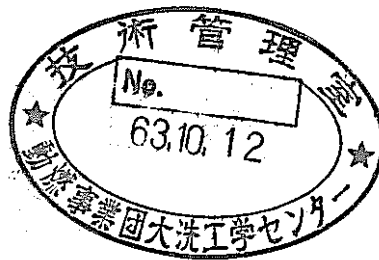


# 圧力波拳動測定試験

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)



1988年8月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	J9055 88-003(1)
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	

川崎重工業株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

## 圧力波挙動測定試験

坂野耿介\*，清水一民\*，  
吉江伸二\*，岩崎守弘\*，  
進藤嘉久\*，藤井啓次\*

### 要 旨

本試験の目的は無液面型蒸気発生器を持つ2次主冷却系におけるナトリウム-水反応時の初期スパイク圧の伝播による、圧力開放板の破裂特性とそれに伴う伝播圧力波の減圧効果を把握することである。

試験は実証炉設計例の2次主冷却系を1/5スケールにて製作し、初期スパイク圧を低爆速火薬を用いて模擬し、ナトリウムを水で置き換えて実施した。

圧力開放板の破裂特性を高速撮影により可視化した結果、開放板は約1300 m/sで到達した初期スパイク圧により変形を開始し、これより1.1 msecで反転後、水噴出し、1.7 msecで4分割され約4 msecで完全開口した。圧力開放板の破裂挙動によって、放出系配管内の伝播圧力波は約30%の減圧効果があった。但し、破裂後であっても放出系配管内圧力波は持続し、その時間は蒸気発生器内の反応点のものと同程度であった。

本試験によって圧力開放板の破裂特性が初めて明らかにされ、減圧効果を評価することができた。そしてこれらの成果はナトリウム-水反応解析コードの検証用データになる。

---

本報告書は、川崎重工業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した試験研究の成果である。

契約番号：620D072

事業団担当者：田辺裕美（大洗工学センター，安全工学部，プラント安全工学室）

\*：川崎重工業株式会社 原子力本部 技術第一部

August 31, 1988

**Pressure Wave Propagation Tests  
Simulating Sodium-Water Reaction Accidents  
by Using Slow Explosives**

K. Sakano\*, K. Shimizu\*,  
S. Yoshie\*, M. Iwasaki\*,  
Y. Shindo\*, K. Fujii\*

**A b s t r a c t**

The present tests have been executed for simulating an initial pressure spike of sodium-water reactions in a secondary coolant system with no cover-gas type steam generators and for grasping burst characteristics of rupture discs and diminution effects of propagated pressure waves.

The tests have been performed by using slow-explosives to simulate the initial pressure spike under water instead of sodium in the 1/5-scaled down secondary coolant system model of a Large Scale Fast Breeder Reactor.

The high-speed photographing indicated that the rupture disc became to deform by the initial pressure spike propagated at about 1300 m/s, to jet water after buckling in 1.1 msec later, to split to 4 parts in 1.7 msec, and to be perfectly opened itself in about 4 msec.

About 30 percent of the pressure diminution was shown for the propagated pressure wave in the discharge piping by the burst behavior of the rupture disc. After the disc was burst, however, the pressure wave held in the discharge piping and the duration time was the same as that of the reaction point in the steam generator.

For the first time, the burst characteristics of rupture discs were identified and the diminution effect was evaluated by the tests. These data are useful for verification of analytical codes of sodium-water reaction.

---

Work performed by Kawasaki Heavy Industries, Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.  
PNC Liaison : Hiromi Tanabe (FBR Plant Safety Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center)  
\* Nuclear Systems Division, Kawasaki Heavy Industries, LTD.

## 目 次

要 旨 (和文) .....	(i)
要 旨 (英文) .....	(ii)
1. 概 要 .....	1
2. 試験の目的と構成 .....	2
3. 試験装置 .....	4
4. 試験および計測方法 .....	14
5. 火薬特性試験	
5.1 低爆速火薬 .....	18
5.2 目標とする圧力源の波形 .....	18
5.3 試験条件 .....	19
5.4 試験結果 .....	19
5.5 試験結果の検討 .....	19
6. ナトリウム-水反応模擬水中試験	
6.1 真空引効果試験 .....	25
6.2 カバーガス圧効果試験 .....	34
6.3 液面影響評価試験 .....	37
6.4 圧力波影響評価試験 .....	39
6.4.1 波高値の影響 .....	39
6.4.2 持続時間の影響 .....	42
6.5 圧力発生点影響評価試験 .....	44
6.6 放出系配管レイアウト影響評価試験 .....	47
6.6.1 放出系配管の設置位置による影響 .....	47
6.6.2 主配管付放出系配管の系統数の影響 .....	49
6.6.3 胴付放出系配管の系統数の影響 .....	51
6.6.4 有液面における放出系配管の系統数の影響 .....	52
6.6.5 ラプチャーディスクの口径による影響 .....	53
6.6.6 主配管付放出系配管の長さによる影響 .....	54

