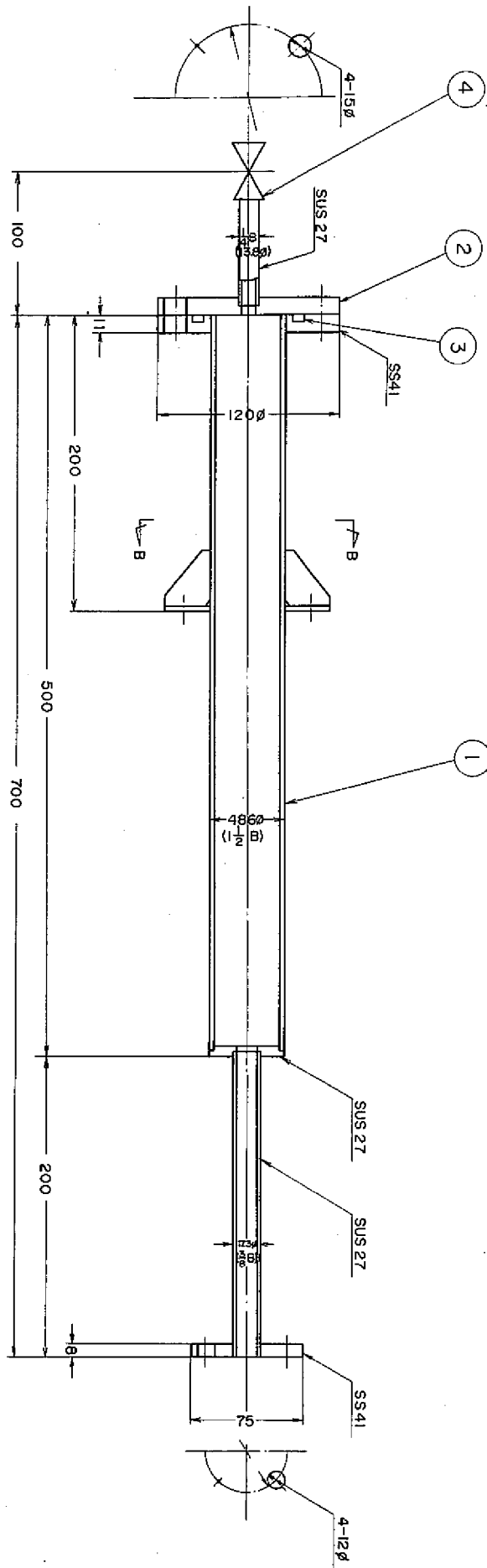
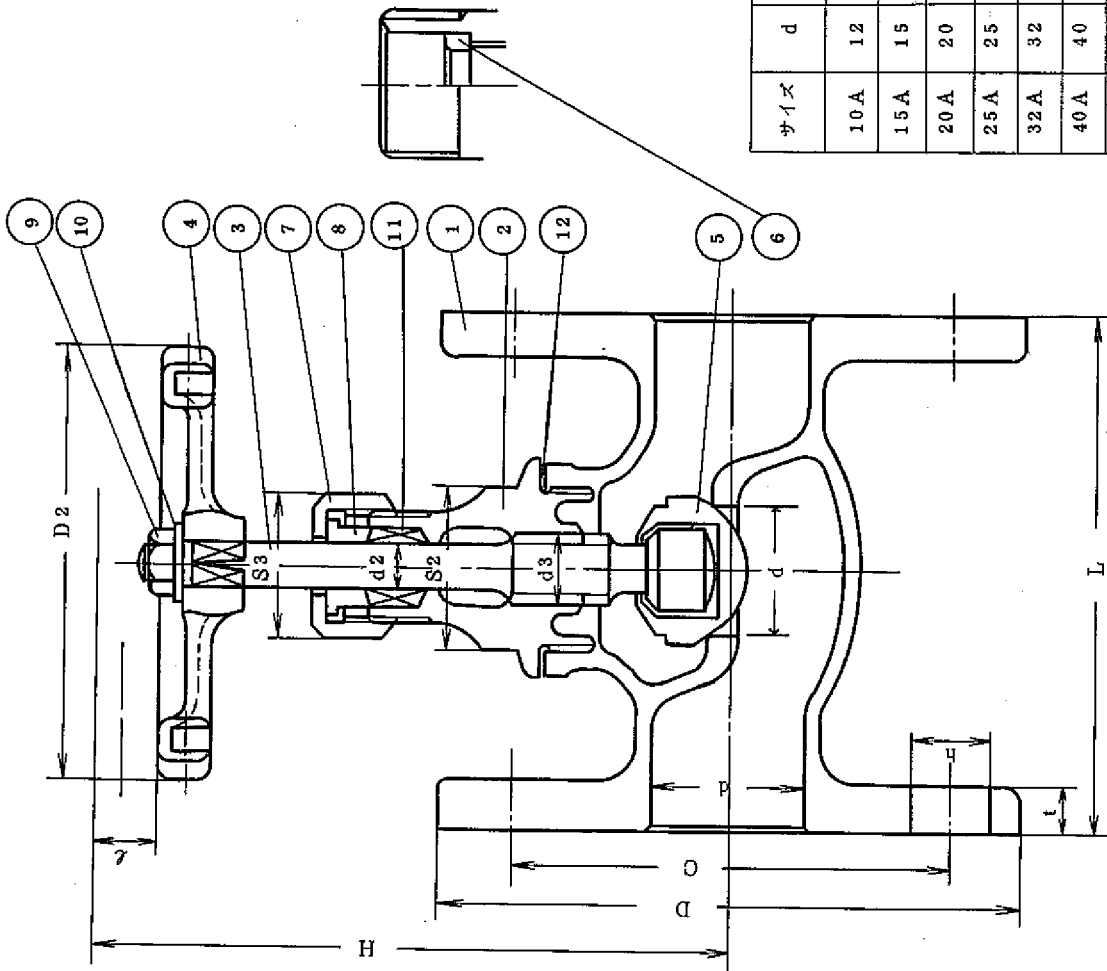


Fig. 2.7 Scaled Down Model of Overflow Column



サイズ	d	L	寸法				$d_2$	$d_3$	$S_2$	$S_3$	$D_3$	ℓ	H
			D	O	t	h × N							
10A	12	73	90	65	8	15 × 4	7.4	W3/8	19	19	55	9	89
15A	15	85	95	70	8	15 × 4	8.5	7/16	21	22	55	10	99
20A	20	95	100	75	9	15 × 4	9	1/2	23	24	65	12	109
25A	25	108	125	90	10	19 × 4	9.5	9/16	26	27	80	15	126
32A	32	120	135	100	11	19 × 4	11	T16	32	30	100	18	146
40A	40	135	140	105	12	19 × 4	11	16	38	30	100	21	158
50A	50	155	155	120	13	19 × 4	13.5	18	41	32	120	23	181

Fig. 2.8 Scale Down Model of Valve

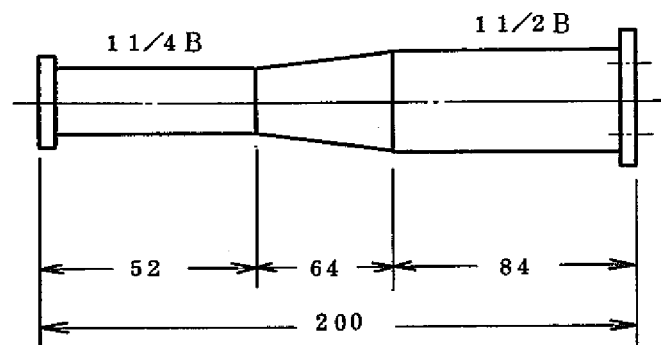
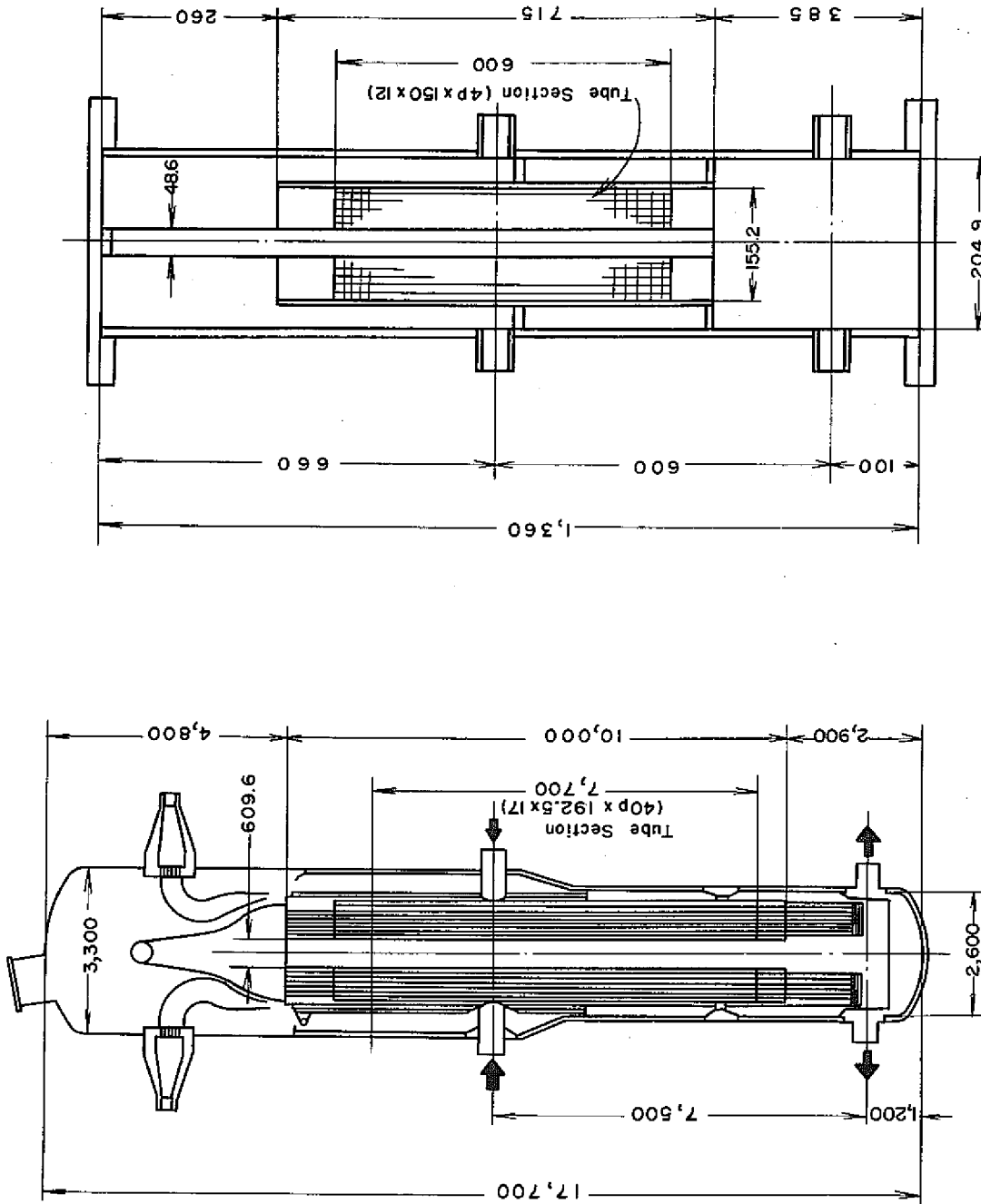


Fig. 2.9 Scaled Down Model of Reducer



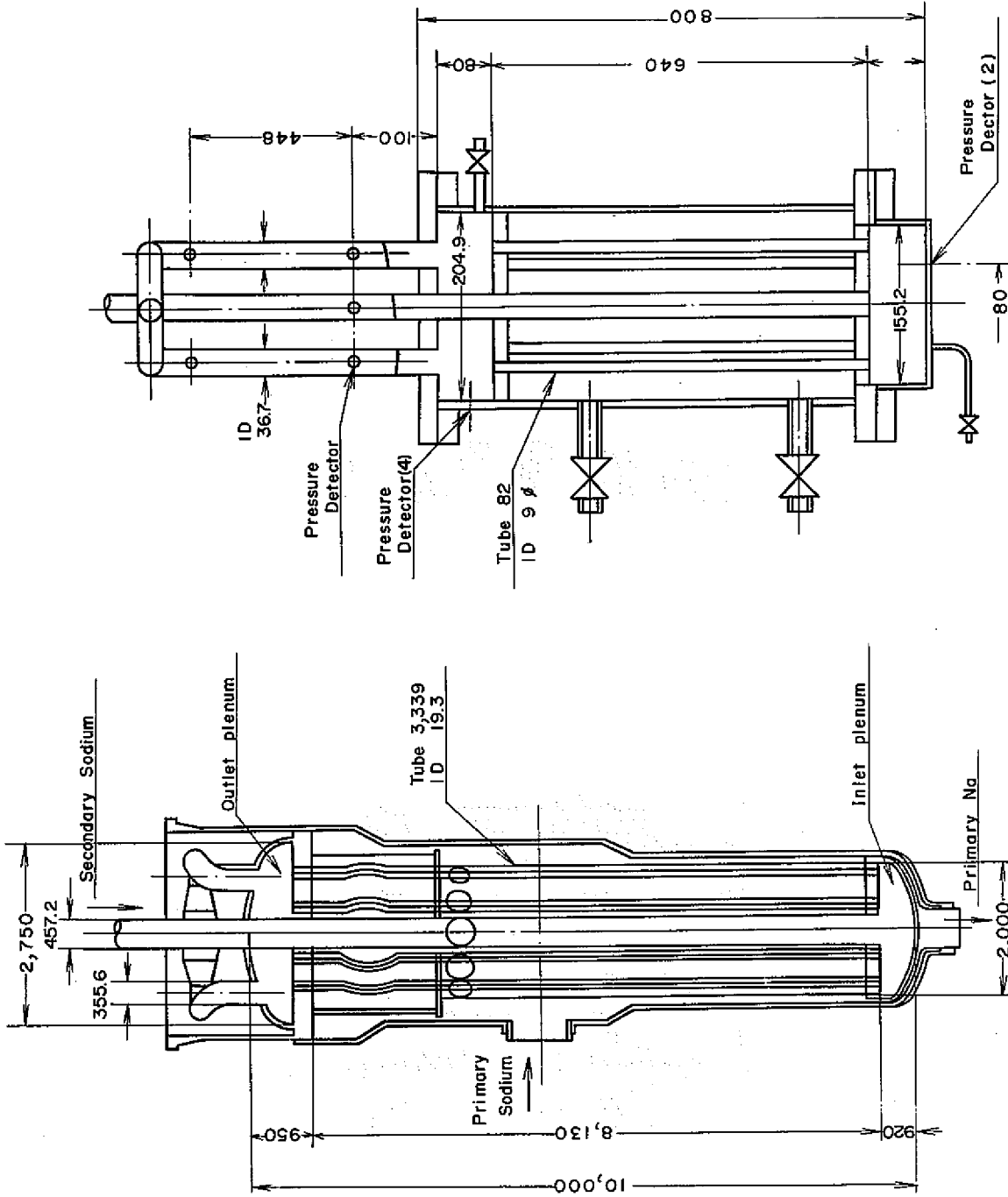
(b) Steam generator model

(a) MONJU SG (Primary design)

Fig. 2.10 Schematic Design of MONJU SG and Its 1/12.5 Scaled Down Model







(a) MONJU IHX

(b) IHX model

Fig. 2.12 Schematic Design of MONJU IHX and Its 1/12.5 Scaled Down Model

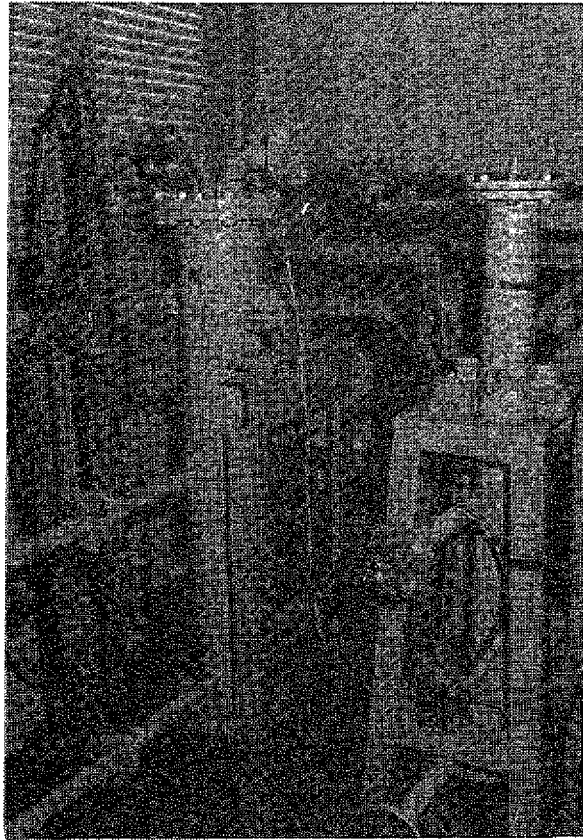


Fig. 2.13 S.G. Model

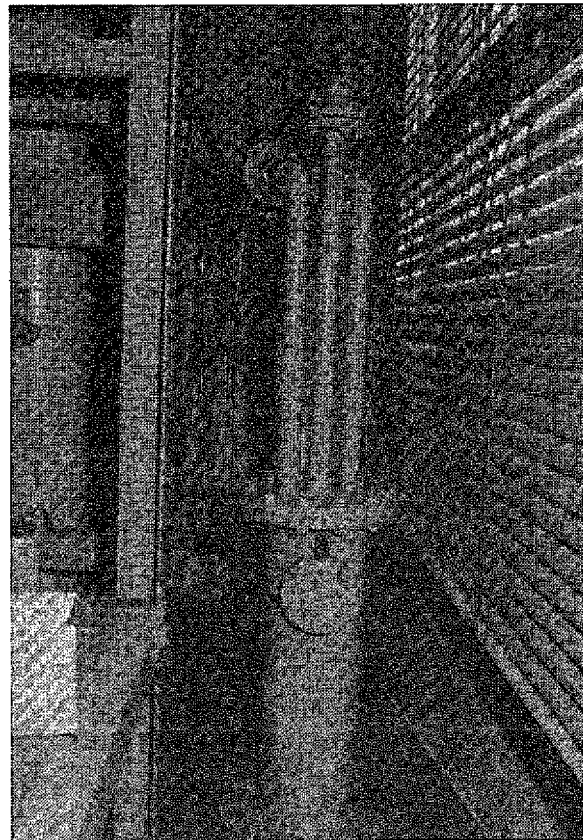


Fig. 2.14 I.H.X. Model

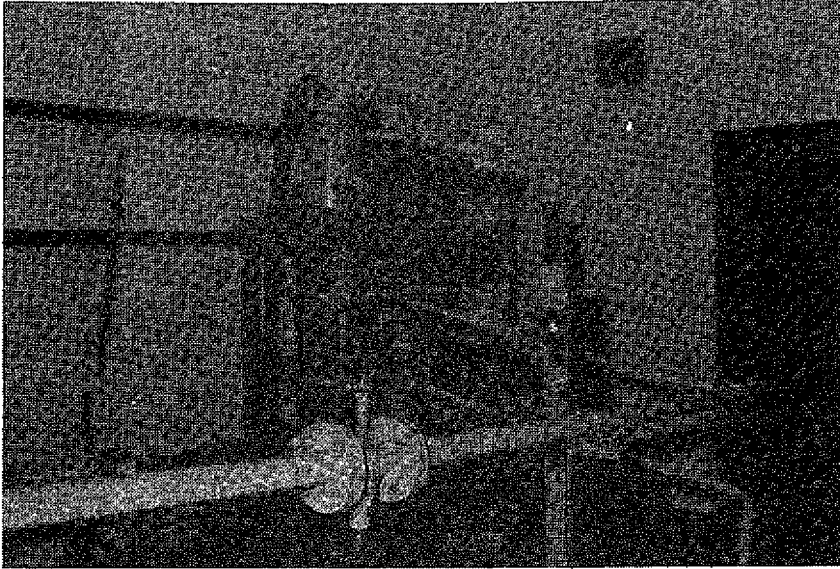


Fig. 2.15 R.H. Model

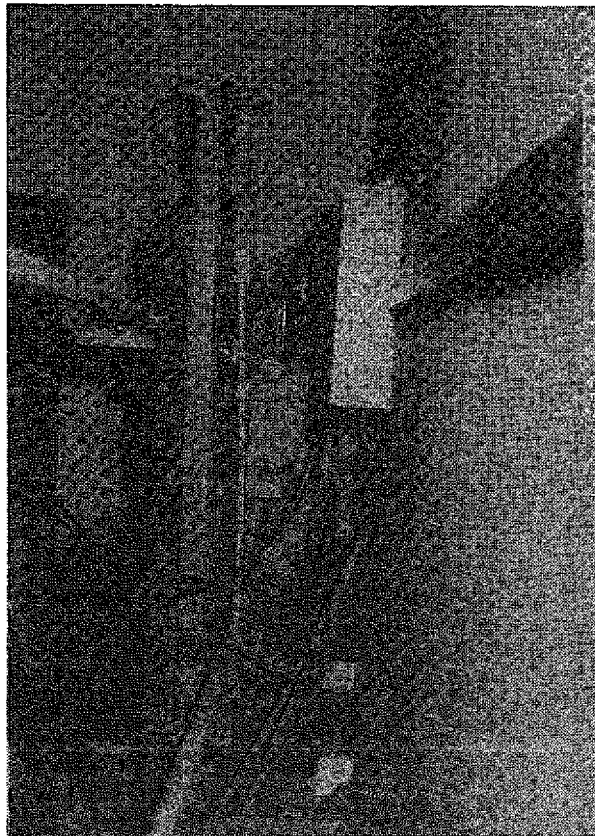


Fig. 2.16 Overflow Column Model

### 3. 実験結果

#### 3-1 圧力波測定結果

圧力波の測定個所を図3-1に示す。測定装置の制約上、すべての測定点での圧力波形を一度に測定する事ができなかった。従って、主として再熱器モデルのまわりの圧力波測定に主眼をおいた実験(HH-シリーズ)、中間熱交換器モデルのまわりの圧力波測定に主眼をおいた実験(HI-シリーズ)、蒸気発生器入口配管(上部配管)に主眼をおいた実験(HK-シリーズ)、蒸気発生器出口配管(下部配管)に主眼をおいた実験(HL-シリーズ)にわけてそれぞれの実験を行なった。各実験シリーズにつき、入力圧力の大きさを約 $2\text{Kg/cm}^2\cdot\text{g}$ 、 $4.5\text{Kg/cm}^2\cdot\text{g}$ 、 $7\text{Kg/cm}^2\cdot\text{g}$ 、の3種類にかえ、それぞれの入力圧力につき最低2回の実験を行なった。

図3-2～図3-3にHHシリーズの測定結果の1例を示す。図3-4～図3-6にHIシリーズの測定結果の1例を示す。図3-7～図3-8にHKシリーズの測定結果の1例を示す。図3-9～図3-10にHLシリーズの測定結果を示す。

上述の如く、二次系モデルループ全体にわたっての圧力変動の測定を同時に行なうことは実験装置の制限上できなかった。しかしながら、PG-7、PG-11での測定波形は実験シリーズによりそれ程大きな相違はなかった。従って、各実験シリーズの結果から、PG-7、PG-11での圧力変動がほぼ同じ実験結果を選択し、二次系モデルループの代表的な点における圧力変動の比較を行なったのが、図3-11(a)、および図3-11(b)である。図から明らかな様に、二次系主配管中での圧力変動は、蒸気発生器出入口ノズルでの圧力変動と同程度であり、圧力変動の大きさが最も小さくなる中間熱交換器近辺でも蒸気発生器出入口ノズルでの圧力変動の約 $1/2$ 程度である。主ループのバイパスラインに設けられている再熱器近辺においては、主配管中の圧力変動より小さく、再熱器出入口ノズルにおける圧力変動の大きさは蒸気発生器出入口ノズルでの値の約 $1/4$ 、再熱器内部では、約 $1/50$ である。

#### 3-2 圧力波伝播速度

図3-12に圧力波伝播速度の測定結果を示す。(図には、第2報の結果、第3報の結果も併せて記してある。)圧力波の伝播速度は、2つの圧力波測定点を圧力波の立上り点、または、最初のピーク値が通過するのに必要な時間( $\Delta t$ )と2つの測定点の距離( $l$ )から求めた。

圧力波の伝播速度  $(V) = l / \Delta t$

ところで、配管中を伝わる圧力波の伝播速度は、配管の弾性等を考慮した Allievi の式によって理論的に求められる。

$$V = \sqrt{\frac{1}{\frac{w}{g} \left( \frac{1}{K} + \frac{CD}{Ee} \right)}} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、

- $V$  ; 圧力波の伝播速度 (m/s)
- $w$  ; 流体の比重量 (Kgf/m<sup>3</sup>)
- $g$  ; 重力加速度 (=9.8 m/sec<sup>2</sup>)
- $D$  ; 配管の直径 (m)
- $e$  ; 配管の肉厚 (m)
- $K$  ; 流体の体積弾性係数 (Kgf/m<sup>2</sup>)
- $E$  ; 配管材料の縦弾性係数 (Kgf/m<sup>2</sup>)

$C$  は管の固定条件によって決まる定数で、管の上端のみが固定されている時は

$$C_1 = \frac{5}{4} - \mu$$

管の全長にわたり縦方向の移動ができない様に固定されている場合は

$$C_2 = 1 - \mu^2$$

である。本実験装置は主要な機器は床面上にボルトで固定されており、配管の各部もサポートで支持されている。従って、両者の中間の固定条件と考えられるが、 $C_1 = \frac{5}{4} - \mu$  の値を使用した。しかし、 $C$  の値としてどちらの値を使用しても計算結果に大きな差はない。

実験結果は、いずれも平均値の±5%以内に入っており、実験結果の平均値と(3.1)式で求めた計算値は非常に良く一致している。また、圧力波測定点 PG-7、又は、PG-11 から、他の測定点まで圧力波が伝播するのに要する所要時間の実験値、及び、理論値との比較を図 3-13 に示す。図で、PG-24、PG-27、PG-30、PG-33、PG-34、PG-65、PG-74、PG-94、PG-98 の点の所要時間は、PG-7 からの所要時間をあらわし、PG-53、PG-50、PG-86、PG-78、PG-47、PG-41、PG-34 の点の所要時間は、PG-11 を基準とした所要時間をあらわす。実験値と理論値は±6%以内の精度で一致している。例えば、PG-78 と PG-11、PG-98 と

PG-11の間には、バルブ、レデューサー、異径パイプが含まれているが、その様な場合でも実験値と理論値は良く一致している。このことは、また、本実験において、圧力波伝播媒体中（水中）に空気泡の混入等が無かった事をも示していると言える。





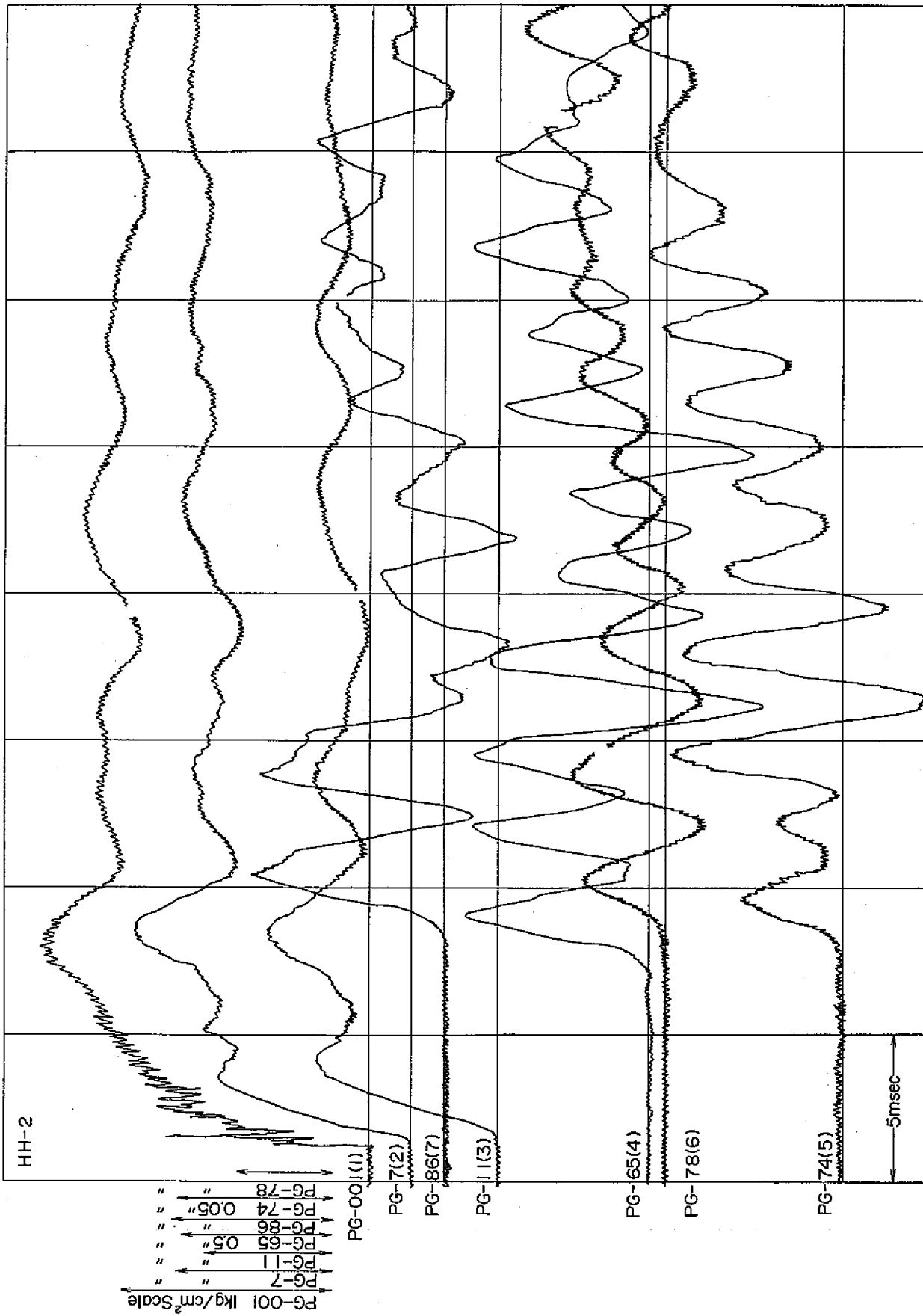


Fig. 3.2 Experimental Data by Secondary Loop (R.H.)

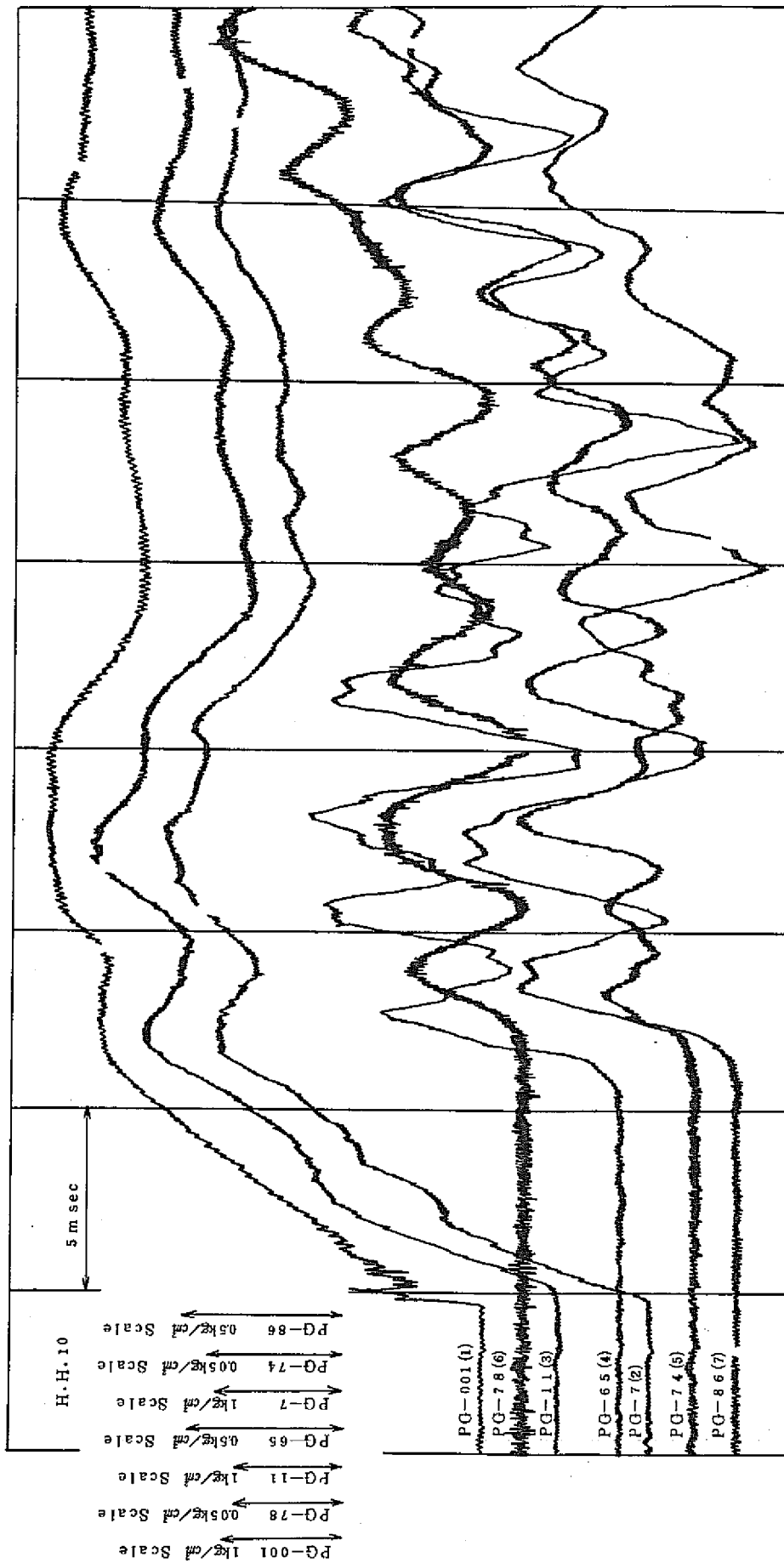


Fig. 3.3 Experimental Data by Secondary Loop (R.H.)

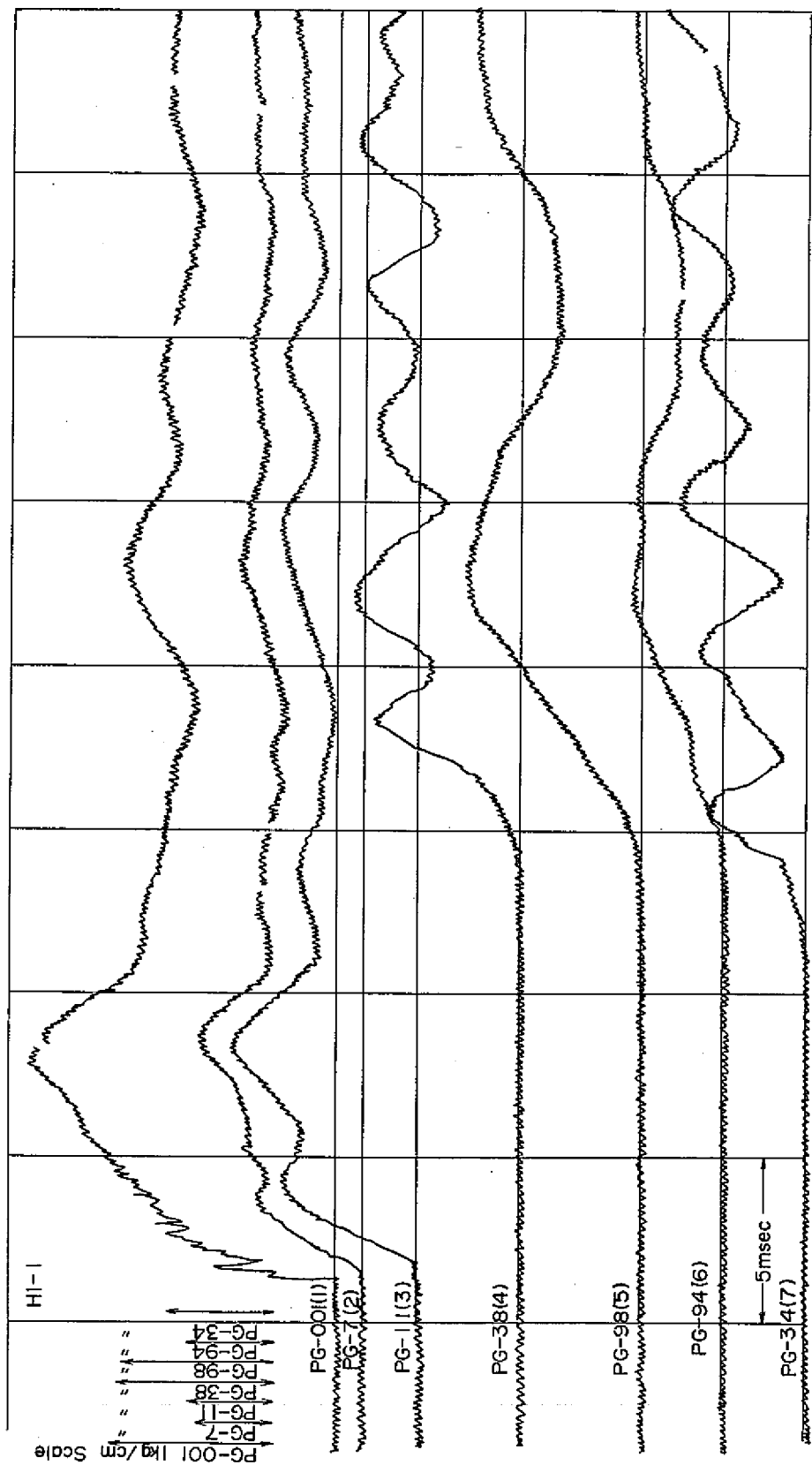


Fig. 3.4 Experimental Data by Secondary Loop (I.H.X.)

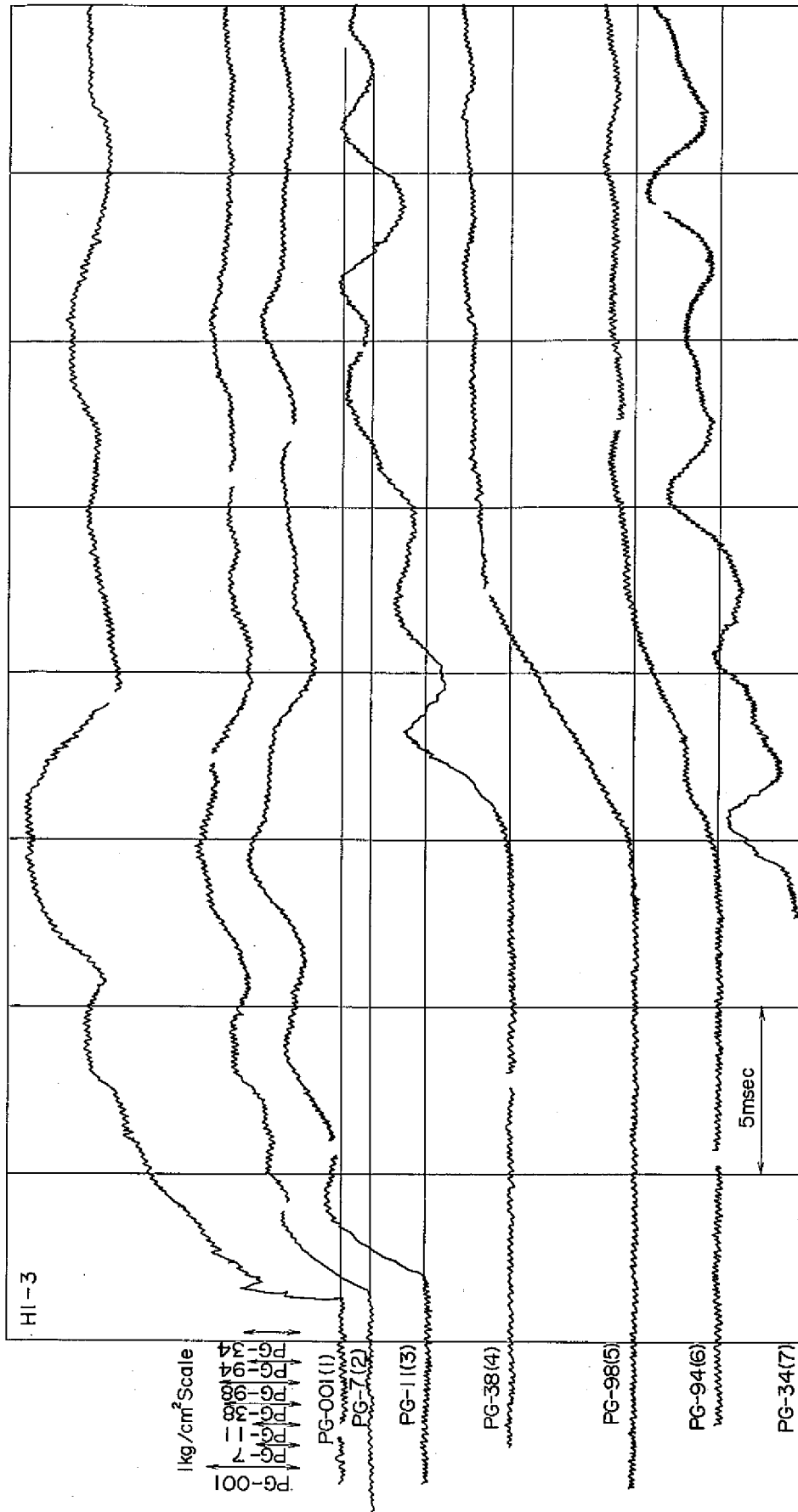


Fig. 3.5 Experimental Data by Secondary Loop (I.H.X.)

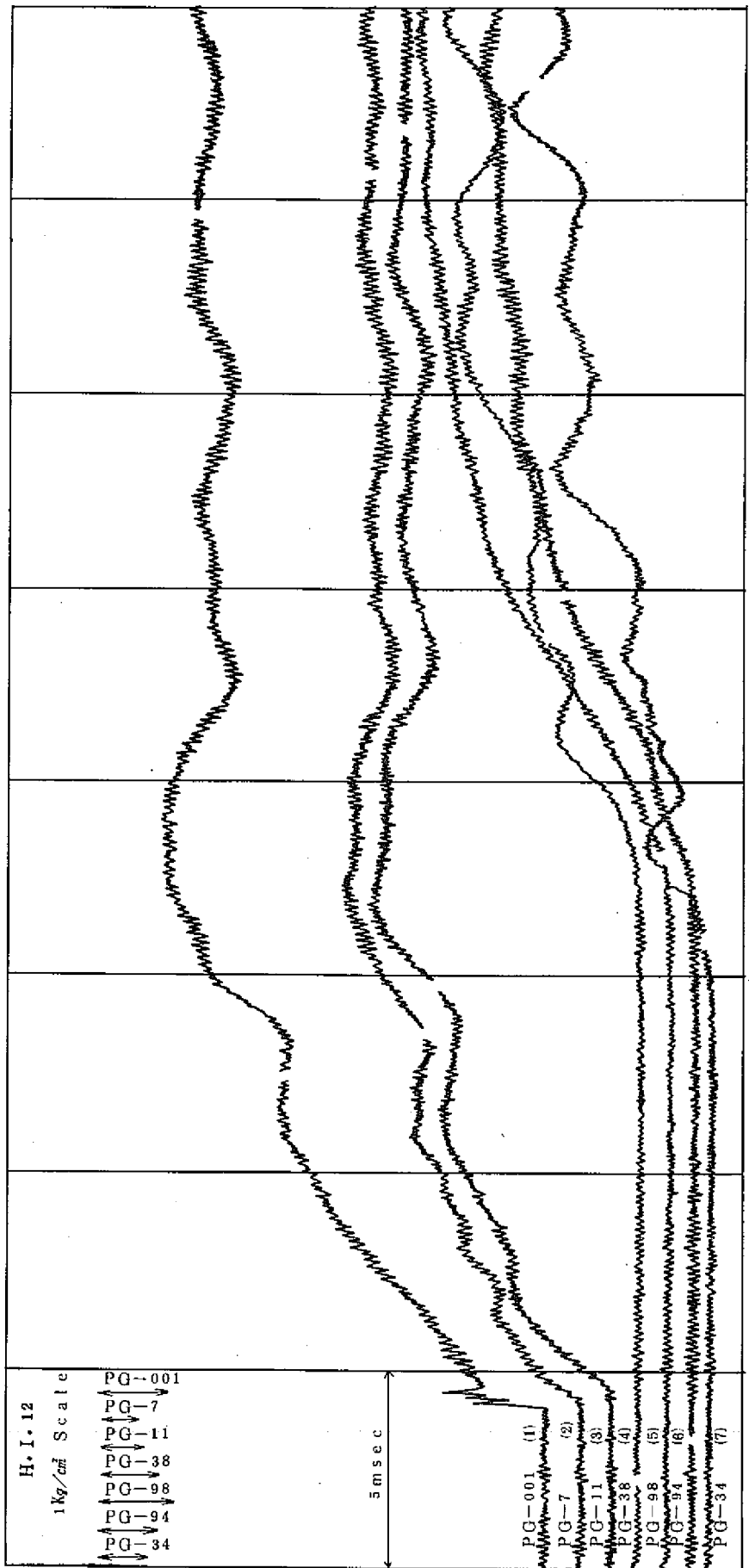


Fig. 3.6 Experimental Data by Secondary Loop (I.H.X.)

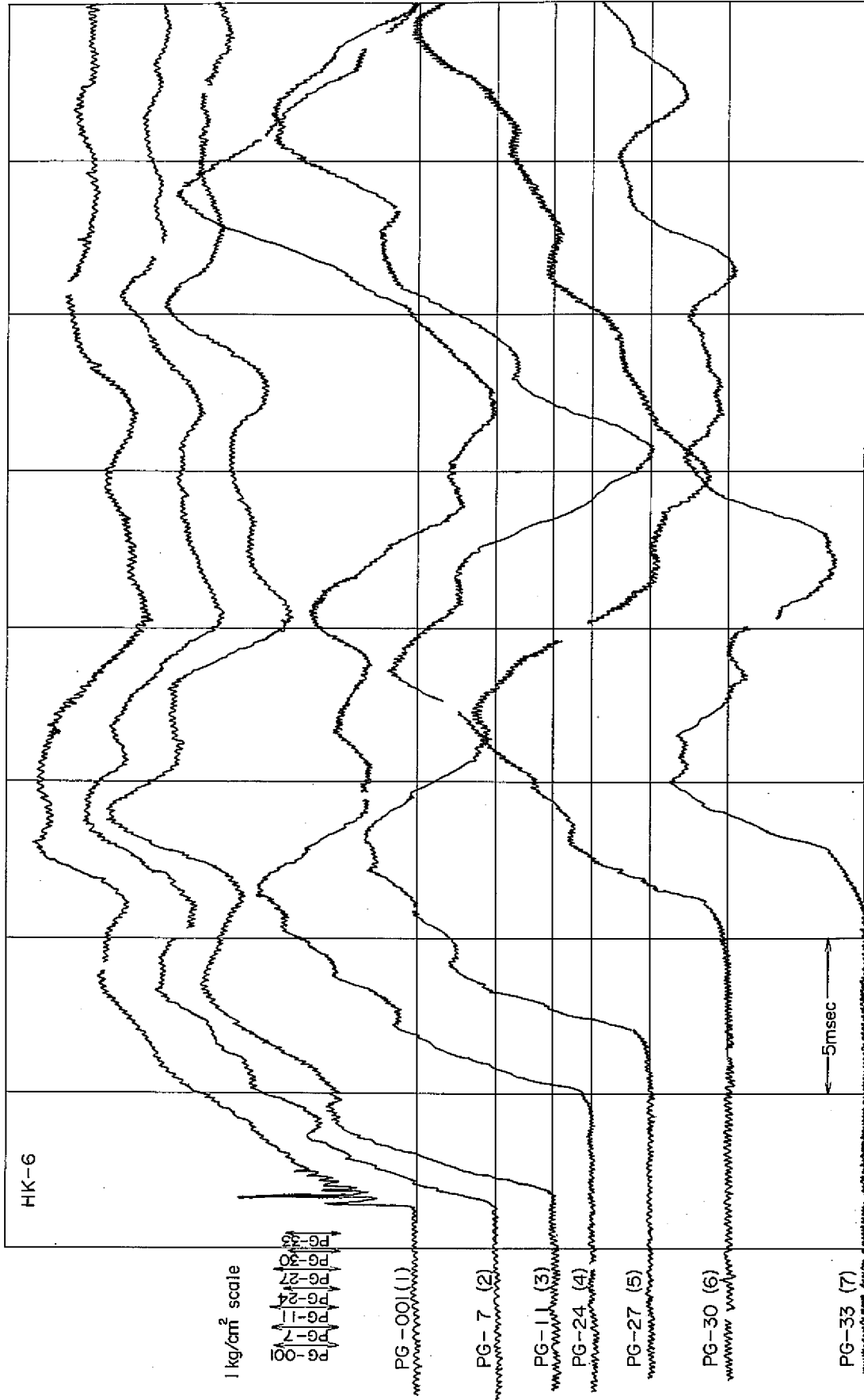


Fig. 3.7 Experimental Data by Secondary Loop (Upper Piping)

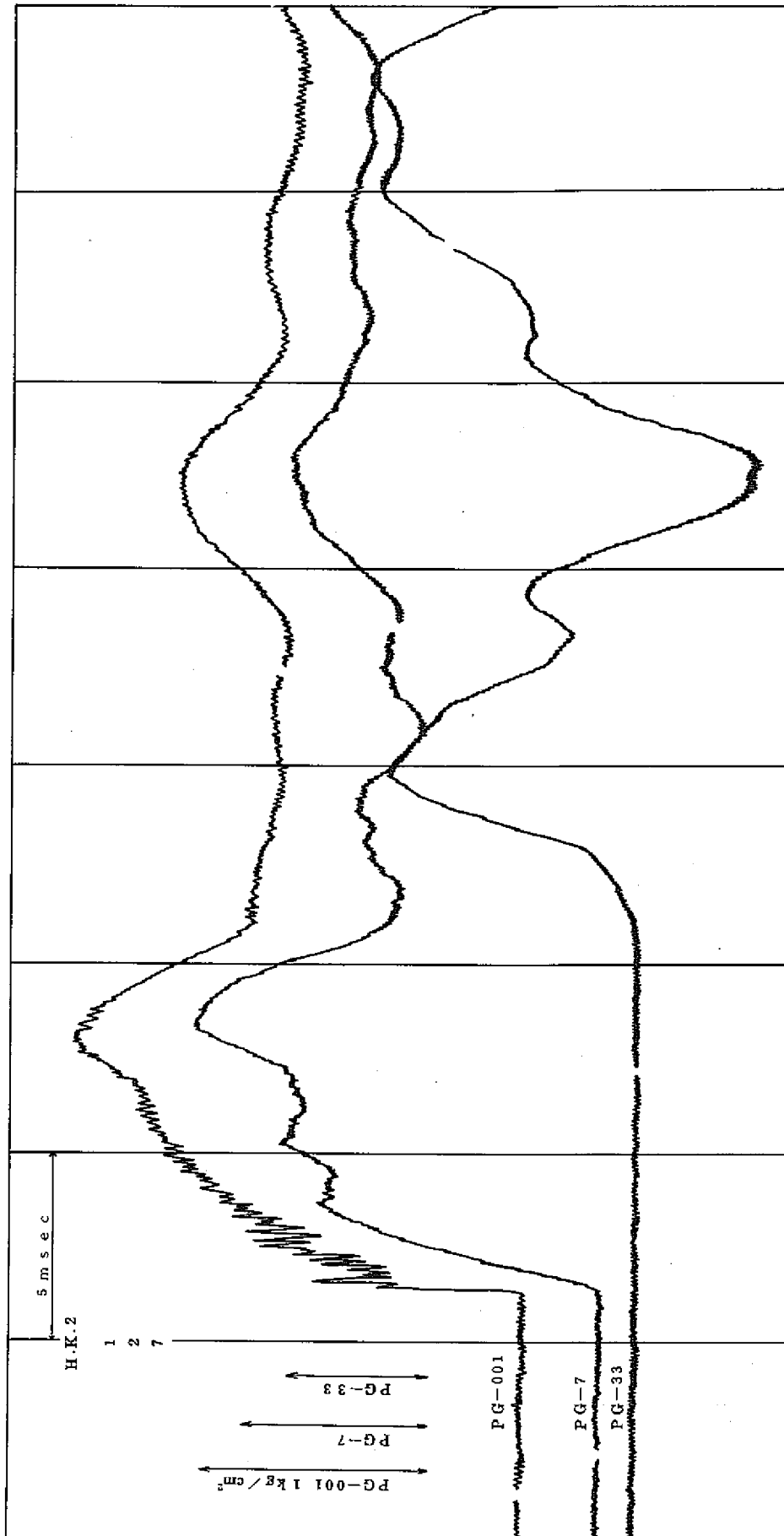


Fig. 3.8(a) Experimental Data by Secondary Loop (Upper Piping)

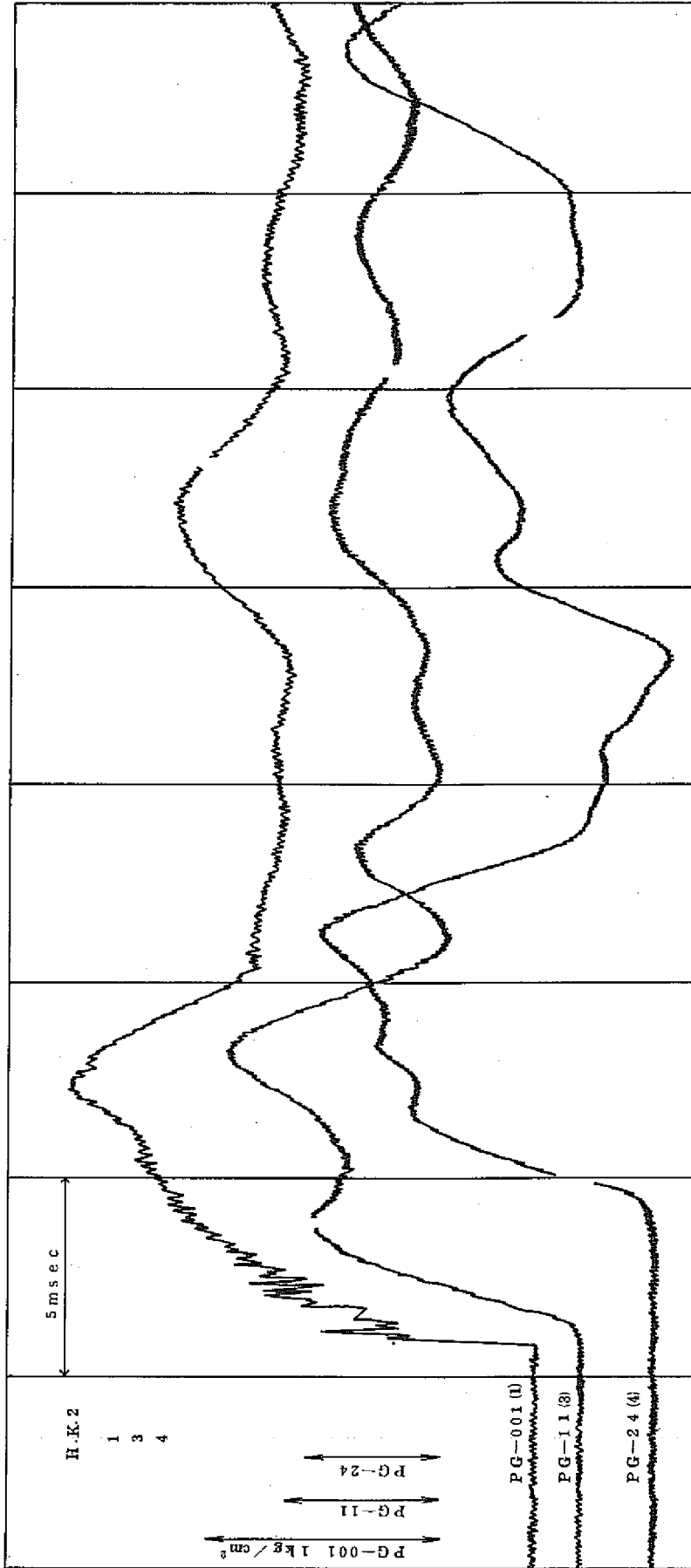


Fig. 3.8(c) Experimental Data by Secondary Loop (Upper Piping)



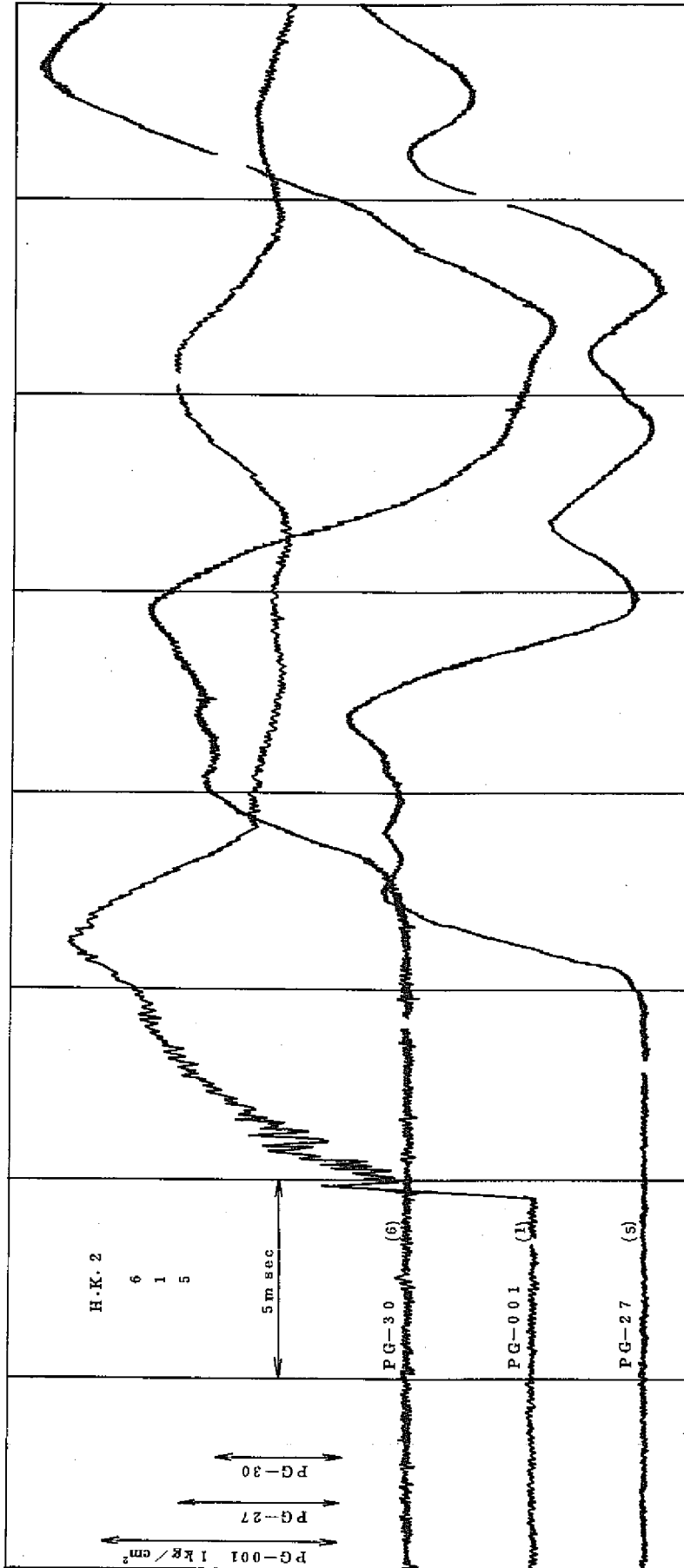
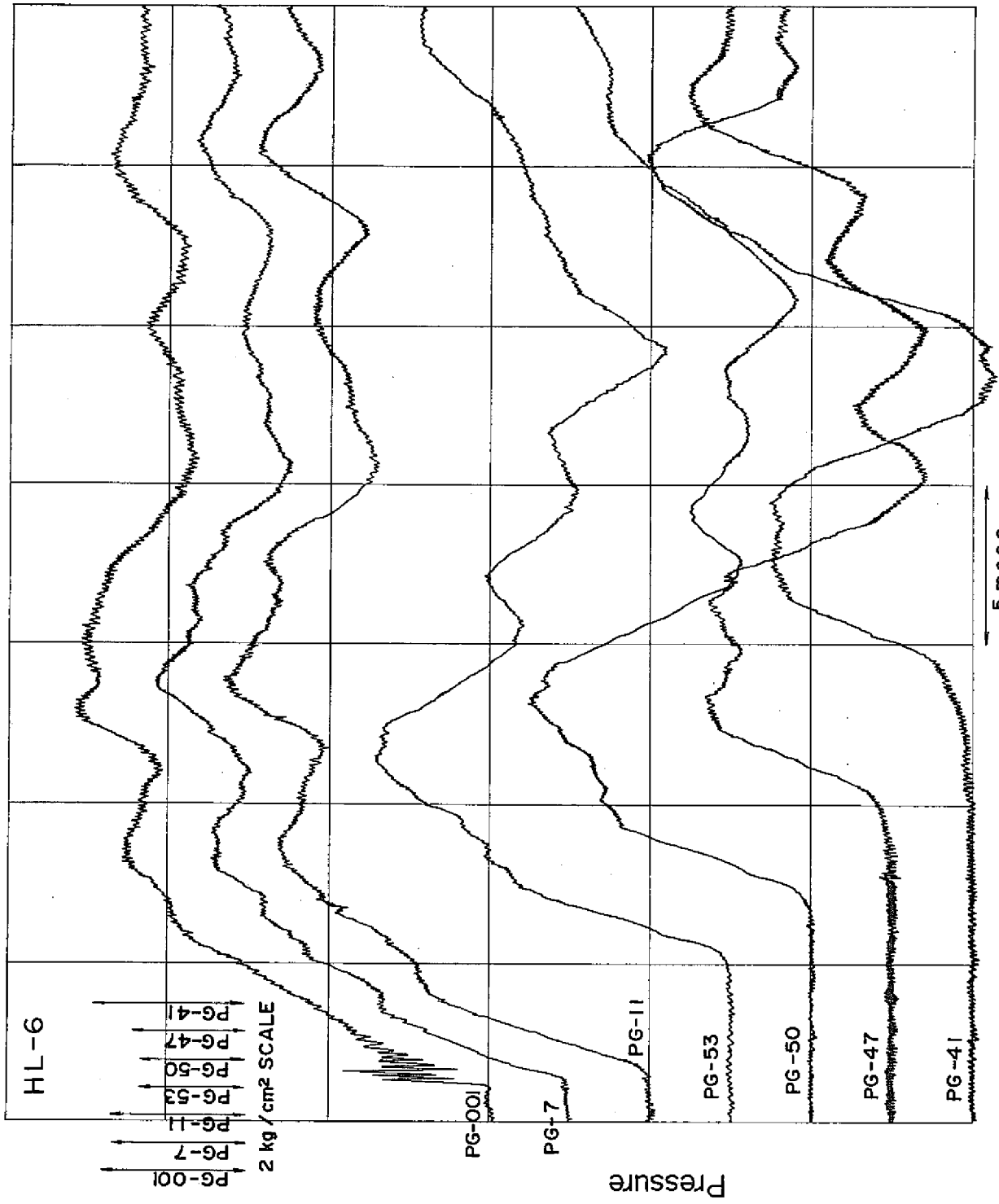


Fig. 3.8(c) Experimental Data by Secondary Loop(Upper Piping)



Time  
5 msec  
Fig. 3.9 Experimental Data by Secondary Loop (Lower Piping)

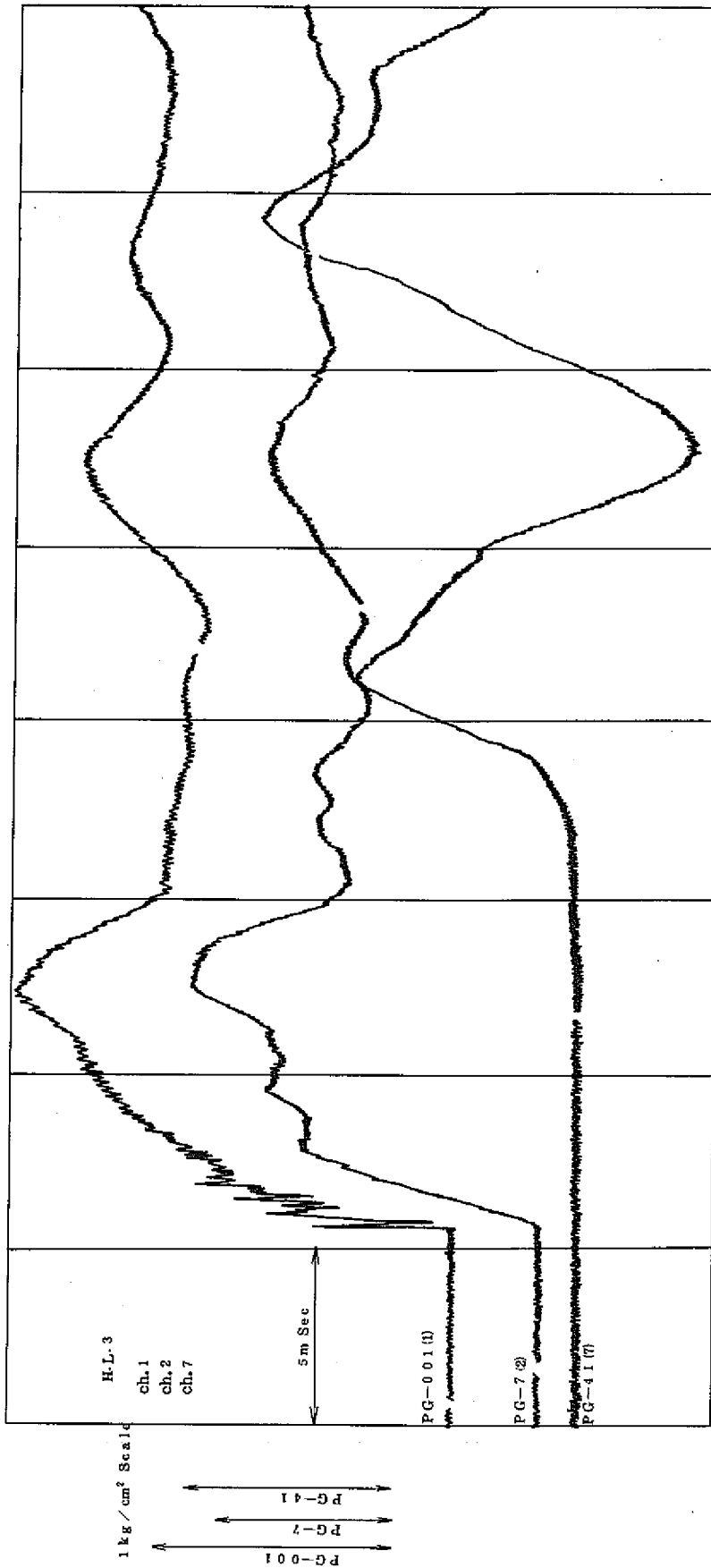


Fig. 3.10(a) Experimental Data by Secondary Loop (Lower Piping)

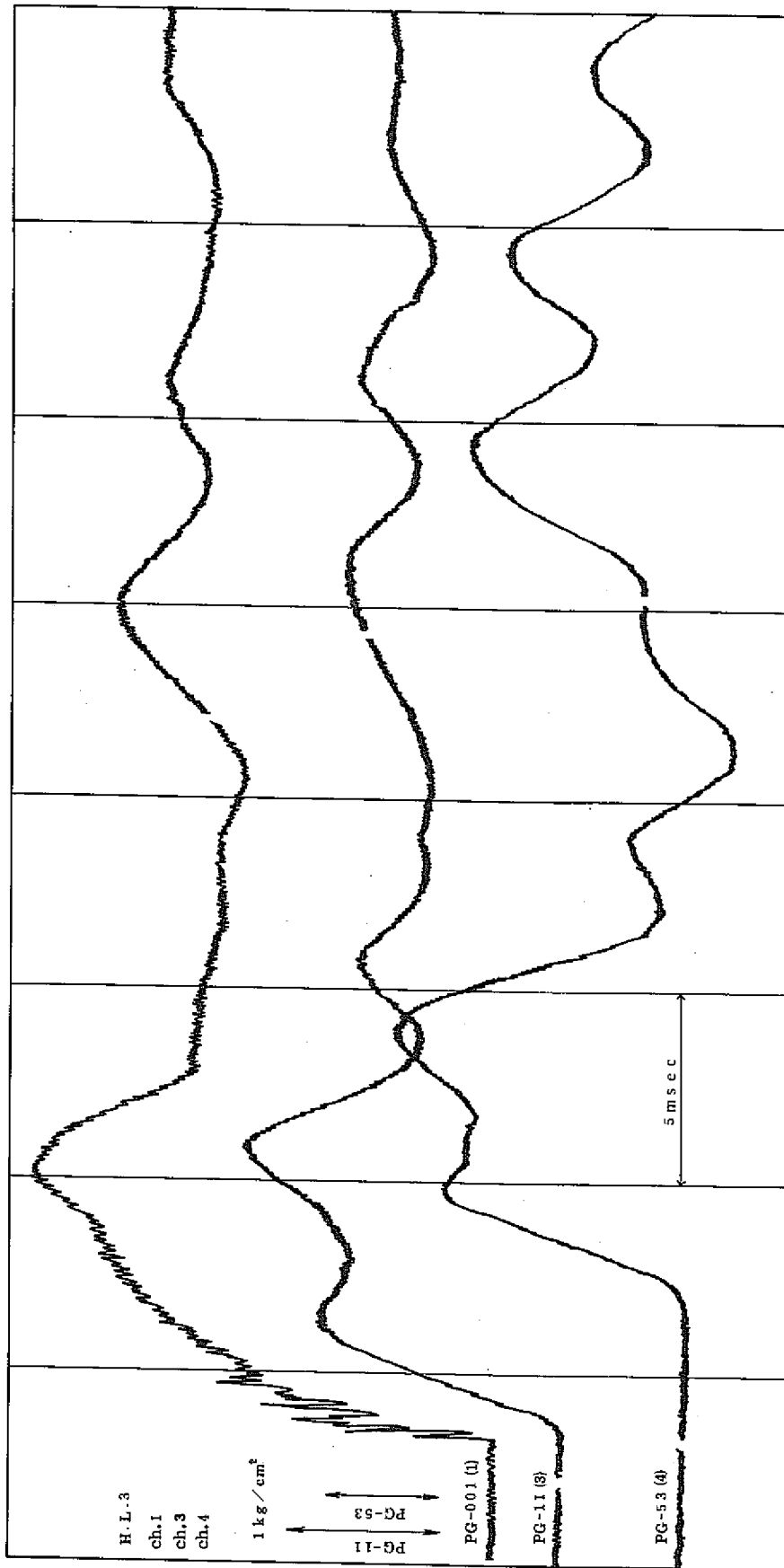


Fig. 3.10(b) Experimental Data by Secondary Loop (Lower Piping)

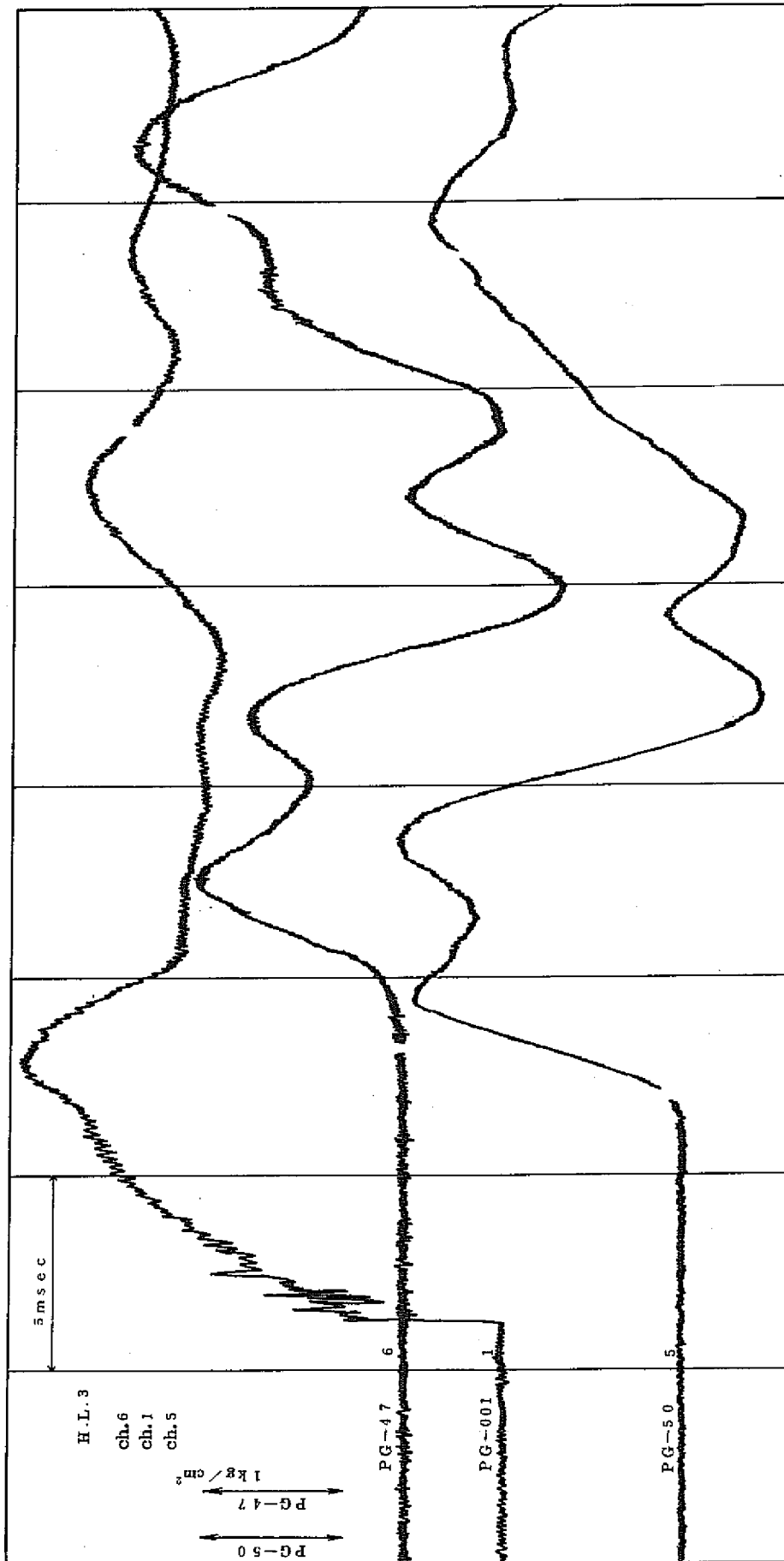


Fig. 3.10(c) Experimental Data by Secondary Loop (Lower Piping)

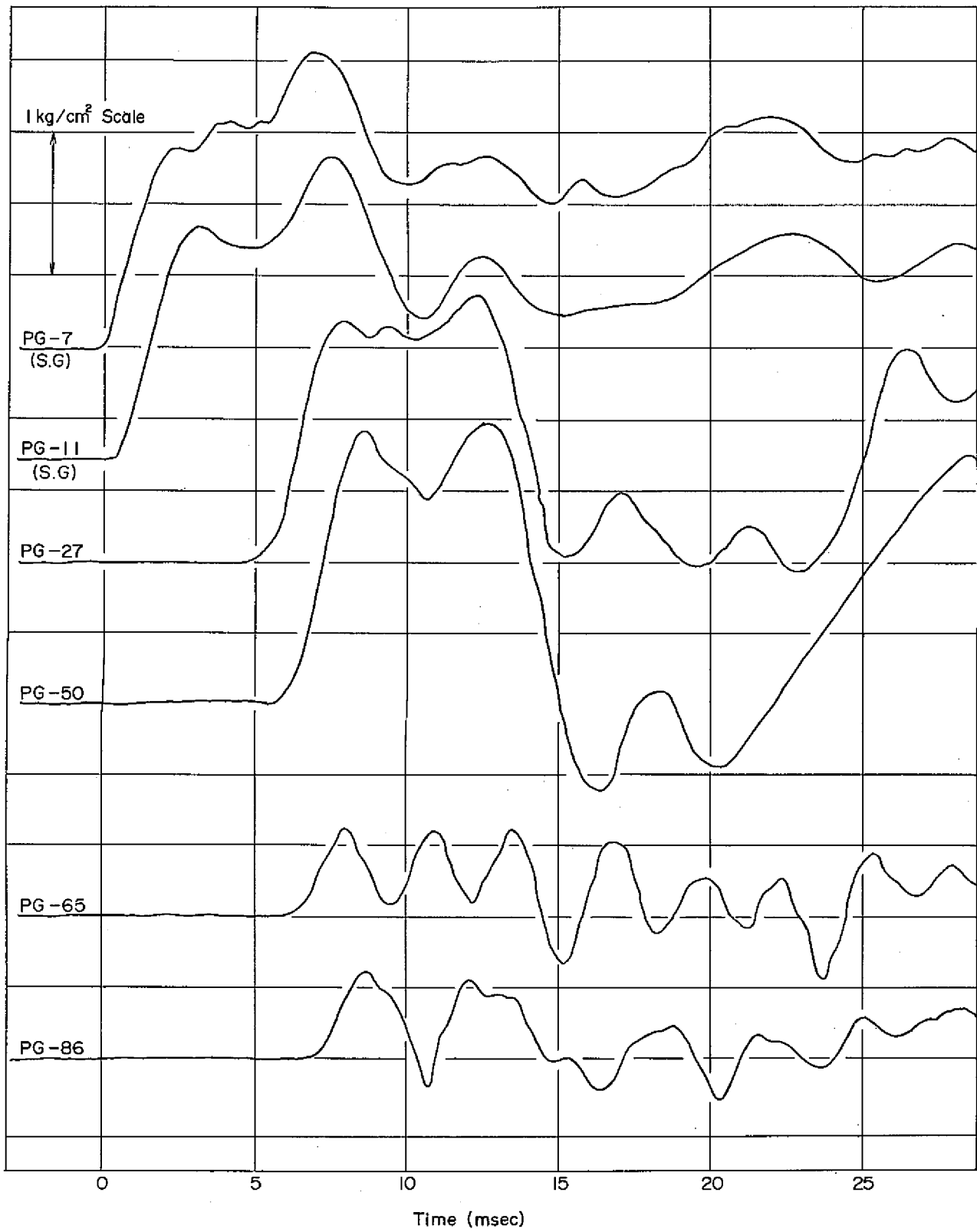


Fig. 3.11(a) Experimental Data by Secondary Loop

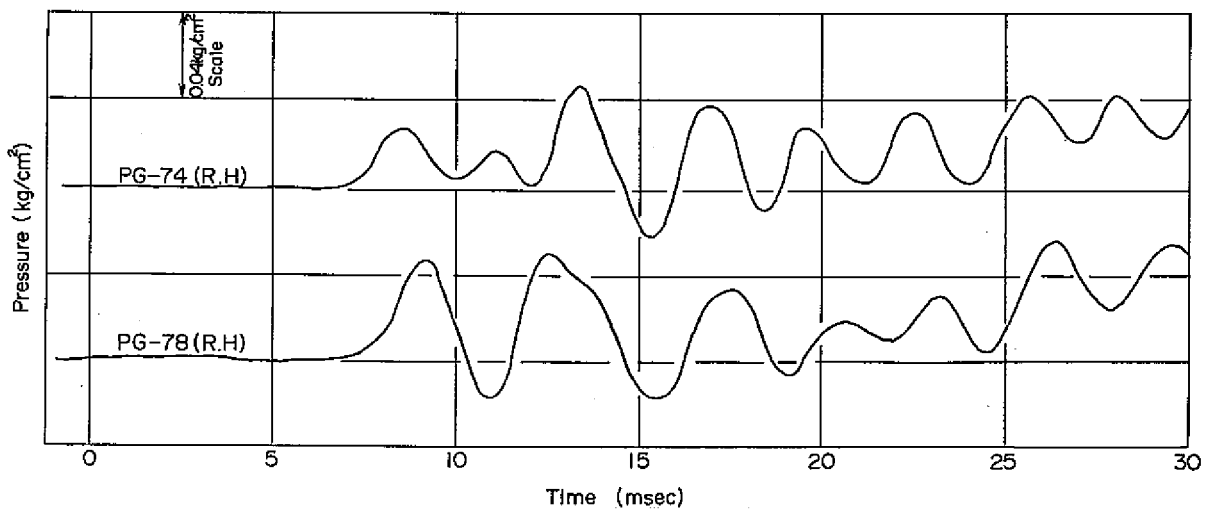
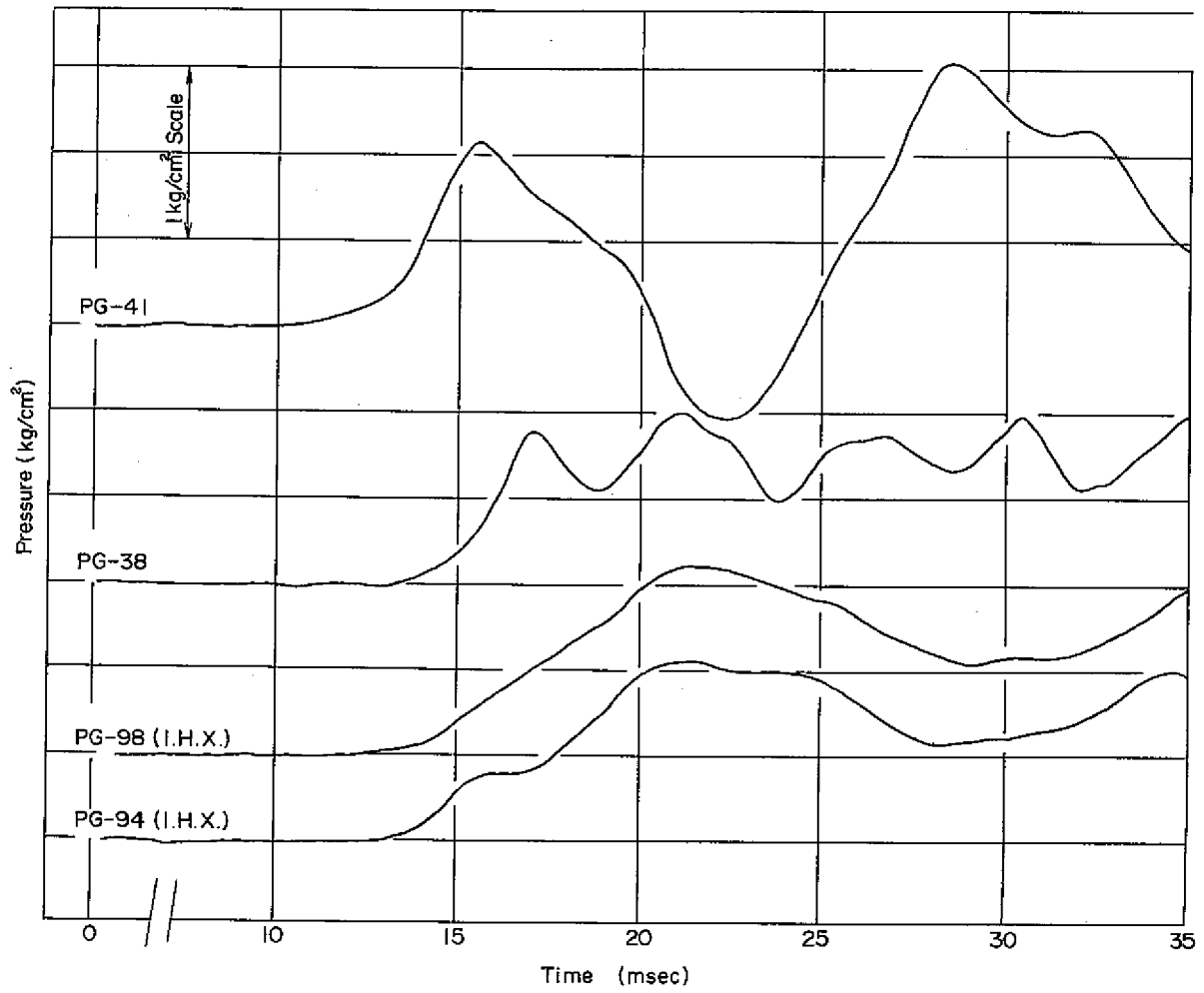


Fig. 3.11(b) Experimental Data by Secondary Loop

Sign	Legend	Temp. of water	wave velocity [eq(1)]	wave velocity (average value)
A	I.H.X. model test	18°C	1381 <sup>m</sup> /sec	1379 <sup>m</sup> /sec
B	S.G. model test	25°C	1385 <sup>m</sup> /sec	1380 <sup>m</sup> /sec
C	Secondary loop model test	25°C	1385 <sup>m</sup> /sec	1401 <sup>m</sup> /sec

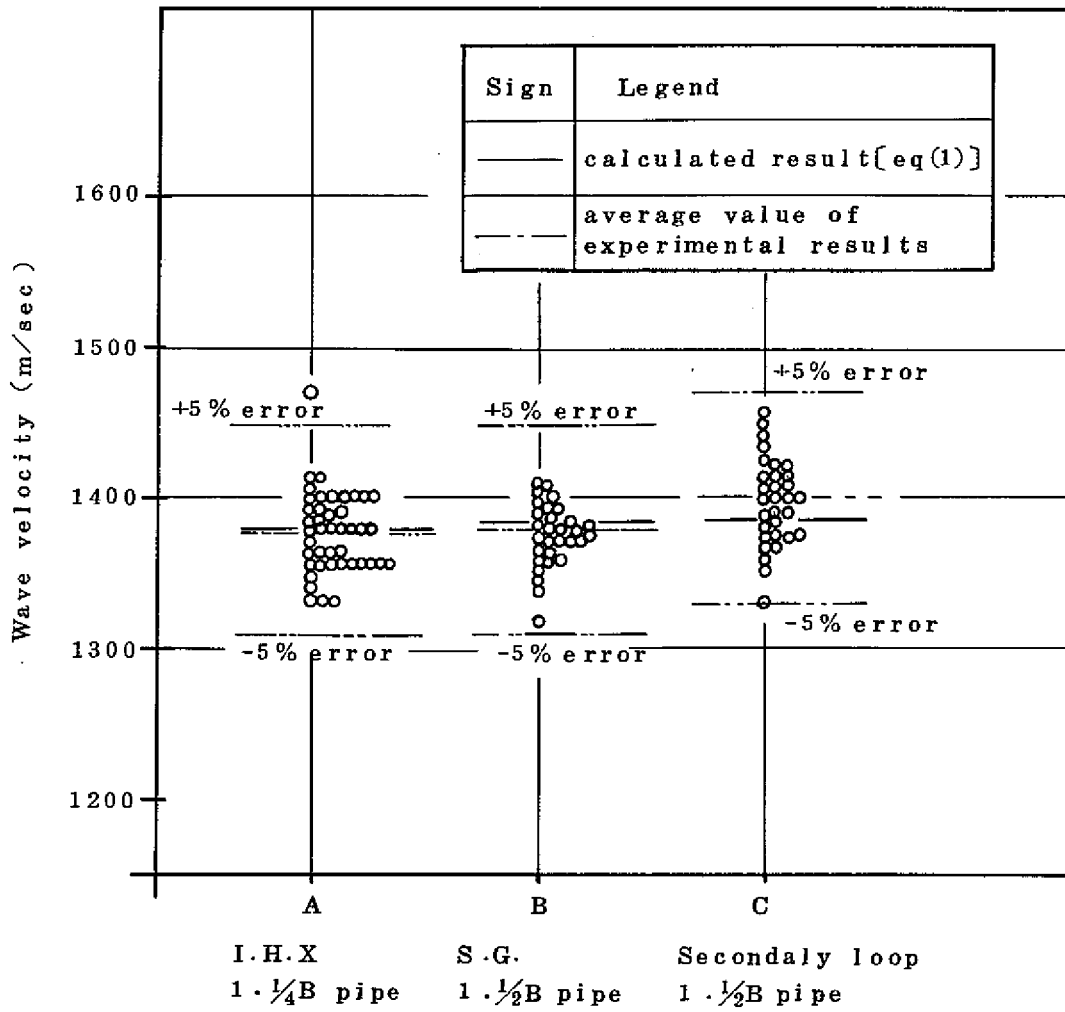


Fig. 3.12 Wave Velocity



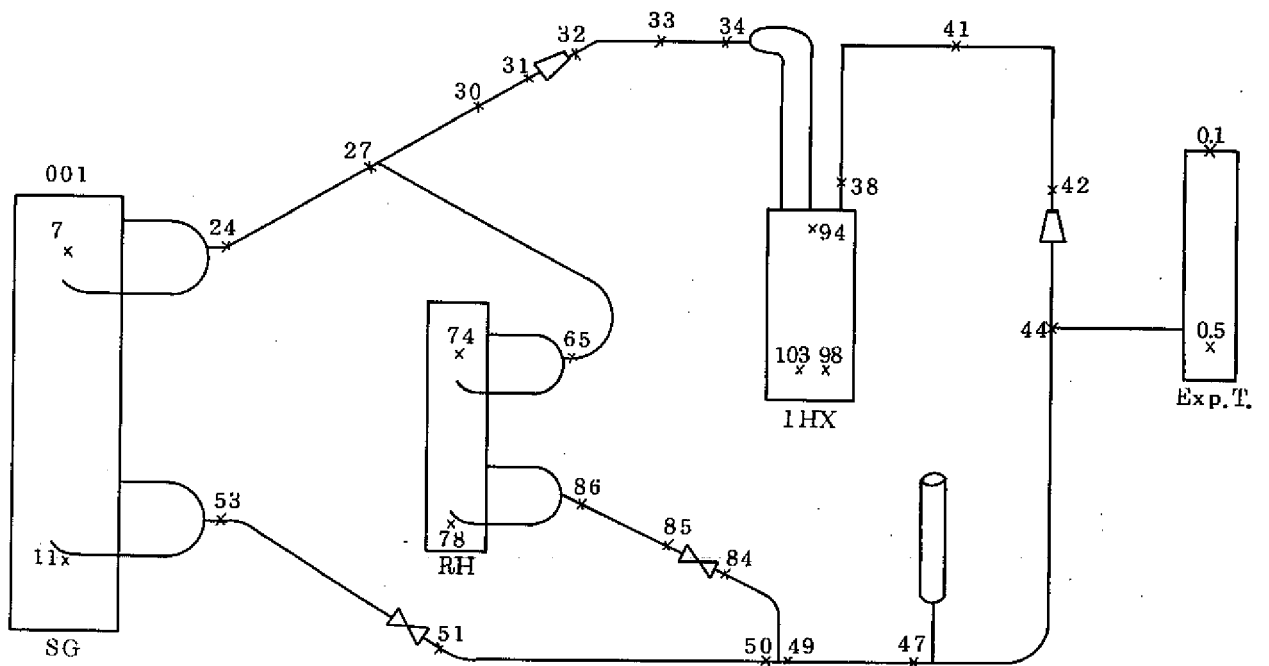
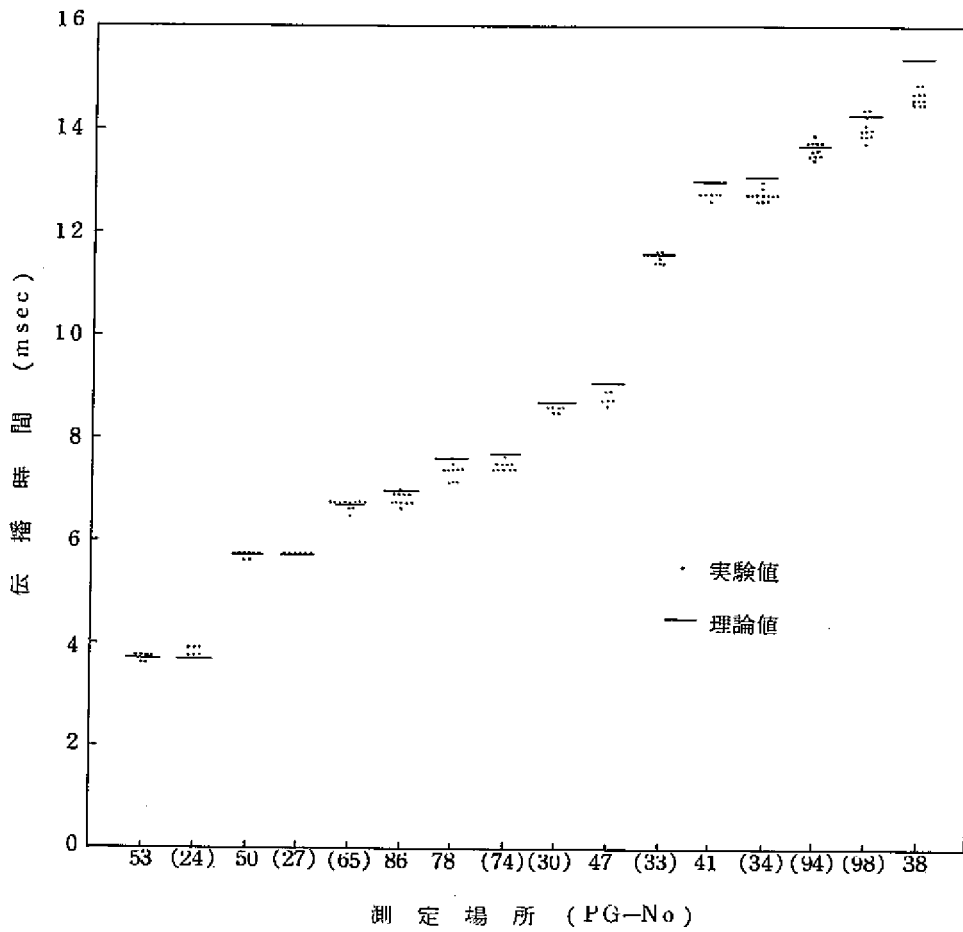


Fig. 3.13 Time for pressure wave to propagate between measured points

## 4. 実験結果と解析結果の比較

### 4-1 解析に使用した計算コード

高速炉二次系中の圧力波伝播を解析する計算コード、SWAC-5K<sup>(6)</sup>、SWAC-5H<sup>(7)</sup>が作られている。これらの計算コードでは二次系を一次元の流路系でモデル化し、この一次元流路内での圧力波伝播を解析する。

#### (1) SWAC-5K

この計算コードは動燃事業団からの委託研究として川崎重工業K・Kに作成を依頼して開発されたものである。SWAC-5Kはナトリウム-水反応事故時、二次系内の流体(ナトリウム)の流れは次式に示される水撃方程式に従うとし、この水撃方程式を特性曲線法によって解く計算コードである。

水平方向とφの角をなす一次元の流路中を流れる圧縮性流体の運動の式は、

$$-\frac{1}{g} \cdot \left( \frac{\partial}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot U = \frac{\partial H}{\partial x} - \sin \phi + \frac{f}{D_m} \cdot \frac{U|U|}{2g} + \frac{\zeta}{L} \cdot \frac{U|U|}{2g} \dots\dots\dots (4.1)$$

連続の式は

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot H = -\frac{V^2}{g} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \dots\dots\dots (4.2)$$

(4.1)式の右辺第3項はパイプ中の摩擦損失に伴なり圧力損失を表す項であり、第4項は流路形状の変化等に伴なり圧力損失を表わす項である。

#### (2) SWAC-5H

この計算コードは動燃事業団からの委託研究として、日立製作所K・Kに作成を依頼して開発されたものである。

SWAC-5Hは一次元流路内での圧力変動を進行波と後退波の重ね合わせによって求める wave-superposition法によっている。

一次元波動方程式の解は、

$$H = F \left( t - \frac{x}{V} \right) + f \left( t + \frac{x}{V} \right) + H_0 \dots\dots\dots (4.3)$$

$$U = \frac{g}{V} \left\{ F \left( t - \frac{x}{V} \right) - f \left( t + \frac{x}{V} \right) \right\} + U_0 \dots\dots\dots (4.4)$$

であらわされる。ここでFは進行波でありfは後退波である。従って、計算の際流路の空間メッシュの大きさを1タイムステップの間に波の伝わる距離 $\Delta x$

$$\Delta x = V \times \Delta t \dots\dots\dots (4.5)$$

に等しくとると、各点での圧力、流速は1タイムステップ前の各点での後退波と進行波から求められる。

SWAC-5Hでは、管路中の摩擦損失による圧力損失を各メッシュ点に仮想的なオリフィスを設ける事により計算している。

SWAC-5K, SWAC-5Hのどちらの計算コードもナトリウム-水反応事故時の圧力波は圧力波発生面の入力として与える。取り扱える境界の種類は、

- (a) 自由液面
- (b) 剛体面
- (c) オリフィス
- (d) 分岐 ( SWAC-5Kでは3分岐まで, SWAC-5Hでは6分岐まで取り扱える )
- (e) 圧力波発生面

等である。

計算コードの詳しい説明は参考文献(6), (7)に記されている。

#### 4-2 2次系縮尺モデル実験装置の計算モデル化

前報までの方法と同じく、ベンドを直管として扱い、配管の傾き及び水柱の高さの影響は小さいのでこれを無視すれば、図2-2に示された実験装置は図4-1に示される様に簡単化される。

図4-1に示される各機器の計算モデルとして、下記に示す計算モデルを採用した。

##### (1) 圧力波発生面

窒素ガス圧は蒸気発生器モデル上部自由液面上に加えられ、その点の圧力波形は圧力測定点PG-001で測定される。従ってPG-001で測定された圧力波形を入力波形とすれば蒸気発生器内の伝播についても実験結果と比較が可能である。

しかし、図2-1又は図2-3から判る様に本実験装置の様な場合にはガス相から液体への圧力波の伝播は非常に複雑であり、単純な取り扱いが出来ない。従って本報告書では、蒸気発生器の二次系入口ノズル及び出口ノズルを圧力発生面とした。

すなわち、図4-1に示される圧力測定点PG-7、PG-11で測定された圧力波形を計算上の入力波形とし、圧力発生面は入口、出口ノズルと同一平面上にあって蒸気発生器モデルの中心線上の点を圧力発生面とした。入口、出口ノズルへ伝わる圧力波形がPG-7及びPG-11で代表され得る事については蒸気発生器モデル単体について行なった実験で確かめてある。(第3報参照のこと)すなわち、本報告書では、蒸気発生器入口、出口ノズルに、例えば図3-2のPG-7、PG-11に示される様な圧力波形が蒸気発生器内から伝播してきた場合の二次系中への伝播について実験結果と計算結果の比較を行なう事になる。

##### (2) 蒸気発生器(S.G.)

上述の如く、蒸気発生器入口、出口ノズル部を圧力波発生面として取り扱った。従って蒸気発生器は計算モデル上には関係しない。

##### (3) 再熱器(R.H.)

図4-2(a)に再熱器の模式図を示す。再熱器の一次元計算モデル化にあたっては第3報<sup>(10)</sup>で記した蒸気発生器のモデル化における考え方とほとんど同一の考え方に従ってモデル化を行なった。従って詳しくは第3報を参照されたい。

蒸気発生器と再熱器とで大きく異なる点は図4-2(a)に於てNの点である。

すなわち、蒸気発生器では水面(ナトリウム液面)がシュラウド上端より上部

にあるのに対し、再熱器ではシュラウドは上部フランジ板にまで達し、液面はシュラウド上端より下方にあり、シュラウドに明けられた  $34\phi$  の穴 8ヶを通して再熱器内の水（ナトリウム）が流れる。計算モデルを作成するにあたっては、 $\textcircled{N}$  はオリフィスとして取り扱うのが妥当と考えられるが、まず第 1 段階として  $\textcircled{N}$  は 4 分岐接合点として取り扱った。

以上の考え方に従って作成した計算モデルの図を、図 4-2 (b) に示す。図 4-2 (b) のモデル図で、coil section とある部分は、伝熱管群のある部分のモデルを示す。この部分は、平均流路断面積に等しい断面積の円管で単純にモデル化してある。（第 3 報 図 4-4 及び、第 3 報 P 26 参照）

表 4-1 に計算モデルの各部寸法を示す。

Table 4.1 Dimensions of Analytical Model of R.H.

部材番号	流路長 m	流路断面積 $m^2$	水力直径 m	圧力波伝播速度 m/s
1	0.091	$3.25 \times 10^{-2}$	$2.03 \times 10^{-1}$	1277
2	0.06	//	//	//
3	0.045	//	//	//
4	0.87	$6.16 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^{-2}$	1406
5	0.06	$1.80 \times 10^{-2}$	$1.51 \times 10^{-1}$	1282
6	0.29	$1.49 \times 10^{-2}$	$1.38 \times 10^{-1}$	1296
7	0.265	$1.80 \times 10^{-2}$	$1.51 \times 10^{-1}$	1282
8	0.255	//	//	//
9	0.1	$1.10 \times 10^{-2}$	$1.19 \times 10^{-1}$	1317
10	0.155	//	//	//
11	0.4	//	//	//

#### (4) 中間熱交換器 (IHX)

図 4-3 に中間熱交換器の計算モデルを示す。表 4-2 に計算モデルの各部寸法を示す。中間熱交換器の計算モデル化にあたっての考え方は第 2 報<sup>(9)</sup> に詳しく記してある。図 4-3 に示す計算モデルは第 2 報の中間熱交換器の計算モデル CASE 2 に相当する。

## (5) 膨張タンク

図4-4に膨張タンクの計算モデルを示す。表4-2に計算モデル各部寸法を示す。  
 図4-4に於て、点②は3分岐とすべきと考えられるが、簡単の為、2分岐とした。点②から下部フランジ面までの距離が短いので点②を2分岐として扱っても3分岐として扱っても得られる結果はほぼ同じである。(8)(9)

## (6) オーバーフローコラム

図4-5にオーバーフローコラムの計算モデルを示す。計算モデルの寸法は表4-2に示す。

## (7) レデューサー

断面積が連続的に変化する部分はSWAC-5H, SWAC-5Kでは取り扱い事が出来ない。従って図4-6の点線に示す様にレデューサーを異径管として取り扱った。異径管の接合点(異径部)はレデューサーの中央とした。

## (8) 弁

実験に使用した弁の構造図は図2-8に示してある。実験は総て弁を全開の状態で行なった。図4-7に示す断面積 $S_1$ 及び $S_2$ は以下の値である。

$$1 \cdot 1/2 \text{ インチ 弁 } \quad S_1 = 1,257 \text{ mm}^2 \quad S_2 = 2,639 \text{ mm}^2$$

$$3/4 \text{ インチ 弁 } \quad S_1 = 314 \text{ mm}^2 \quad S_2 = 754 \text{ mm}^2$$

$S_1$ は、またそれぞれの接続配管の断面積にも等しい。従って弁内では圧力波の伝播方向に対する断面積は複雑に変化するが、弁が全開の場合にはオリフィス効果は示さないと考えられる。従って簡単の為、第一段階としてバルブは直管として取り扱った。

## (9) ベンド

ベンドは第2報, 第3報の場合と同様, 直管として取り扱った。

(10) 圧力波伝播速度はAllieviの式から, 求めた値を使用した。

(11) 摩擦損失係数は定常流の値を使用した。

以上の様に主要機器をモデル化した。

SWAC-5Hを使用して計算した場合の2次系全体の計算モデル図を図4-8に示す。

部材要素数(断面積, 圧力波伝播速度が一定である区間)は43あり, 1~43で表わし, 各部材間の接合点は①~④⑩まで40個ある。計算コードに使用した各部の寸法, 圧力波伝播速度等は表4-3に示す。

SWAC-5Kでは計算コード上の制約から, 図4-8に示す計算モデルとは若干異なっ

た計算モデルを使用した。しかし、重要な点は図 4-8 に示す計算モデルと同じであり、計算結果には、ほとんど影響を及ぼさない。

#### 4-3 実験結果と計算結果の比較

計算結果との比較を行なった実験データは、HH-8、(R.H. 近辺での計算結果との比較)、HI-5 (IH X 近辺での比較)、HK-6 (蒸気発生器入口配管での比較)、HL-7 (蒸気発生器出口配管での比較)である。

中間熱交換器近辺での圧力波の計算は SWAC-5K を用いて行ない、その他の場所での計算は SWAC-5H を用いて行なった。いずれの計算コードを使用しても得られる結果にほとんど差はない。計算の際の入力波形としては、4-2 の(1)圧力発生面の項で記した様に、蒸気発生器出口ノズル、及び、入口ノズルの圧力測定点 PG-7、及び、PG-11 における測定波形を使用した。

4-2 の(1)の項でも記したが、ここで再度、PG-7、PG-11 を計算コード上の圧力発生面として取り扱い、PG-7、PG-11 での測定波形を計算コード上の入力波形として取り扱いことの妥当性について検討する。図 4-8 において、点 A (PG-7)、点 B (PG-11) からの圧力波(進行波)が 3 分岐点 C、D で反射し、その反射波が、A、B、に到達する 7.1msec 以後は、厳密には、A 点、B 点を圧力発生面として取り扱えない。また、7.1msec 以後は PG-7、PG-11、での測定波形も厳密には入力波形として取り扱えない。

しかし、第 3 報で記した如く、蒸気発生器モデルについて行なった実験結果では、蒸気発生器内の圧力は入力波の約 1/15 程度であり、蒸気発生器ノズル部 (A 点、B 点) での圧力波の反射係数はほぼ -1 であると考えられる。従って、7.1msec 以後においても、A 点、B 点を圧力波発生面として取り扱い、PG-7、PG-11 での測定波形を入力波形としても、計算結果と実験結果を比較する上で、それ程大きな差はないと考えられる。

##### 4-3-1 蒸気発生器からの中間熱交換器に至る配管中での比較

###### (1) SG 下部ノズルから IH X 入口に至る下部配管中での比較

(HL シリーズの実験結果と計算結果との比較)

図 4-9 (a), (b) に実験データ HL-7 の (PG-7)、(PG-11) における圧力波形を示す。図 4-9 に示す圧力波形を、計算コード上の圧力発生面での入力波形として与え、二次系モデル内の各点での圧力変動を計算し、

実験結果と比較した。

図4-10～4-13にPG-53, PG-50, PG-47, PG-41における実験結果と計算結果の比較を示す。

図4-10はSG下部出口配管3分岐における圧力波形の比較を示す。

計算結果と実験結果の一致は極めて良い。図中Vはバルブからの反射波の影響を受け始める時点, P5はRHへの分岐(PG-50の場所の分岐)での反射波の影響を受け始める時点である。これらの時点を過ぎた後でも両者の一致は極めて良いと考えられる。

図4-11, 4-12にRHへの分岐点(PG-50)および、オーバーフロー、コラムへの分岐点(PG-47)における圧力波形の比較を示す。計算結果と実験結果は良く一致している。図でa-aは再熱器からの反射波が到達する時点, b-bはオーバーフローコラムからの反射波が到達する時点, c-cは膨張タンクからの反射波が到達する時点を示す。これらの反射波の影響を受け始めた後も計算結果と実験結果は良く一致している。図でd-dは蒸気発生器下部ノズルでの反射波の影響を受け始める時点である。d-d以後も実験値と計算値は比較的良く一致しており、この結果からも蒸気発生器下部ノズル部B点を近似的に圧力波発生面として取り扱って良いと考えられる。上部配管の測定点PG-27における結果もPG-50とほぼ同じ結果であり上部ノズル部A点も近似的に圧力波発生面として取り扱う事ができる。

図4-13に, IHXとレデューサーの間の点, PG-41における実験結果と計算結果の比較を示す。図中, A-AはIHXを透過してきた圧力波が到達する時点を示す。IHXを透過してきた圧力波の影響(PG-7から上部配管を伝播し, IHXを透過してきた圧力波の影響)を受け始める時点までは, 実験結果と計算結果とは良い一致を示している。A-Aにおいては, 計算値は実験値より高い値を示している。(最大で約1.6倍の差がある。)しかし, A-A以後においても, 圧力変動の大まかな形は一致している。A-A以降における計算値と実験値の不一致は, 第2報でも記した如く, IHXモデルの計算モデル化が不適当な事によるものと考えられる。

ところで, 図4-11, 図4-12のA-A点は, IHXを透過してきた圧力波の影響を受け始める時点である。図4-11(PG-50), 図4-12(PG-47)では, A-A以降も計算結果と実験結果は比較的良く一致している。中間熱交換器を透過した圧力波が, PG-50, PG-47に到達するまでには, 配管途中にある, レデューサー部, 膨張タンクへの分岐等で波高値が減少する為, PG-50, PG-47での



圧力変動は、中間熱交換器での影響より他の場所（再熱器等）での影響を大きく受けるため、これらの点ではA-A以降も計算結果と実験結果とは比較的良く一致していると考えられる。

(2) 蒸気発生器上部ノズルから中間熱交換器出口に到る上部配管中での比較  
(HKシリーズの計算結果と実験結果の比較)

S.G. 上部ノズルからI.H.X.までの上部配管は構成要素が、3分岐、バルブ、レデューサー、直管等であり、4-3-1の下部配管に比較すると、比較的簡単な構成である。従って、本実験シリーズにおける実験結果と計算結果との比較を目的とした計算は特に行なわなかった。

しかし、およびその傾向を比較する為、4-3-3のI.H.X.での比較（実験HI-5との比較）を行なった際、PG-24, PG-27の点（HK-6の実験点）の計算結果をアウトプットし、その結果とHK-6の実験結果との比較を行なった。

図4-14に、PG-7, PG-11におけるHK-6とHI-5との圧力波形（測定値）の比較を示す。HK-6の実験結果と計算結果との比較を行なうには、圧力波発生面の入力波形として当然HK-6の実験におけるPG-7, PG-11の測定波形を用いなければならない。しかるに、図4-15, 図4-16に示す計算結果は前述の如く、圧力発生面の入力波形としてHI-5の実験値を用いて計算した結果である。しかし、図4-14から判る様に、HK-6の実験とHI-5の実験におけるPG-7, PG-11の圧力変動はそれ程大きな差がない。従って、圧力発生面の入力波形として、HK-6の測定値の代わりに、HI-5の測定値を用いて計算しても結果にそれ程大きな差は生じない。図4-15, 図4-16に、それぞれ、PG-24, PG-25における実験結果を前述の如く計算した計算結果との比較を示す。実験結果と計算結果は良く一致している。

4-3-2 再熱器及び再熱器近辺での比較

(HHシリーズの実験結果と計算結果の比較)

図4-17(a), (b)に実験データ-HH-8のPG-7, PG-11における圧力波形の測定結果を示す。計算にあたっては、図4-17(a), (b)の測定値を圧力発生面の入力波形とした。

図4-18に再熱器の入口配管における実験結果と計算結果の比較を示す。図4-19には、再熱器出口配管における実験結果と計算結果の比較を示す。計算結果と実験結果は非常に良く一致している。

図4-20に、再熱器の下部プレナムにおける実験結果と計算結果の比較を示す。約17msecまでは、実験値と計算値は比較的良く一致している。17msec以後においても、波形は両者で差がみられるが、波高値は同程度の値である。図4-21に、再熱器上部プレナムにおける実験結果と計算結果の比較を示す。計算結果と実験結果では、波形にかなり相違がみられる。波高値は実験値の方が計算値より2倍～4倍程度大きい、オーダー的には一致している。再熱器上部プレナム、下部プレナムにおいて計算結果と実験結果とが一致しない原因としては下記のような事が考えられる。

第1の原因は実験精度上の問題である。図4-20、図4-21から判る様に、実験値は最大値が約 $0.05 \text{ Kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ である。本実験に用いた圧力計のフルスケールは、 $10 \text{ Kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ であり、公称精度は±1%以内である。従って、図4-20、図4-21に示す実験値には大きな誤差を含んでいる事が考えられる。この点については、実験方法の改良が必要であろう。第2の原因は、再熱器の計算モデルの不適當によるものである。再熱器内部では、圧力波は3次的に伝播すると考えられる。ところで、SWAC-5K、SWAC-5Hはいずれも一次元流路内の圧力波伝播を計算するコードである為、再熱器を一次元モデルでおきかえなければならない。4-2-(3)で述べた一次元の計算モデルでは、3次的な圧力波伝播を充分に計算できない事が考えられる。この点については、計算モデルの改良、三次元圧力波伝播を解析する計算コードの開発が必要である。

第3の原因としては、圧力波伝播速度が実験値と計算値とで異なる事が考えられる。図4-20、図4-21から判る様に、実験結果と計算結果では、圧力波の立上り時点が異なり、実験結果の方が圧力波伝播速度は若干早い。すでに、3-2の項で記した様に圧力波伝播速度の実験結果と計算結果は±5%以内の相違であり、非常に良い一致を示していた。しかし、本実験の様に、圧力波発生源が2つあり、両方の圧力波発生源から伝播してきた圧力波がほぼ同時刻に到達し、ほぼ同程度の影響を受ける場所(例えば、RH内部や、IH X近辺)では圧力波伝播速度がわずかも異なると、2つの圧力波の干渉の様子が異なり、その結果、計算結果と実験結果の間に大きな差が生じる事が考えられる。特に、RH内部の様に、-1の反射係数の自由液面がある場合には、伝播速度がわずかも異なると、2つの圧力波の干渉の様子は全く異なると考えられる。(RH入口配管

においては、1つの圧力波発生源から伝播してきた圧力波の影響を大きく受け、第2の圧力波発生源から伝播してきた圧力波の影響はほとんど受けない。) )

以上の原因については、実験方法の改良、計算モデル、計算コードの改良を行ない、更に詳しく検討する事が望まれる。

次に、図4-20、図4-21から判る様に、17msec以降において、実験値の波高値は徐々に増加して行くのに対し、計算値はほぼ同じ値をとりつけている。この原因は、再熱器上部の空間の取り扱い方に起因すると考えられる。実験では、再熱器上部に約20mmの閉空間を設けている。圧力波の伝播に伴ない再熱器上部の空気は圧縮、膨張をくり返し、最終的には、蒸気発生器上部液面に加えた窒素ガス圧に等しくなる。しかるに、計算モデルでは、再熱器上部液面を自由液面として取り扱った為、上部空間内の空気の圧縮に伴ない圧力上昇分が計算されず、実験結果と、計算結果との差が生じたものと考えられる。

以上、再熱器出入口部における圧力波形は計算値と実験値で良く一致している。再熱器内部においても下部プレナムでは比較的良く一致している。上部プレナムにおいては、細かい波形については一致していないが、波高値はオーダ一的に一致している。従って、再熱器内の細かい圧力波形を得る為には、4-2-③で考えた計算モデルでは必ずしも充分とは考えられないが、再熱器が主配管内の圧力波伝播に及ぼす影響を考える場合には、4-2-③の計算モデルで充分であると考えられる。再熱器内の圧力波伝播に関しても、下部プレナムでの比較的良い一致、実験データの精度を考えると、充分とは言えないまでも、大まかな波形、及び波高値を得るには、4-2-③の計算モデルを採用しても良いと考えられる。

#### 4-3-3 中間熱交換器モデルでの比較

(HIシリーズの実験結果と計算結果の比較)

図4-22(a)、図4-22(b)に実験データHI-5のPG-7、PG-11における圧力波の測定値を示す。図4-22(a)、図4-22(b)の測定波形を計算コード上の圧力発生面の入力波形として与えて、計算を行ない、実験結果と比較した。

図4-23に中間熱交換器上部プレナム(PG-94)、図4-24に中間

熱交換器下部プレナム (PG-98) における計算結果と実験結果の比較を示す。図 4-25 に、中間熱交換器入口配管 (PG-34)、図 4-26 に、中間熱交換器出口配管 (PG-38) における計算結果と実験結果の比較を示す。いずれの点においても計算結果と実験結果の波形は比較的良く一致している。しかし、波高値は計算値の方が実験値より約 2~2.5 倍高い値を示している。図 4-25 において B-B は、PG-11 からの圧力波が中間熱交換器を透過して PG-34 に到達する時点を示す。また、図 4-26 において A-A は PG-7 からの圧力波が中間熱交換器を透過して PG-38 に到達する時点を示す。いずれの場合も中間熱交換器を透過した圧力波が到達する時点までは、計算値と実験値は良く一致しているが、到達した時点以降では、計算値の方が実験値より高い値を示す。従って、中間熱交換器内部、中間熱交換器出入口配管における計算結果と実験結果との相違は、第 2 報でも記した様に、中間熱交換器の計算モデルの不適当 (中間熱交換器内部の 3 次元の圧力波伝播を 1 次元計算モデルでは充分モデル化できない。) によるものと考えられる。

しかし、計算結果の方が実験結果より高い値を示している事は、二次系の安全性を検討する上においては、本報告書の計算モデルを採用して計算すれば良いと考えられる。

尚、中間熱交換器の計算モデルとしては、第 2 報と同じく、図 4-27 に示す種々のモデルで計算を試みたが、結果はほぼ同じであった。

#### 4-4 計算結果と実験結果との比較のまとめ

前述の如く、図 3-1 に示す各点での圧力波形を実験結果と計算結果で比較した。計算モデルは 4-2 で記した一次元計算モデルを採用した。

主配管中における圧力波形の実験値と計算値は良く一致している。従って、分岐、ベンド、バルブ、膨張タンク、ディフューザー、オーバーフローコラム、等の計算モデルは、本報告書で記したモデルを採用して計算すれば充分であると考えられる。再熱器出入口配管においても計算結果と実験結果は一致している。従って、再熱器が主配管中の圧力波伝播に及ぼす影響を検討する場合にも、本報告書に記したモデルを採用すれば充分である。

再熱器内部の圧力波形についても、上部プレナムの様に、実験結果と計算結果の一致がそれ程良くない場合もあるが、再熱器内部においては、実験結果の精度にも

疑問があり、むしろ下部プレナムにおいて、実験結果と計算結果とが比較的良い一致を示している事、また、第3報で記した様に、再熱器と構造が似ている蒸気発生器内において実験結果と計算結果は比較的良く一致している事から考えて、再熱器内の圧力波伝播を考える場合にも、本報告で記したモデルを採用すれば充分であると考えられる。

中間熱交換器内部、及び、中間熱交換器近辺においては、計算結果と実験結果で波形は比較的良く一致するが、波高値は、計算結果の方が実験結果より2～2.5倍程度高い値を示す。従って、二次系の安全性の検討には、本報告書で記した計算モデルを使用して計算すれば、安全側の結果が得られる。

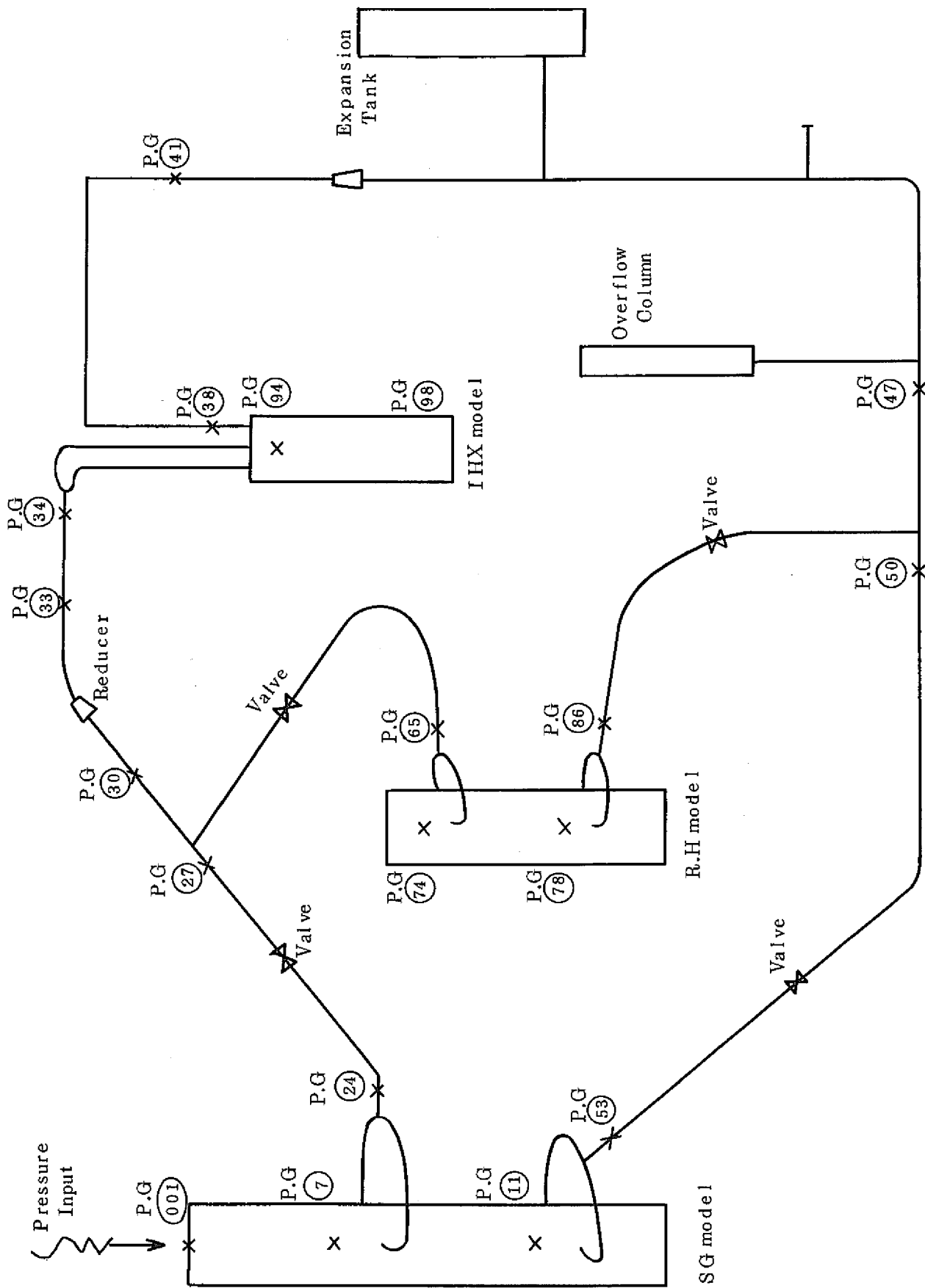


Fig. 4.1 Simplified View of the Scaled Down Secondary Loop

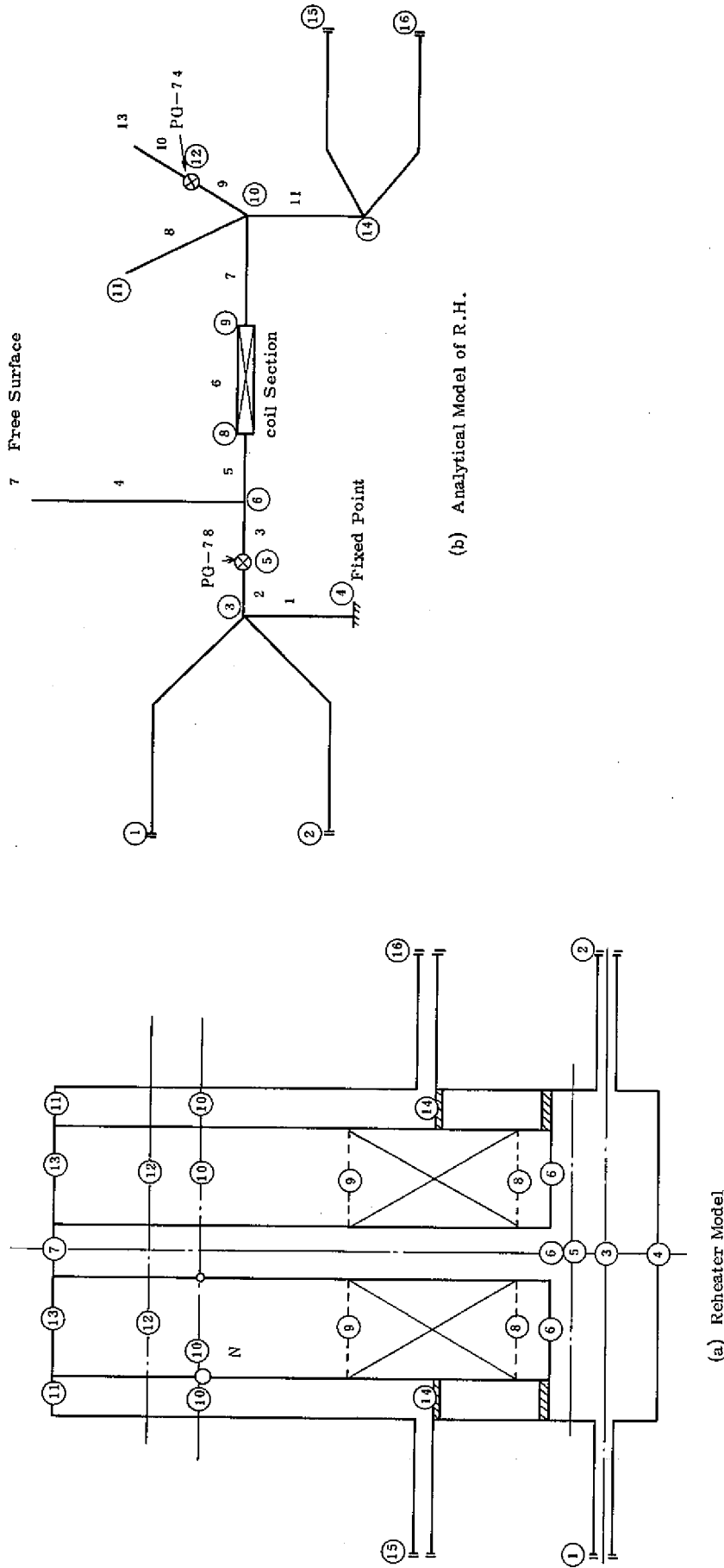


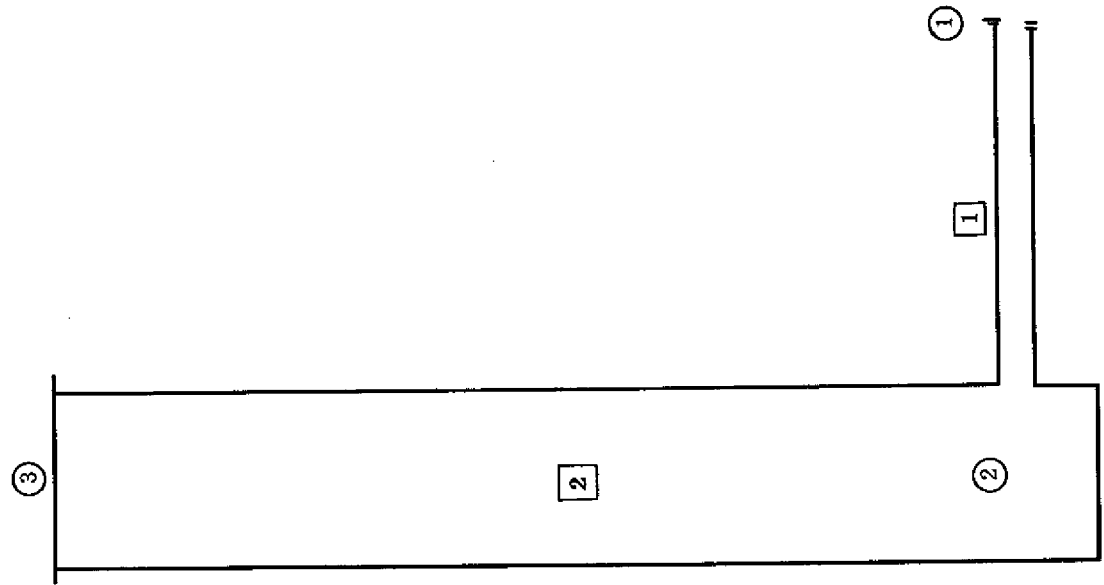
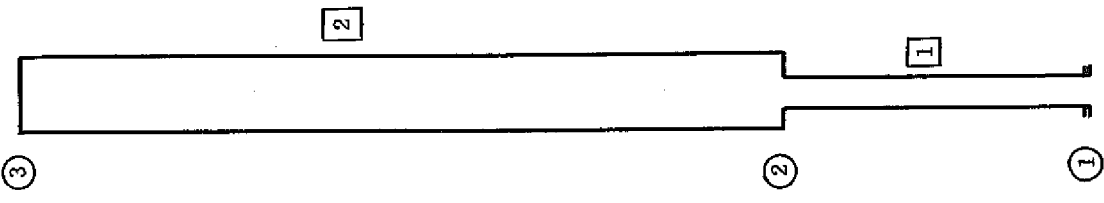
Fig. 4.2 Analytical Model of Reheater





Table 4.2 Dimensions of Analytical Models of I.H.X.,  
Expansion Tank and Overflow-Column.

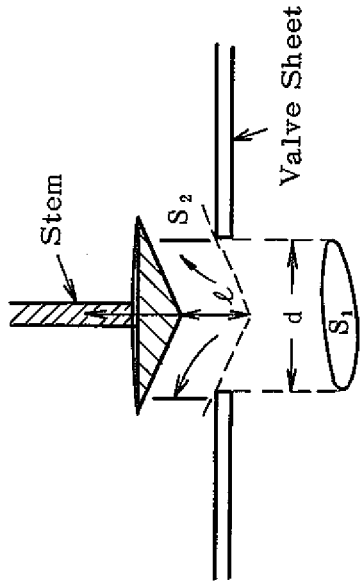
部材 番号	流路長 (m)	流路断面積 (m <sup>2</sup> )	水力直径 (m)	音速 (m/sec)
中間熱交換器				
1	0.842	$1.06 \times 10^{-3}$	$3.67 \times 10^{-2}$	1387
2	0.075	$1.89 \times 10^{-2}$	$1.55 \times 10^{-1}$	1278
3	0.64	$5.22 \times 10^{-3}$	$9.0 \times 10^{-3}$	1409
4	0.08	$3.25 \times 10^{-2}$	$2.03 \times 10^{-1}$	1277
5	0.122	$1.06 \times 10^{-3}$	$3.67 \times 10^{-2}$	1387
6	#	#	#	#
膨張タンク				
1	0.50	$1.43 \times 10^{-3}$	$4.26 \times 10^{-2}$	1337
2	1.26	$8.88 \times 10^{-3}$	$1.06 \times 10^{-1}$	1301
オーバーフローコラム				
1	0.20	$1.39 \times 10^{-4}$	$1.33 \times 10^{-2}$	1425
2	0.50	$1.43 \times 10^{-3}$	$4.26 \times 10^{-2}$	1337



○ . . . . Junction No.  
□ . . . . Member No.

Fig. 4.5 Analytical Model of Overflow Column

Fig. 4.4 Analytical Model of Expansion Tank



$$S_1 = \frac{\pi}{4} d^2$$

$$S_2 = \pi d \ell$$

Fig. 4.7 Treatment of Valves

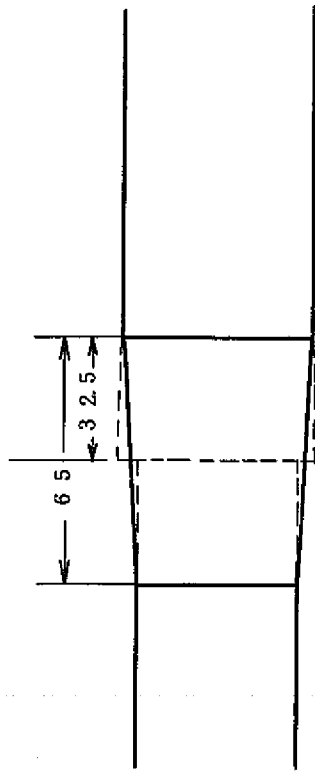


Fig. 4.6 Analytical Model of Reducer  
( Treated as a Junction of Different  
Diameter Tubes )

Table 4.3 Dimensions of Analytical Model of Scaled Down  
Secondary Loop.

部材 番号	左はじ 番号	右はじ 番号	結合点種類		流路長 (m)	流路断面積 (m <sup>2</sup> )	水力直径 (m)	圧力波伝播 速度 (m/s)
			左	右				
1	1	2	圧力発生面	3	4.910	$1.43 \times 10^{-3}$	$4.26 \times 10^{-2}$	1337
2	2	3	3	圧力発生面	4.910	"	"	"
3	2	4	3	3	2.756	"	"	"
4	4	5	3	2	3.943	"	"	"
5	5	6	2	2	2.815	"	"	"
6	6	7	2	2	1.083	$1.06 \times 10^{-3}$	$3.67 \times 10^{-2}$	1387
7	7	8	2	3	2.050	"	"	"
8	8	9	3	3	0.912	"	"	"
9	8	9	3	3	"	"	"	"
10	9	10	3	2	0.08	$3.25 \times 10^{-2}$	$2.03 \times 10^{-1}$	1277
11	10	11	2	2	0.64	$5.22 \times 10^{-3}$	$9.0 \times 10^{-3}$	1409
12	11	12	2	2	0.075	$1.89 \times 10^{-2}$	$1.55 \times 10^{-1}$	1278
13	12	13	2	2	0.842	$1.06 \times 10^{-3}$	$3.67 \times 10^{-2}$	1387
14	13	14	2	2	3.310	"	"	"
15	14	15	2	2	2.725	"	"	"
16	15	16	2	3	0.858	$1.43 \times 10^{-3}$	$4.26 \times 10^{-2}$	1337
17	16	17	3	2	3.480	$1.43 \times 10^{-3}$	$4.26 \times 10^{-2}$	1337
18	17	18	2	自由液面	1.26	$8.88 \times 10^{-3}$	$1.06 \times 10^{-1}$	1301
19	16	19	3	3	0.545	$1.43 \times 10^{-3}$	$4.26 \times 10^{-2}$	1337
20	19	20	3	固定端	0.140	"	"	"
21	19	21	3	3	1.230	$1.43 \times 10^{-3}$	$4.26 \times 10^{-2}$	1337
22	21	22	3	2	1.004	$1.39 \times 10^{-4}$	$1.33 \times 10^{-2}$	1425
23	22	23	2	自由液面	0.504	$1.43 \times 10^{-3}$	$4.26 \times 10^{-2}$	1337
24	21	24	3	3	4.435	"	"	"
25	4	25	3	3	1.400	$3.87 \times 10^{-4}$	$2.22 \times 10^{-2}$	1410

注：結合点種類で，1は固定端，2は2分岐，3は3分岐，4は4分岐を示す。

Table 4.3 Dimensions of Analytical Model of Scaled Down Secondary Loop (continued)

部材 番号	左はじ 番号	右はじ 番号	結合点種類		流路長 (m)	流路断面積 (m <sup>2</sup> )	水力直径 (m)	圧力波伝播 速度(m/s)
			左	右				
26	25	26	3	3	0.851	$3.87 \times 10^{-4}$	$2.22 \times 10^{-2}$	1409
27	25	26	3	3	//	//	//	//
28	26	27	3	4	0.4	$1.10 \times 10^{-2}$	$1.19 \times 10^{-1}$	1317
29	27	28	4	2	0.10	//	//	//
30	28	29	2	自由液面	0.155	//	//	//
31	27	30	4	自由液面	0.255	$1.80 \times 10^{-2}$	$1.51 \times 10^{-1}$	1282
32	27	31	4	2	0.265	//	//	//
33	31	32	2	2	0.29	$1.49 \times 10^{-2}$	$1.38 \times 10^{-1}$	1296
34	32	33	2	3	0.06	$1.80 \times 10^{-2}$	$1.51 \times 10^{-1}$	1282
35	33	34	3	自由液面	0.87	$6.16 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^{-2}$	1406
36	33	35	3	4	0.105	$3.25 \times 10^{-2}$	$2.03 \times 10^{-1}$	1277
37	35	36	4	固定端	0.091	//	//	//
38	35	37	4	3	0.855	$3.87 \times 10^{-4}$	$2.22 \times 10^{-2}$	1409
39	35	37	4	3	//	//	//	//
40	37	24	3	3	1.673	//	//	//
41	24	38	3	3	2.765	$1.425 \times 10^{-8}$	$4.26 \times 10^{-2}$	1377
42	38	39	3	圧力発生面	4.932	//	//	//
43	38	40	3	//	//	//	//	//

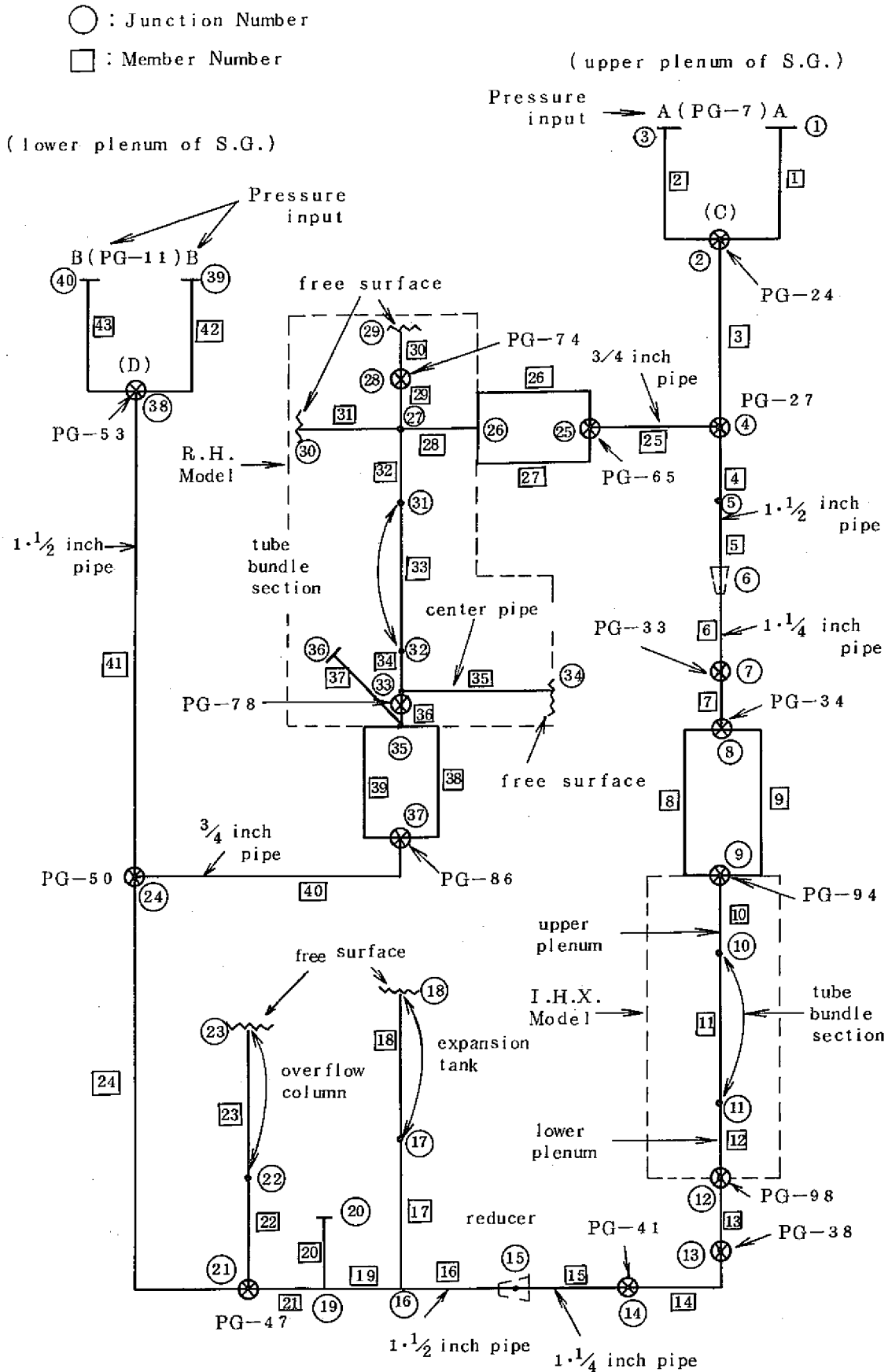


Fig. 4.8 Analytical Model of Secondary Loop

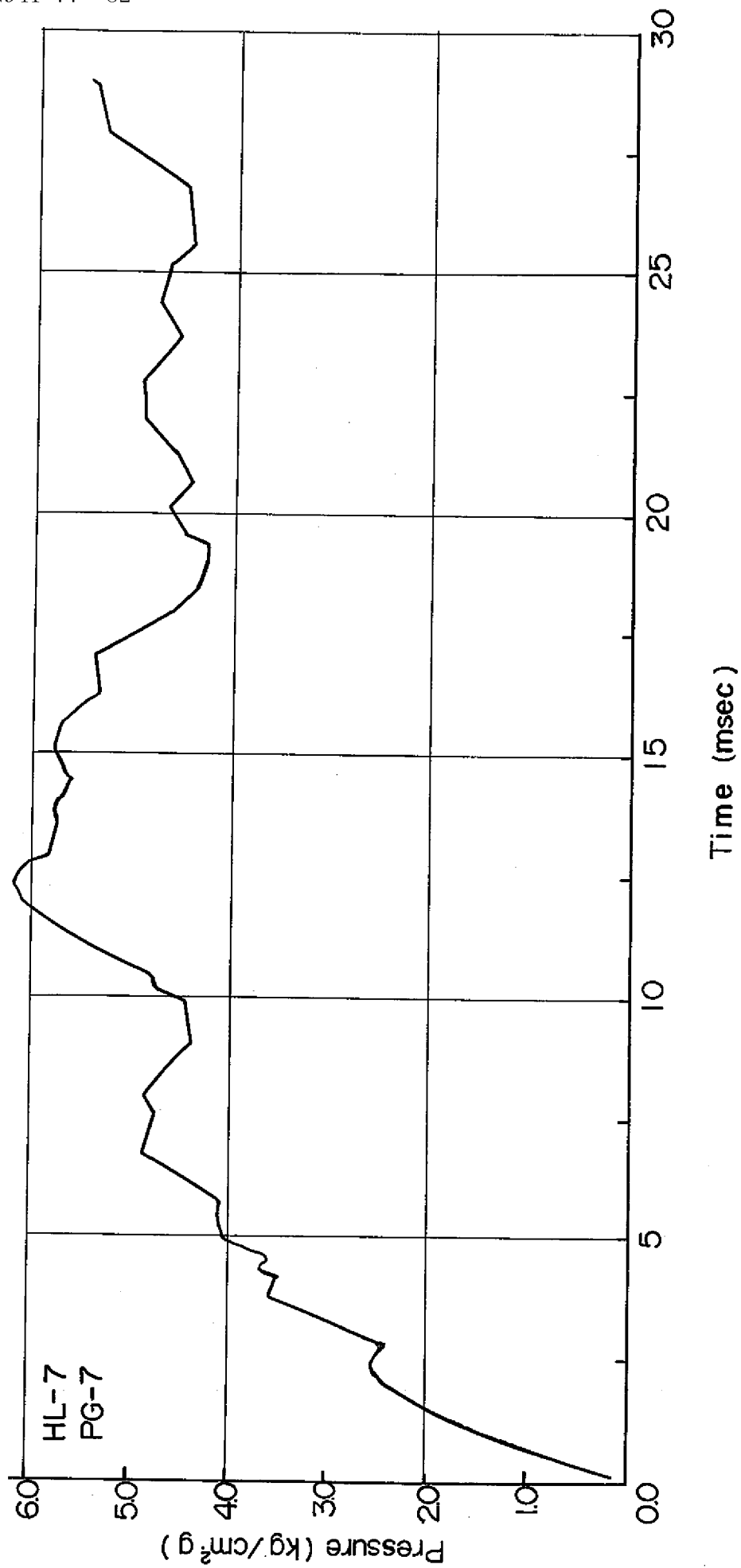


Fig. 4.9(a) Measured Pressure Change of the Experiment HL-7 at PG-7  
(This pressure change was used as the input pressure change  
at upper outlet of S.G. model in the calculation)

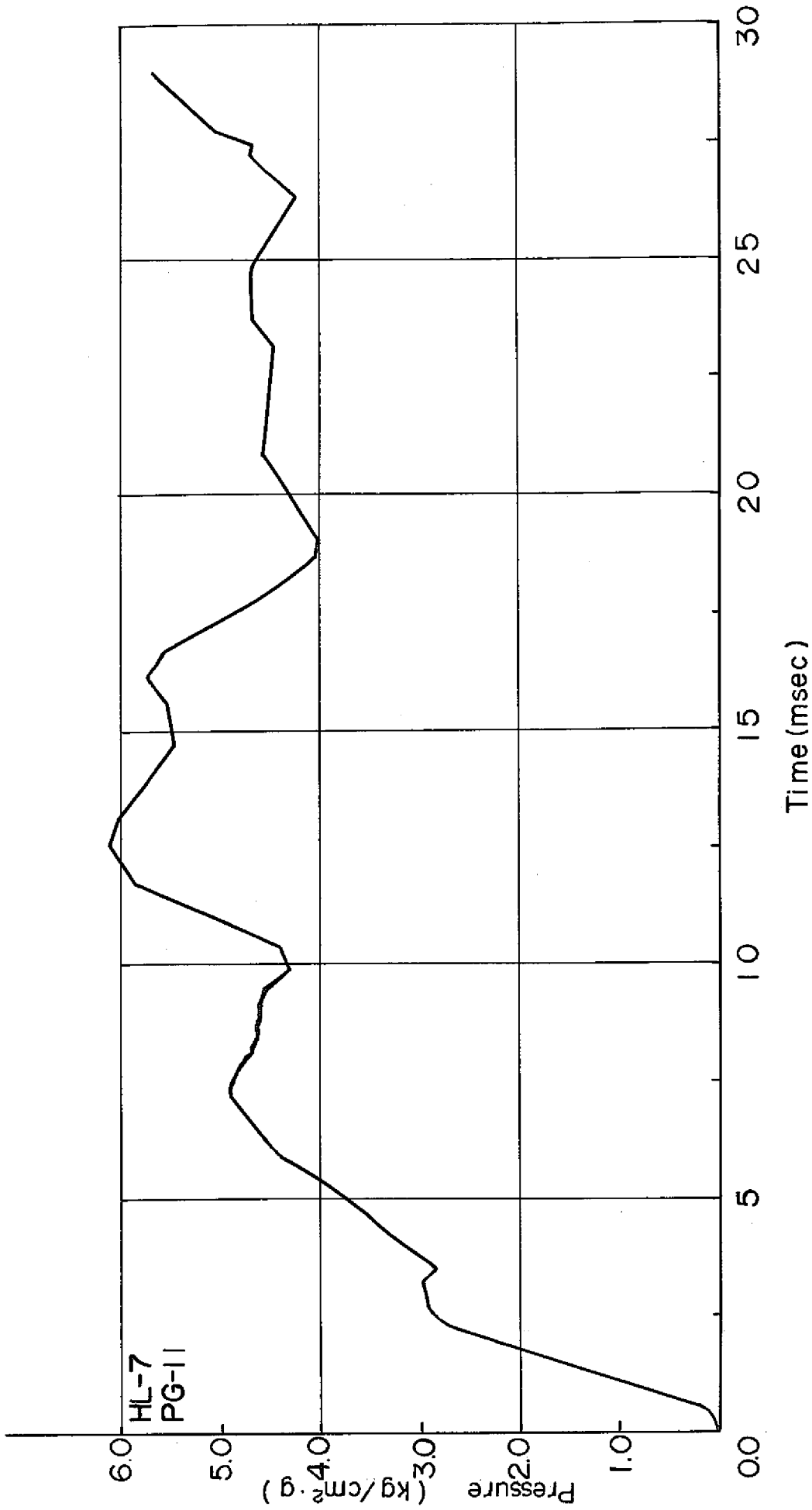


Fig. 4.9(b) Measured Pressure Change of the Experiment HL-7 at PG-11  
(This pressure change was used as the input pressure change  
at lower outlet of S.G. model in the calculation)



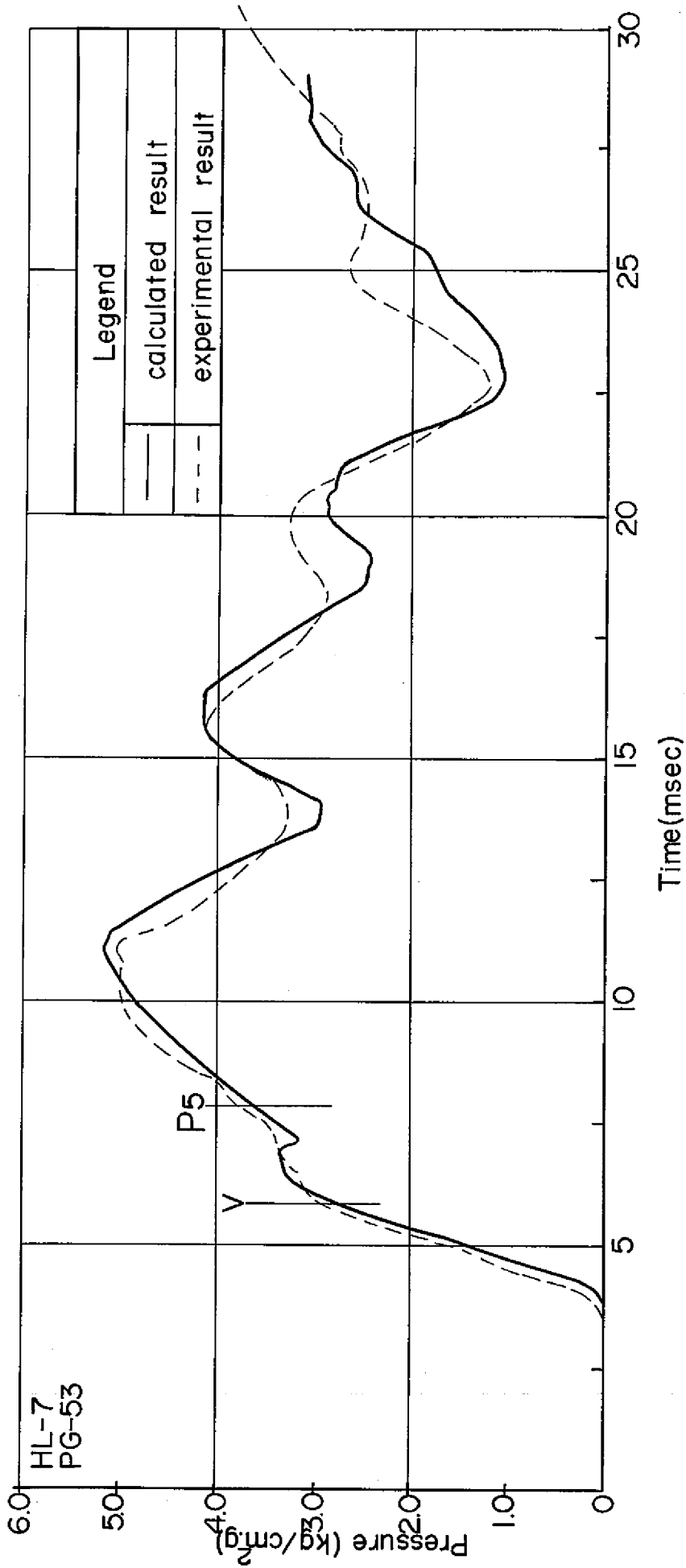


Fig. 4.10 Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-53  
 ( 3 branch at the outlet piping of S.G. model )

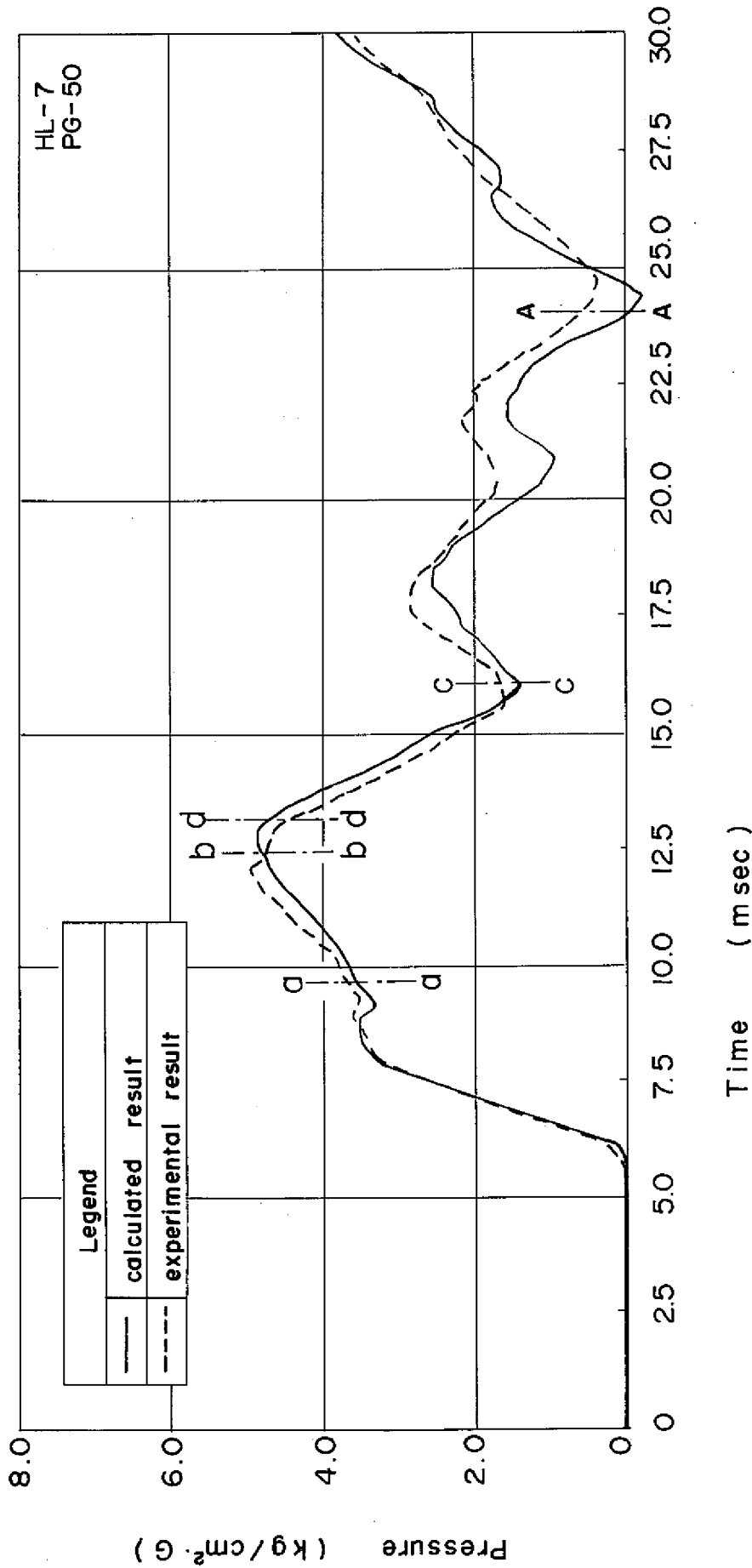


Fig. 4.11 Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-50  
(branch at outlet piping of R.H.)

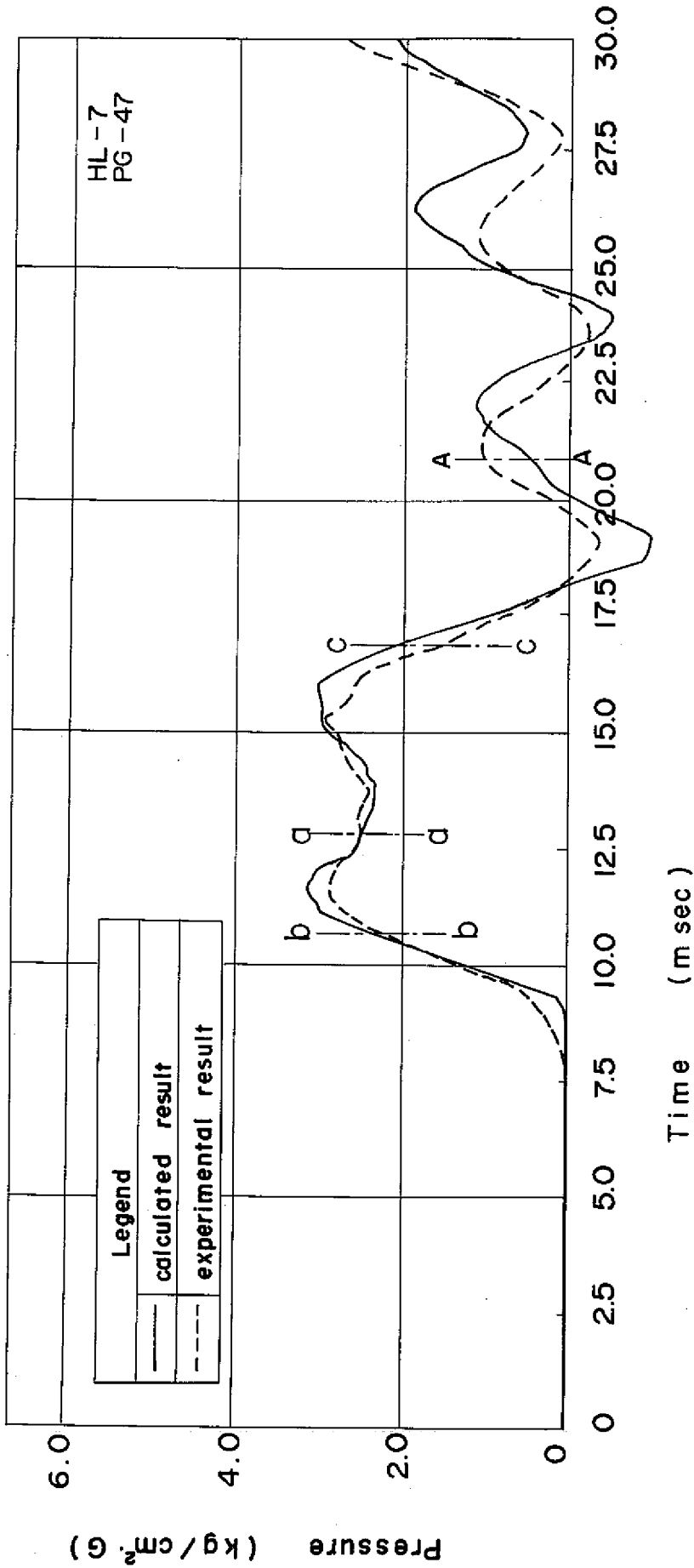


Fig. 4.12 Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-47  
(branch at piping to over-flow column)

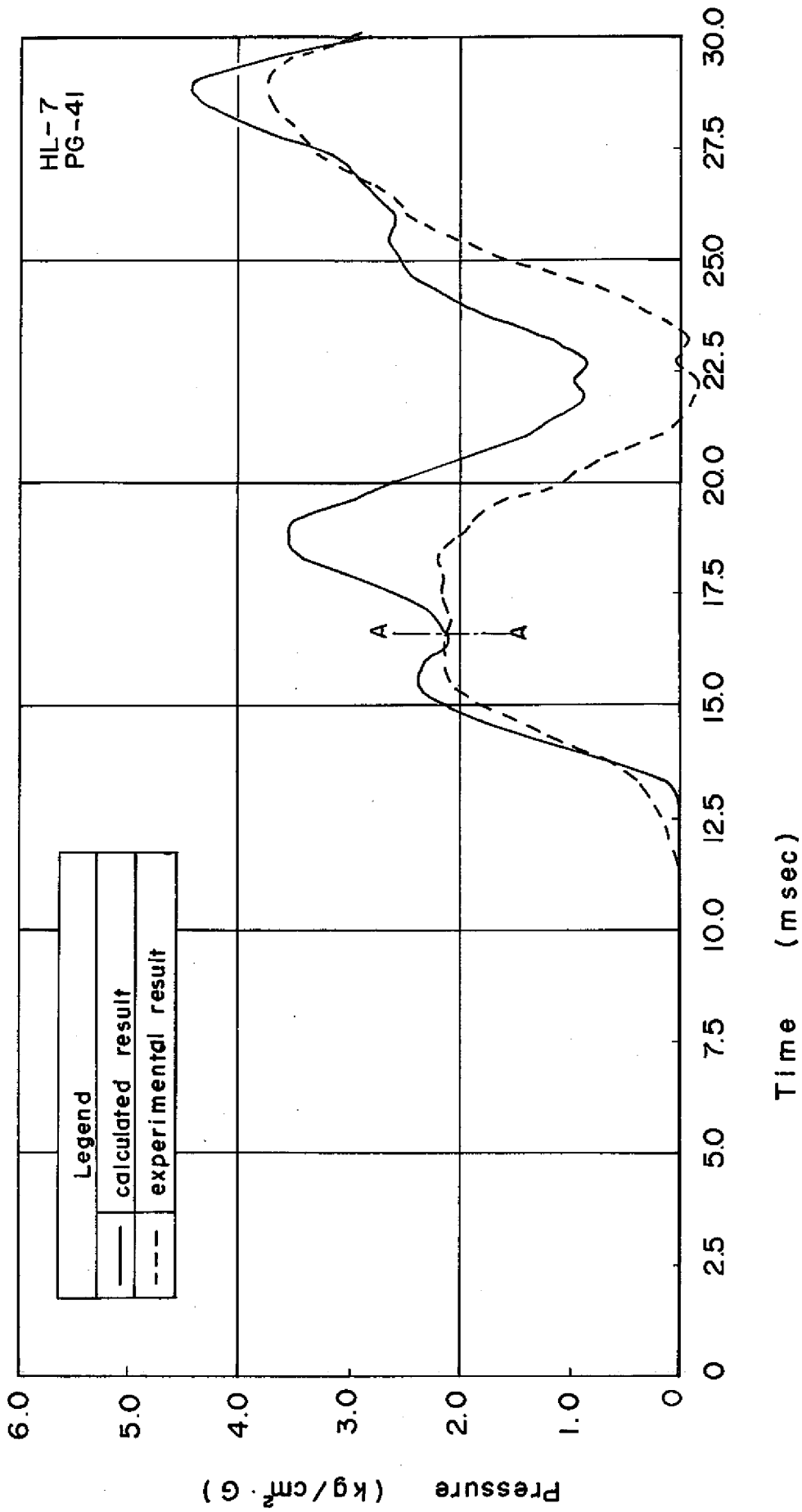


Fig. 4.13 Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-41  
(inlet piping of I.H.X.)

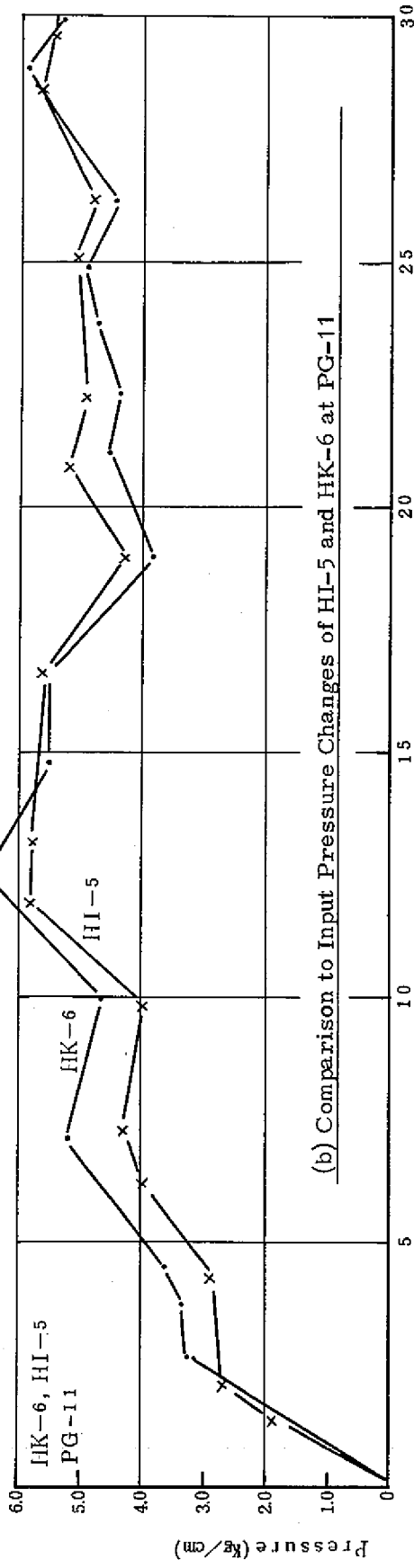
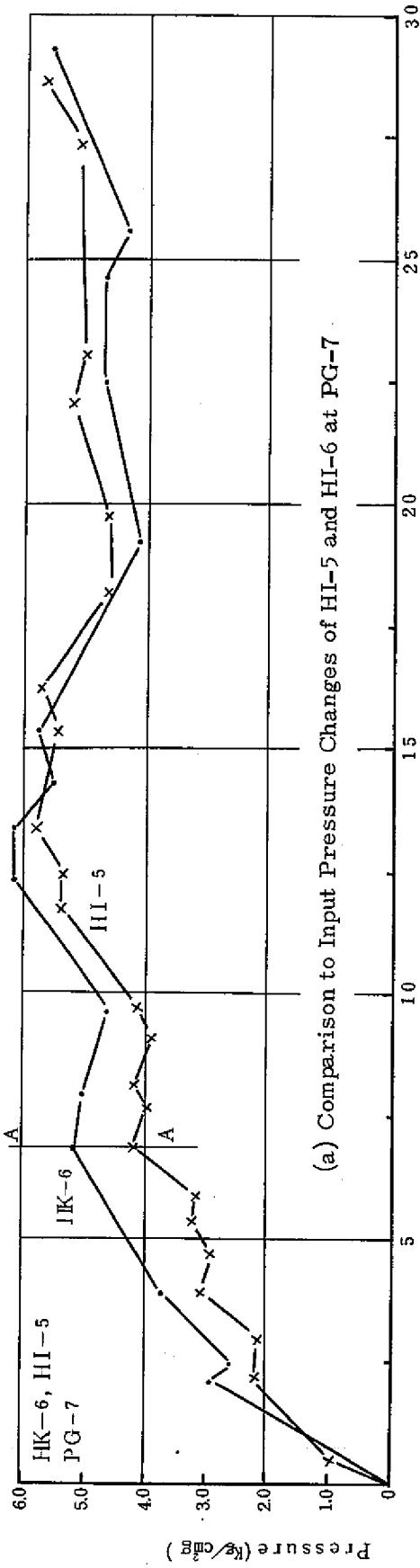


Fig. 4.14 Comparison of Measured Pressure Changes of HI-5 and HK-6 at PG-7 and PG-11

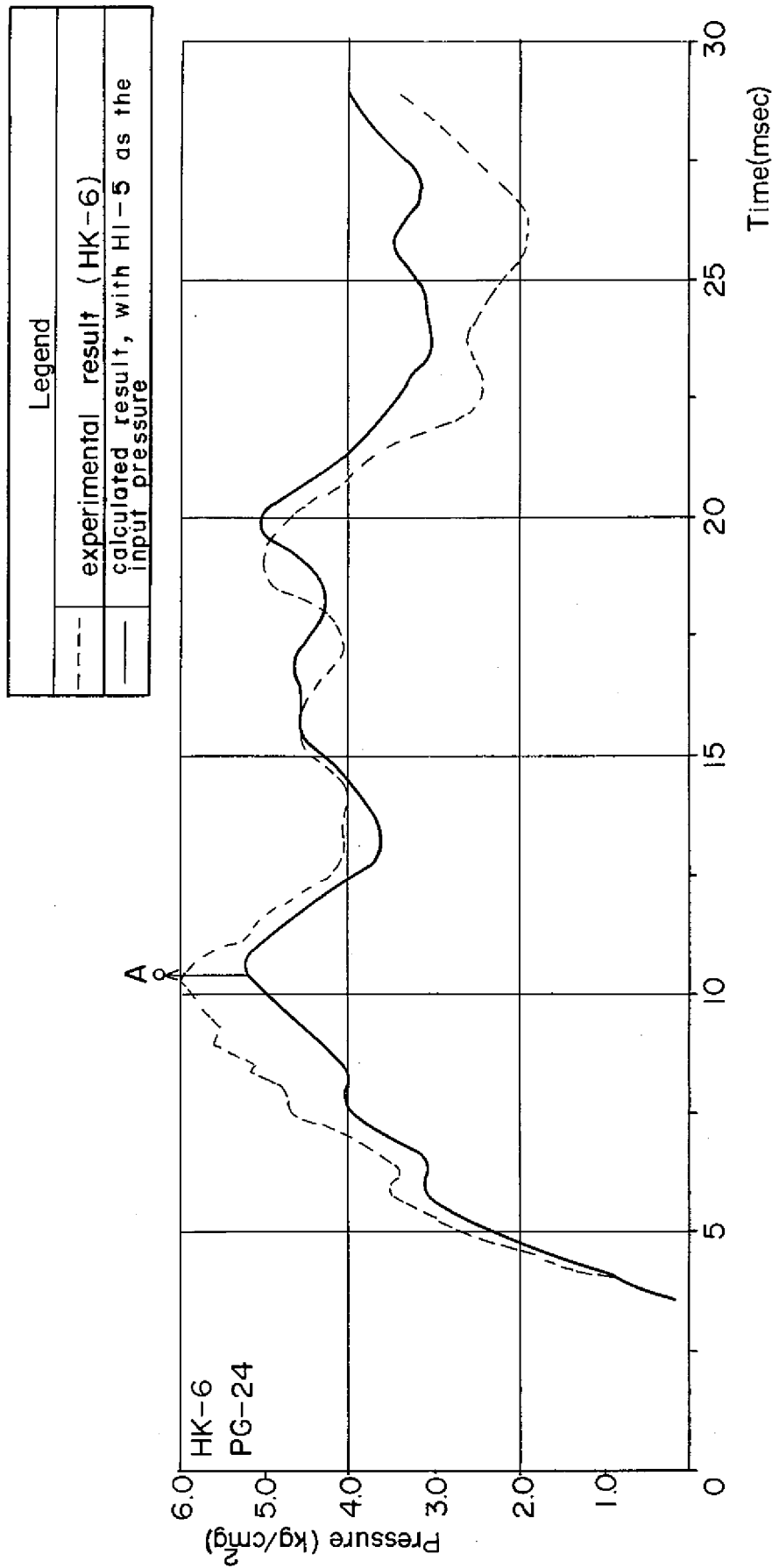


Fig. 4.15 Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-24  
(3 branch at the outlet piping of the S.G. model)

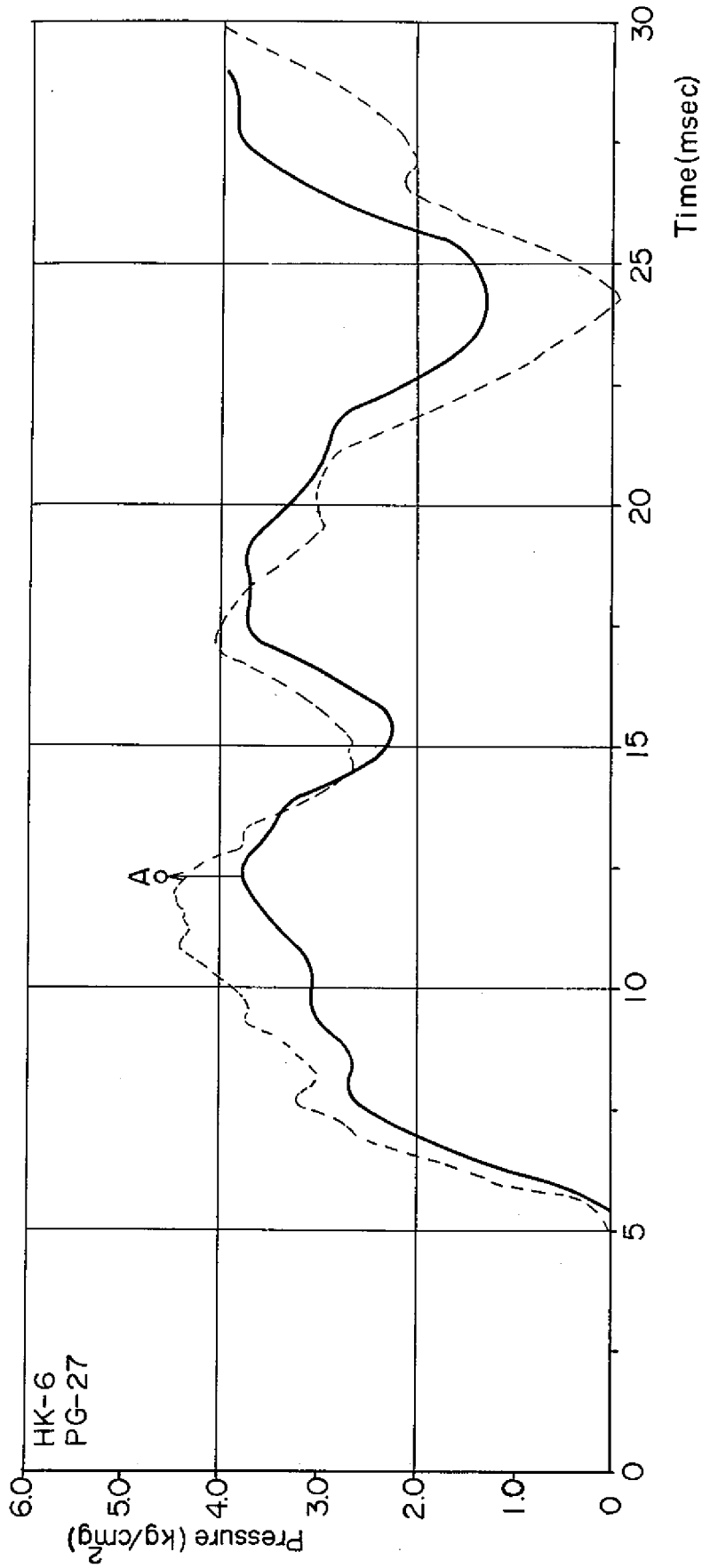


Fig. 4.16 Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-27  
( at 3 branch to R.H. model in the upper side piping )

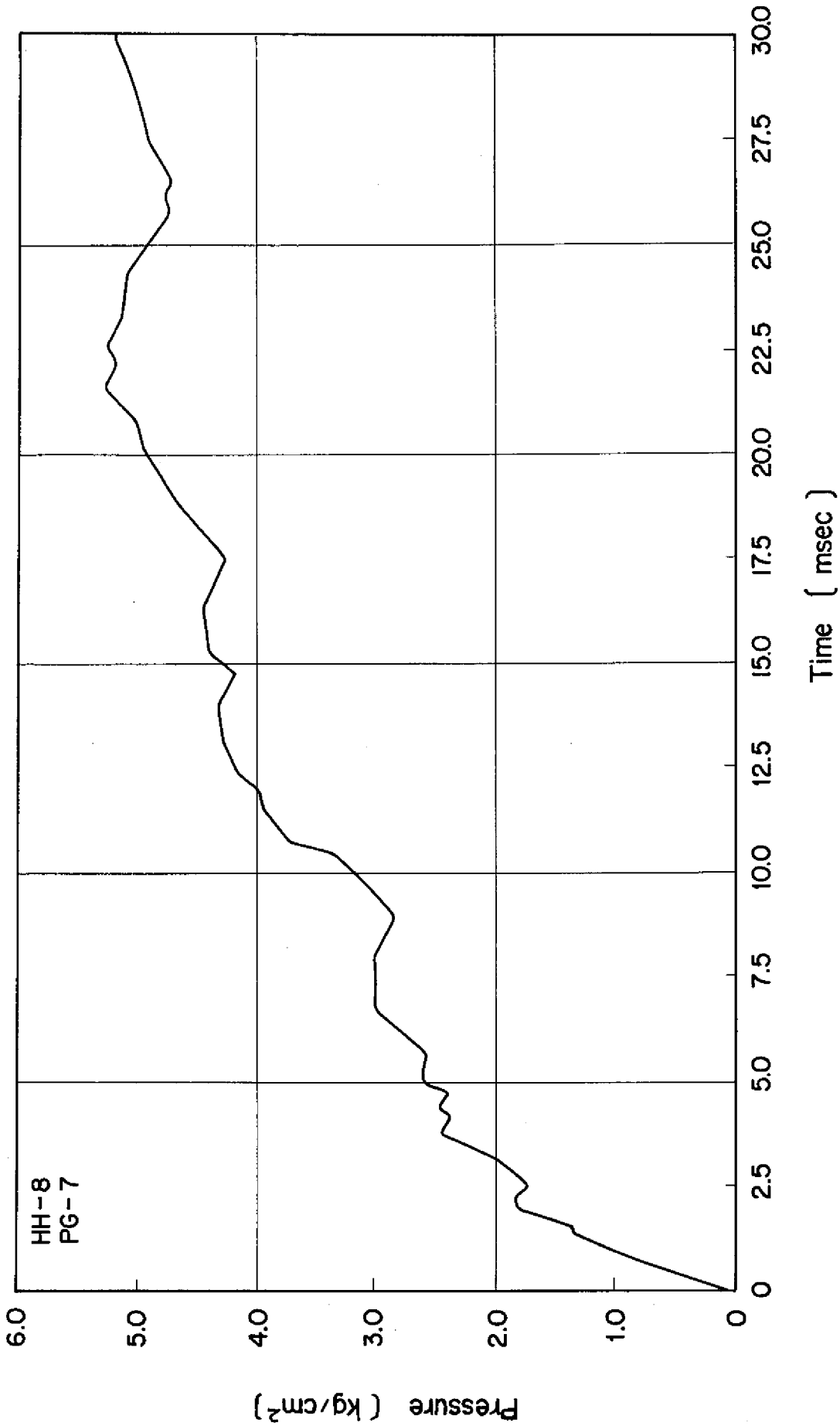


Fig. 4.17(a) Measured Pressure Change of the Experiment HH-8 at PG-7  
( This pressure change was used as the input pressure change  
at the upper outlet of S.G. model in the calculation )



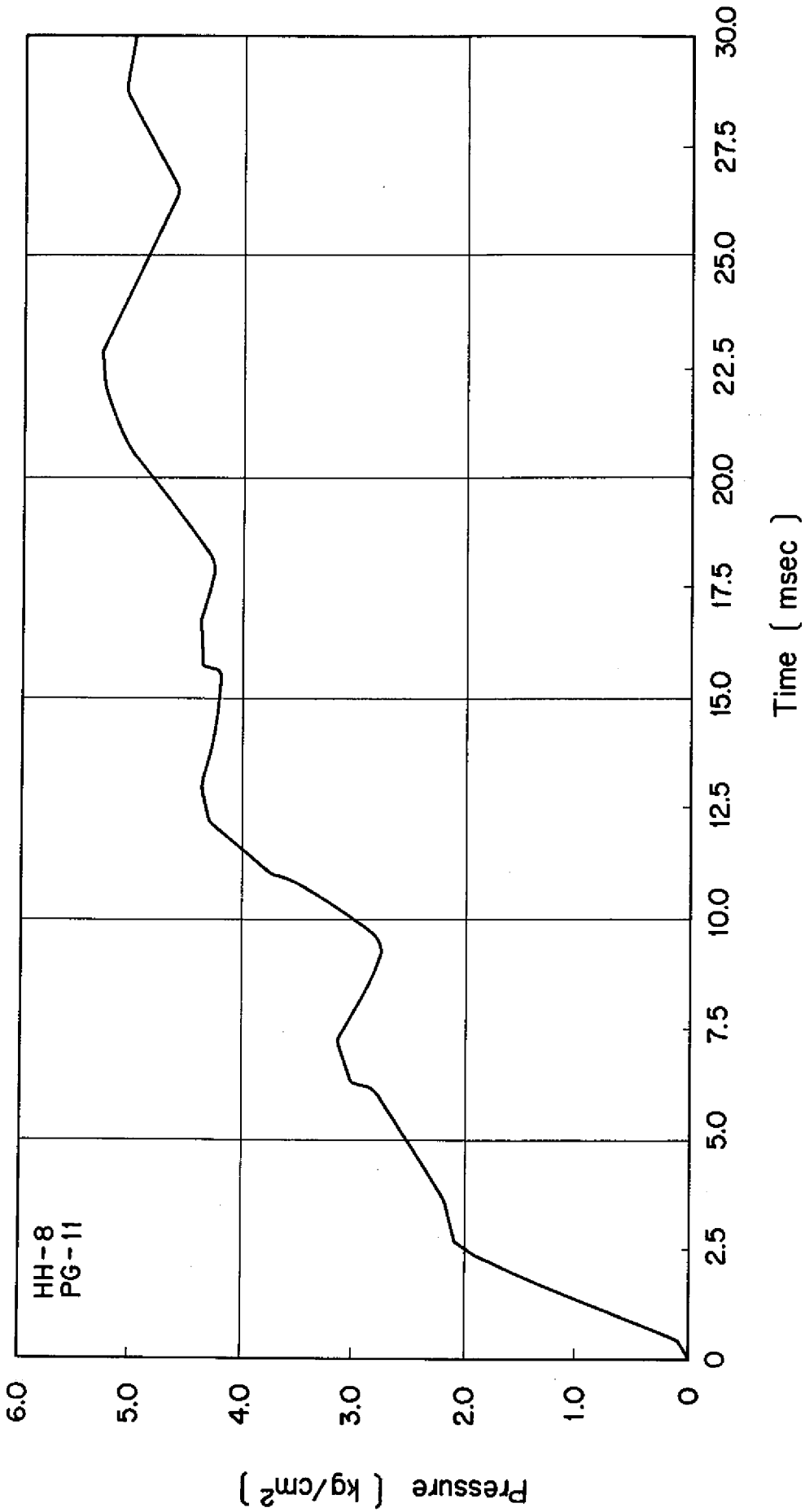


Fig. 4.17(b) Measured Pressure Change of the Experiment HH-8 at PG-11  
( This pressure change was used as the input pressure change  
at the lower outlet of S.G. model in the calculation )

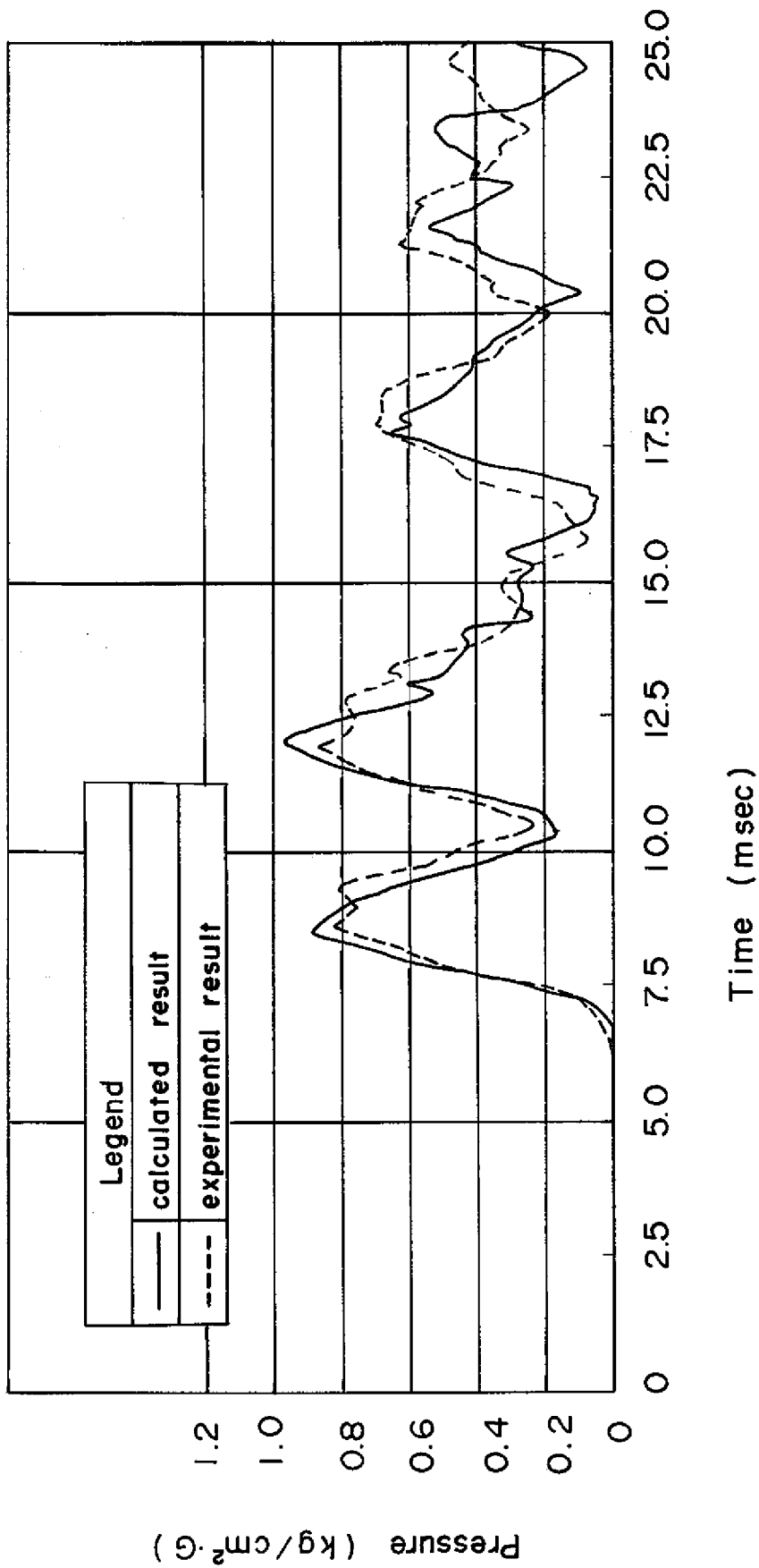


Fig. 4.18 Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-86  
(inlet piping of R.H.)

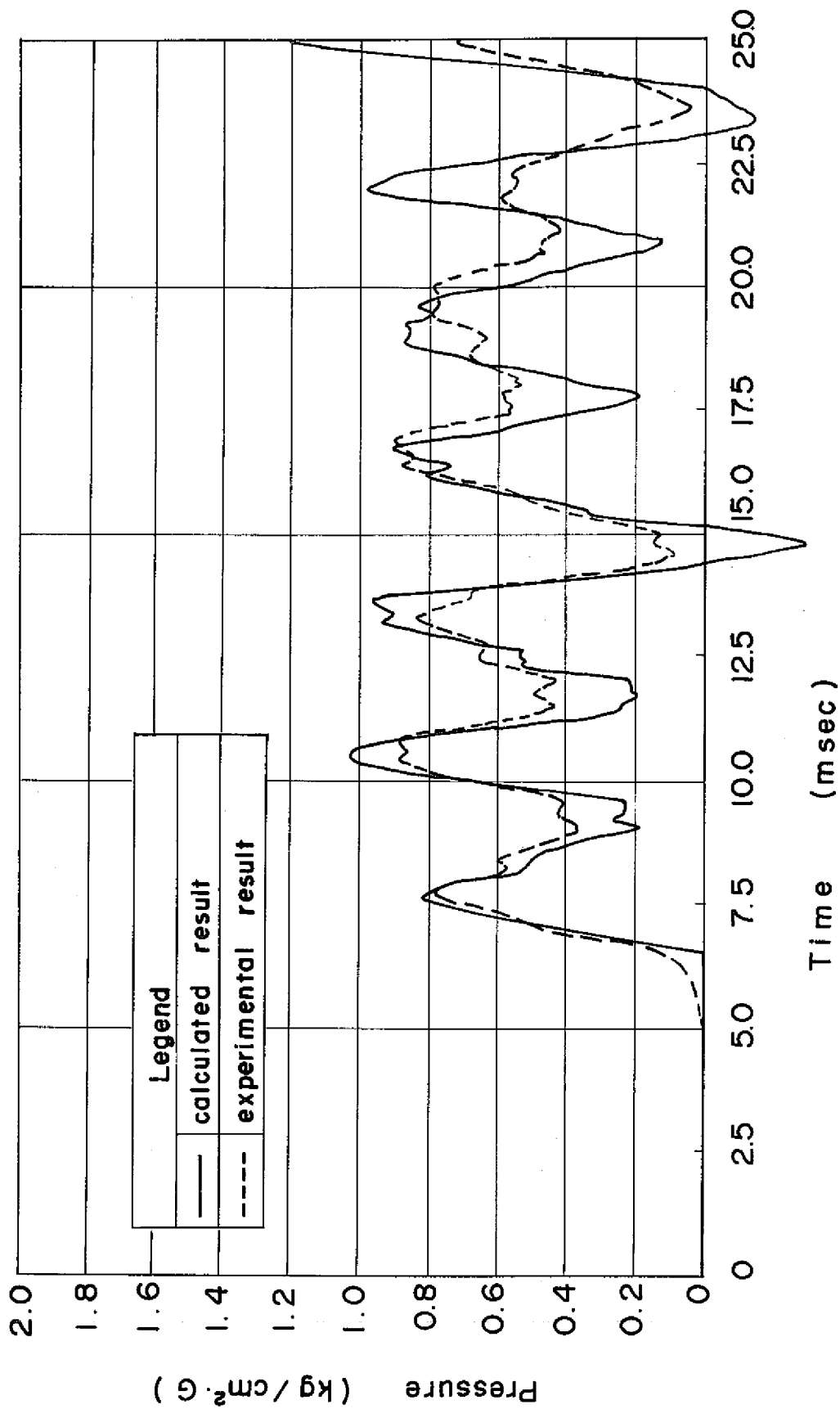


Fig. 4.19. Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-65  
(outlet piping of R.H.)

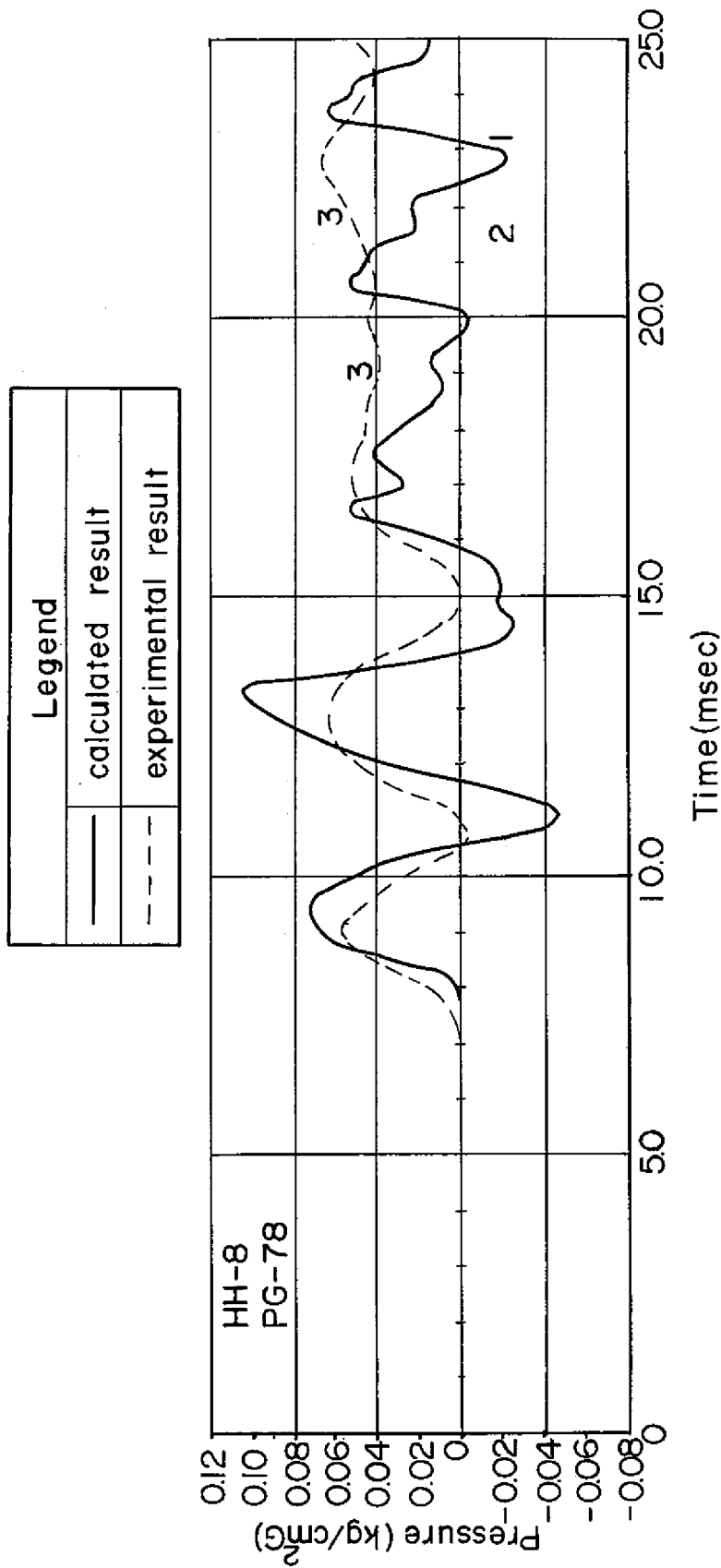


Fig. 4.20 Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-78

( lower plenum at R.H. )

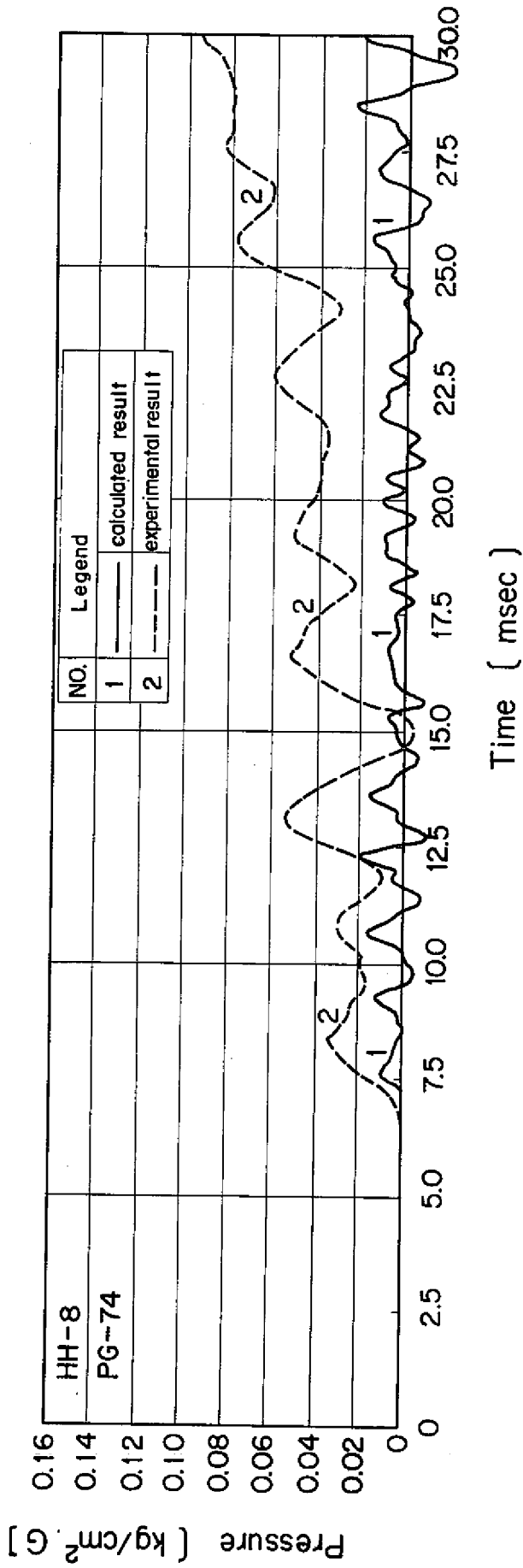


Fig. 4.21 Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-74  
(upper plenum of R.H.)

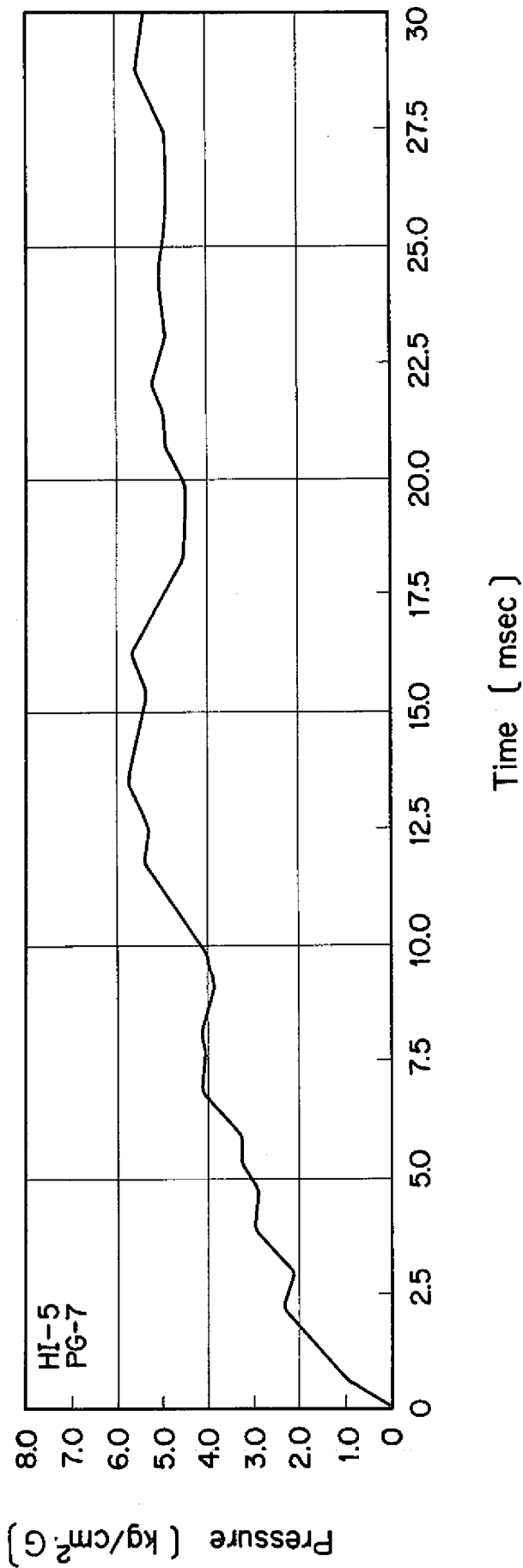


Fig.4.22(a) Measured Pressure Change of the Experiment HI-5 at PG-7  
(This pressure change was used as the input pressure change  
at the upper plenum of S.G. model in the calculation)

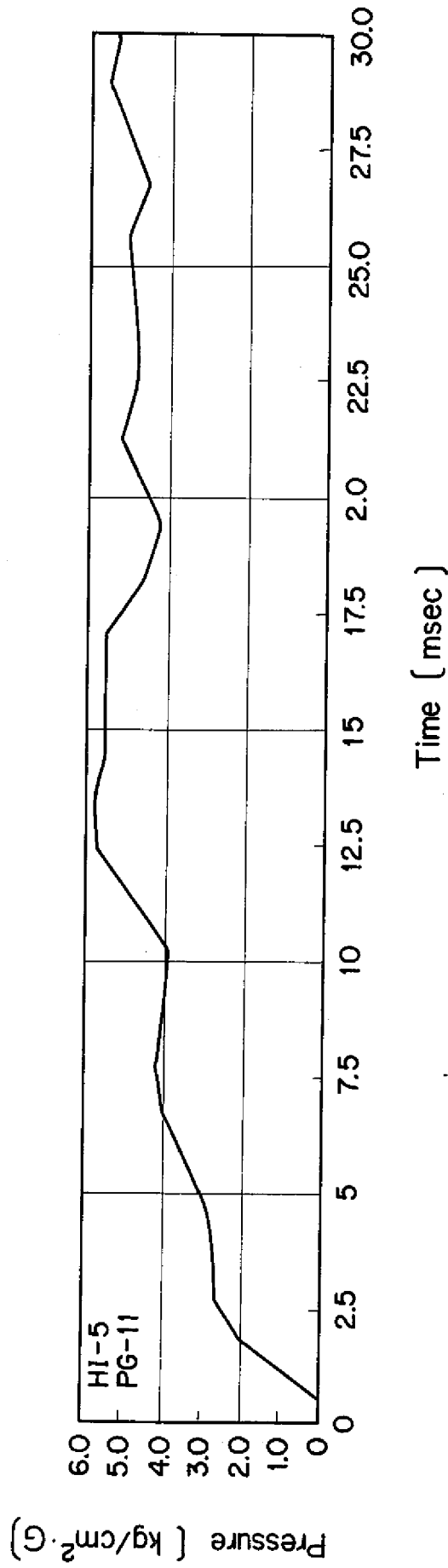


Fig. 4.22(b) Measured Pressure Change of the Experiment HI-5 at PG-11  
(This pressure change was used as the input pressure change at the lower plenum of S.G. model in the calculation)

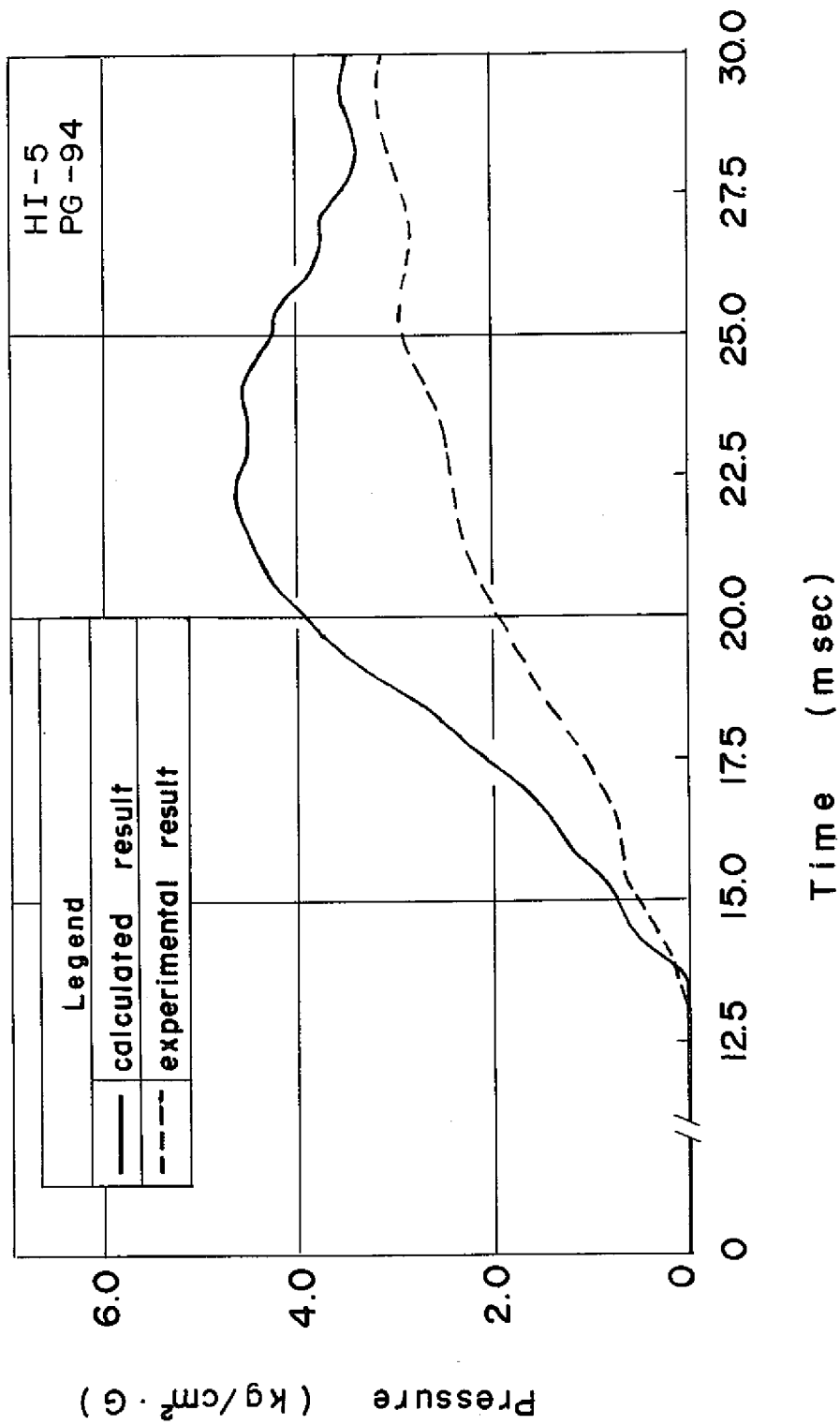


Fig. 4.23 Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-94  
(upper plenum of I.H.X.)



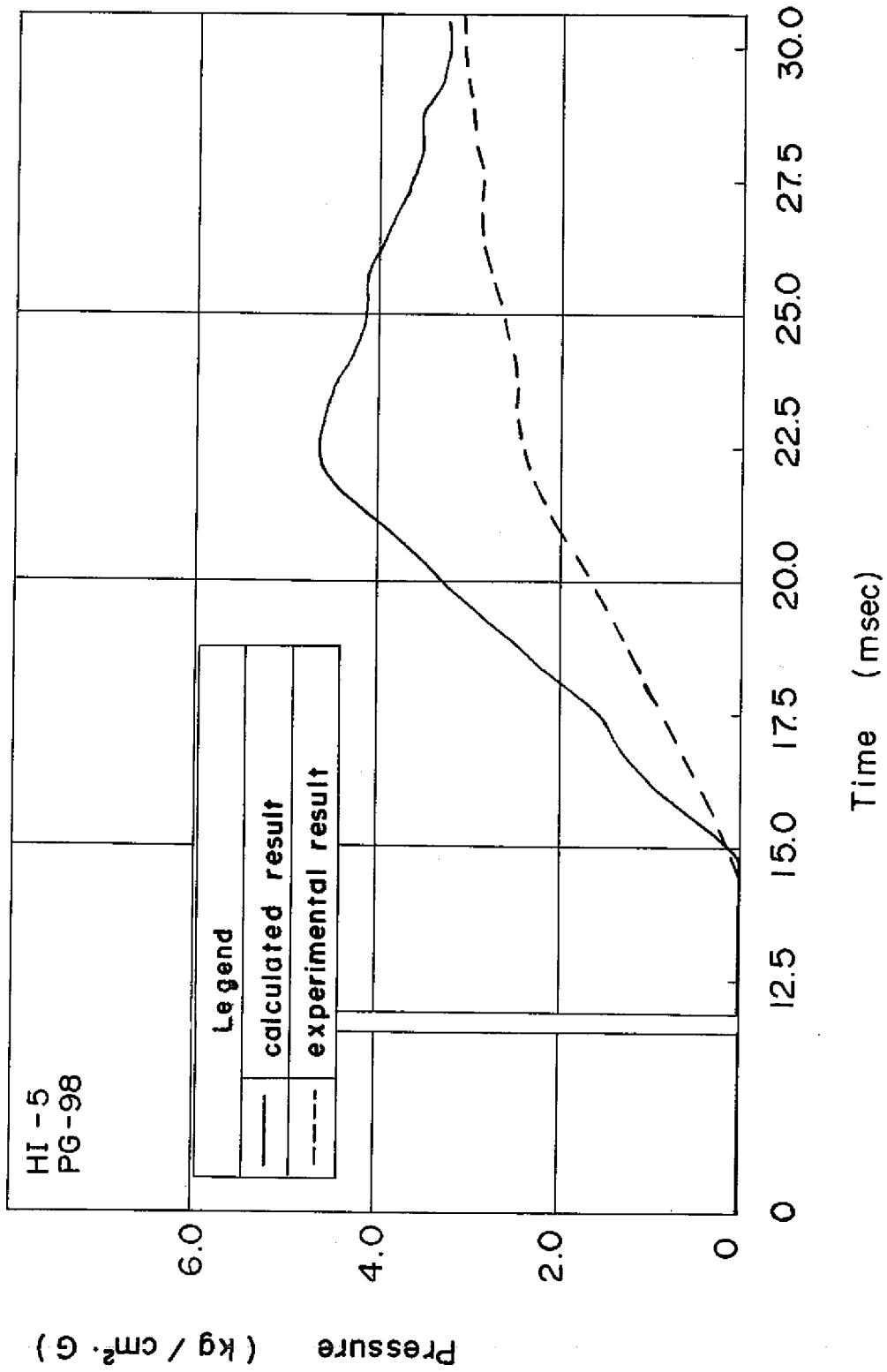


Fig. 4.24 Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-98  
(Lower plenum of I.H.X.)

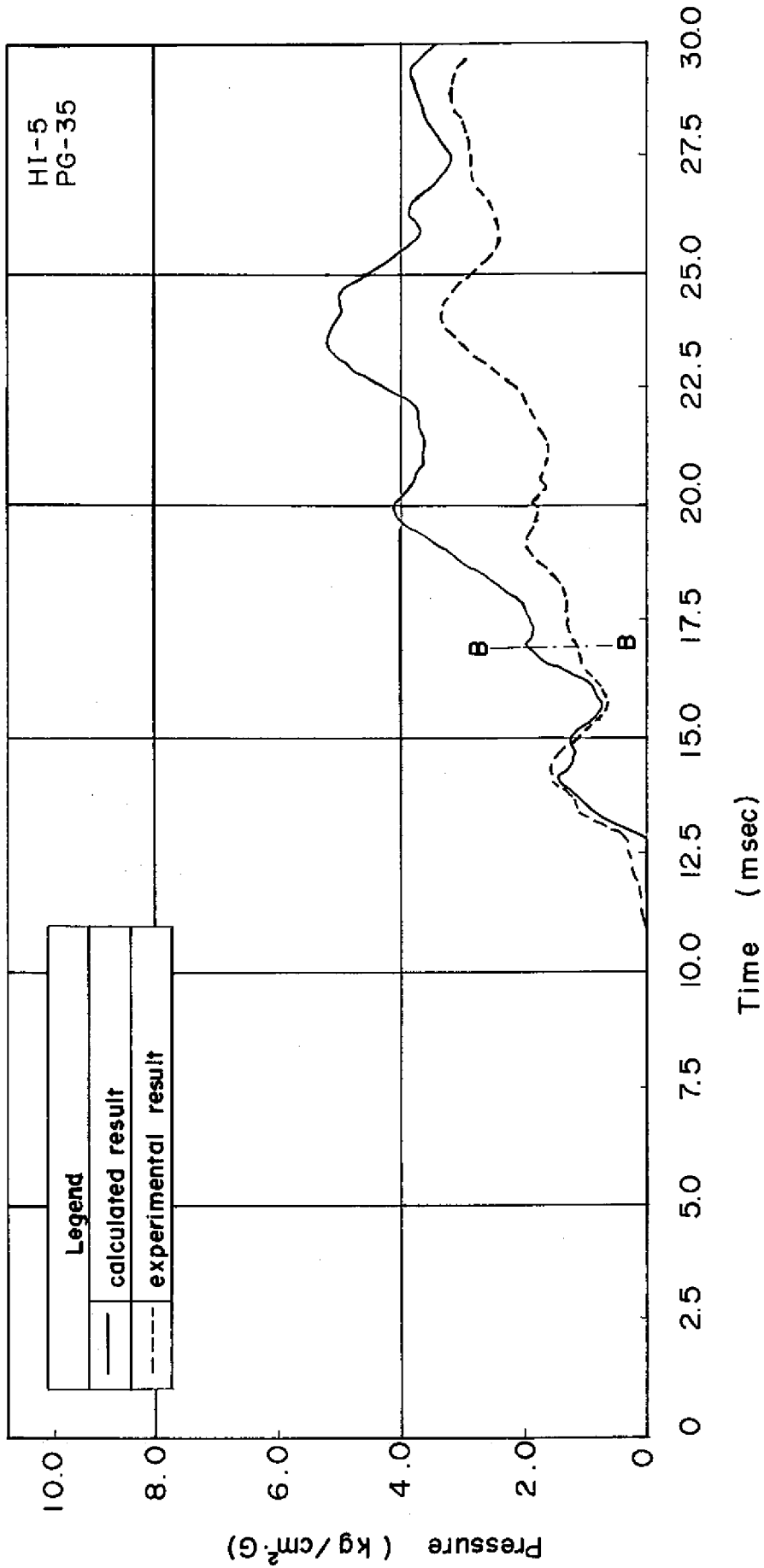


Fig. 4.25 Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-34  
(outlet piping of I.H.X.)

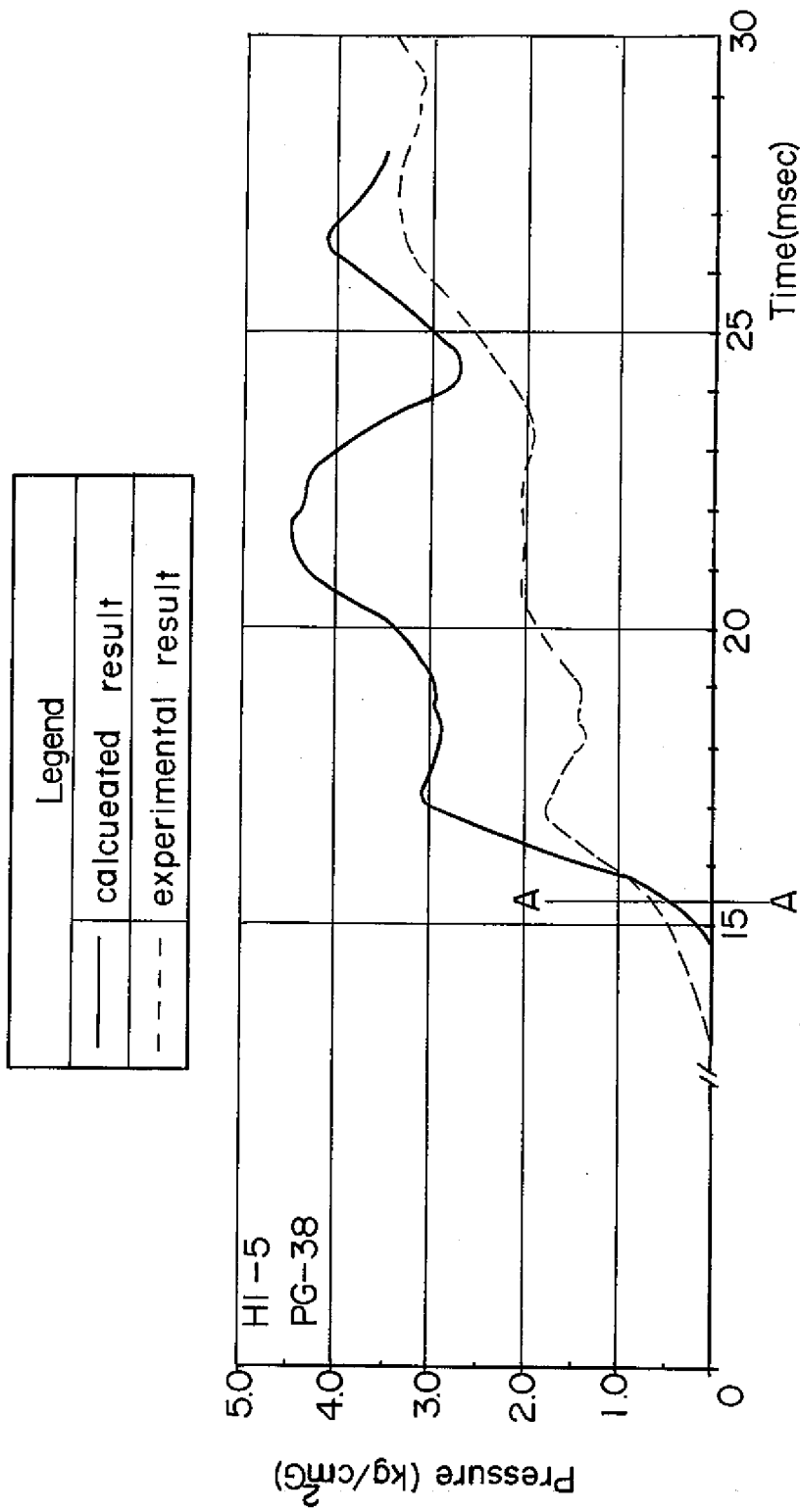
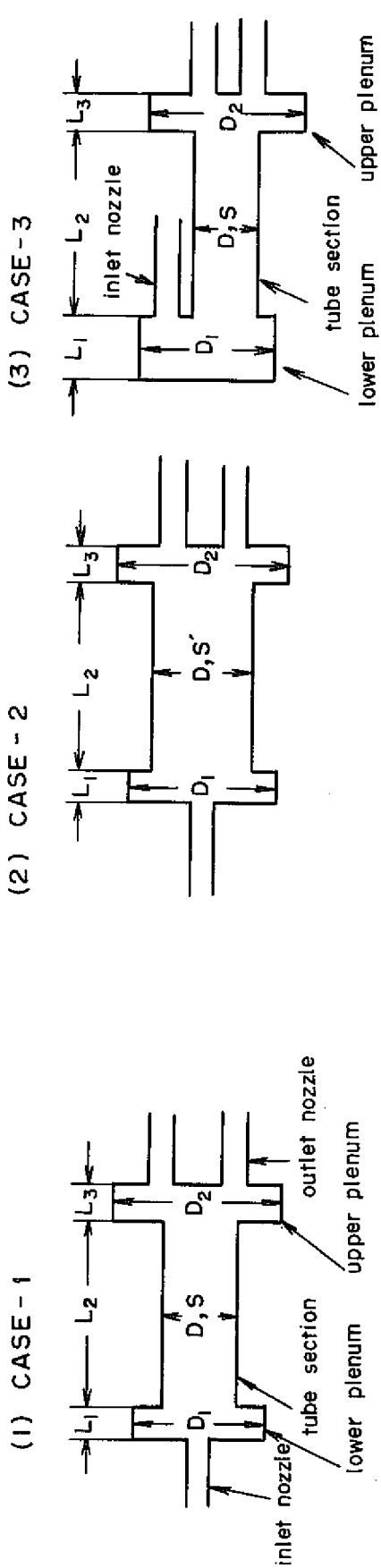


Fig. 4.26 Comparison of Experimental Result and Calculated Result at PG-38  
(inlet piping of I.H.X.)



$L_1$  ; height of lower plenum.  
 $L_2$  ; length of tube section.  
 $L_3$  ; height of upper plenum.  
 $D_1$  ; inner diameter of lower plenum  
 $D_2$  ; inner diameter of upper plenum  
 $D$  ; = 9mm (inner diameter of single tube)  
 $S$  ; total cross sectional area of all tubes.

$D$  ; inner diameter of a single tube.  
 $S'$  ; doubled area of actual cross section.

$D$  ; inner diameter of a single tube.  
 $S$  ; total cross sectional area of all tubes.

Fig. 4.27 Analytical models of I.H.X.

## 5. 結 論

ナトリウム冷却高速原型炉「もんじゅ」二次系の約1/125の縮尺モデル二次系を作成し、ナトリウムの代わりに水を使用して圧力波伝播実験を行なった。得られた実験結果と、計算コードSWAC-5K, SWAC-5H, で計算した結果と比較を行ない、次の結論が得られた。

- (1) 二次系モデルループ内における圧力変動については、中間熱交換器近辺を除き、ほとんどすべての場所で、計算結果と実験結果は良く一致している。
- (2) 中間熱交換器内部と、その近傍においては、圧力変動の波形は実験結果と計算結果とで類似しているが、波高値は計算結果の方が高い。
- (3) 中間熱交換器内部と、その近傍においては、(2)の如く、計算結果と実験結果との間に差異があるが、計算結果の方が波高値は高い。従って、安全性の検討には、計算結果を使用できると考えられる。
- (4) SWAC-5K または SWAC-5H コードによって「もんじゅ」二次系の圧力波伝播解析を行うことは妥当である。また、本報で採用した計算のモデルおよび考え方なども実験の解析に当て適用できると考える。

## 6. 謝 辞

本研究を行なうにあたり、終始ご指導、ご助言を頂いた高速炉安全性試験室佐藤稔主任研究員はじめナトリウム-水反応グループの方々、および、FBR本部齊藤毅氏に深甚の謝意を表します。

また、本稿をまとめるに当り、内容の検討、整理、報告者間の連絡等の連絡等にご尽力された高速炉安全性試験室の広井博研究員に心から感謝の意を表します。

## 7. 参 考 文 献

- (1) 官代 裕 “ポンプ系の水撃の解析”  
日本機械学会誌 Vol 70 №578 (1967) p. p. 376-383
- (2) D.C. Contractor “The Refraction of Water Hammer Pressure Waves  
from Mirror Losses”  
Journal of Basic Engineering (1965) p. p. 445-452
- (3) Streeter and Whyllie “Hydraulic Transients”  
Mcgraw-Hill book company New York
- (4) L. Streeter, C. Lay “Water Hammer Analysis Including Fluid  
Friction”  
ASCE Transactions Vol 128 Part I (1963)  
p. p. 1491-1551
- (5) C. F. Brockett et al “Peactor System Coolant Decompression  
Studies”  
Contribution to meeting on specialists on  
decompressurization effects in water cooled  
power reactors  
Frankfurt Germany June 9-13 (1969)
- (6) 田中 義久, 坂野 耿介, 進藤 喜久  
“配管系圧力波伝播実験の解析”  
日本原子力学会 秋の分科会 C. 33 (1972)
- (7) 小笠原英英雄, 川部 隆平 “Na-水反応時のFBR二次系圧力過渡変化”  
日本原子力学会 年会 F29 (1972)
- (8) 菱田 誠, 堀 雅夫 “圧力波伝播実験 第I報 分岐・ベンドにおける試験結果”  
動燃所内報告書 SN941-72-20
- (9) 菱田 誠, 佐藤 健, 堀 雅夫  
“圧力波伝播実験 第II報 中間熱交換器モデルにおける試験結  
果”  
動燃所内報告書 SN941-73-02

(10) 菱田 誠, 佐藤 健, 堀 雅夫

“ 圧力波伝播実験 第Ⅲ報 蒸気発生器モデルにおける試験結果 ”

動燃所内報告書 (PNC SN941 77-44)

(11) O.J.Foust, “ Sodium-NaK Engineering Handbook ”

Volume 1, (1972)