6. 6. 7	胴付放出系配管の長さによる影響 .....	5 5
6. 7	圧力開放板開口挙動影響評価試験 .....	5 6
6. 7. 1	ラブチャーディスク不完全開口の影響 .....	5 6
6. 7. 2	ラブチャーディスクの型式による影響 .....	5 7
6. 7. 3	ラブチャーディスクが破裂しない場合の影響 .....	5 8
6. 8	放出流動およびラブチャーディスク破裂状況の高速撮影結果 ..	6 2
6. 8. 1	流動状況の観察 .....	6 2
6. 8. 2	ラブチャーディスク破裂状況の観察 .....	6 3
7.	結 言 .....	7 6
	謝 辞 .....	7 9

## 1. 概 要

高速増殖炉の蒸気発生器には有液面型と無液面型とがある。日本において、有液面型は原型炉「もんじゅ」に採用されており、ナトリウム－水反応に関する圧力波挙動に関する試験は実施されているが、無液面型については実施されていない。

無液面型では有液面型のようなナトリウム自由液面での圧力波の散逸効果が期待できないため、圧力波伝播挙動は有液面型に比べて場所によっては圧力波高値が相対的に高くなる事が予想される。また圧力開放板が接液型となる事から、開放特性や開口挙動と圧力との関係も有液面型と異なると考えられる。

本試験はFBR実証炉設計例である2次冷却系の縮尺試験装置（水ループ）を製作し、低爆速火薬を用いてナトリウム－水反応による初期スパイク圧を模擬して、主に無液面型を対象に、圧力波伝播挙動を把握することを目的として実施するものである。

## 2. 試験の目的と構成

無液面型蒸気発生器を主として、スパイク圧の2次冷却内の伝播挙動を定量的に把握すると同時に圧力開放板の開放特性や開口挙動が圧力波伝播に与える影響を調べる事を目的とする。

以上を踏まえて本試験は具体的には以下の試験により構成される。

### (1) 火薬特性試験

圧力波の伝播挙動を調べるに当って、スパイク圧を模擬し得る低爆速火薬の薬種、粒度、薬量および火薬殻強さを決定するために実施する。

### (2) ナトリウム－水反応模擬水中火薬試験

#### (i) 真空引効果試験

系統内を真空引きした場合と大気圧にてオーバーフロー方式によるガス抜きをした場合とで音速を比較する事によりオーバーフロー方式の気泡の存在の有無を確認するために実施する。

#### (ii) カバーガス圧効果試験

カバーガス圧の圧力波形への影響度を調べるために実施する。

#### (iii) 液面影響評価試験

無液面型及び有液面型蒸気発生器の圧力挙動の違いを明らかにするため、蒸気発生器にカバーガス部を設置した場合と除いた場合について、その影響を比較する。

#### (iv) 圧力波形影響評価試験

圧力波の波高値及び持続時間をパラメータとして、圧力波伝播挙動に及ぼす影響を把握する。

#### (v) 圧力発生点影響評価試験

圧力発生点の位置を蒸気発生器内で変え、圧力波伝播挙動に及ぼす影響を把握する。

#### (vi) 圧力開放系配管レイアウト影響評価試験

圧力開放系配管の設置位置、系統数、および配管サイズをパラメータとして、



圧力波伝播挙動に及ぼすその影響を把握する。

(VII) 圧力開放板開口挙動影響評価試験

圧力開放板の型式による差異、及び不完全開口の及ぼす影響を把握する。

### 3. 試験装置

試験装置はFBR実証炉設計例の2次主冷却系を模擬したもので、1/5スケールにて製作した。本装置はFig. 3. 1の系統図に示すように蒸気発生器(SG)、中間熱交換器(IHX)、膨張タンクおよび2次冷却系配管よりなる実証炉の2次系を模擬した部分と、空気分離器、真空ポンプ、循環ポンプ、配管、弁よりなる脱ガス部および試験体中にカバーガスを供給するための加圧部により構成されている。

本装置の主要材料は炭素鋼であり、試験で発生させる最大波高値 $40 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  (持続時間; 20msec) に対応して、室温にて静圧 $40 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  に耐え得る構造とした。SGには反応点の位置を変えられるように、軸方向に3つのフランジ型の火薬搬入口(ハッチ)を設けた。また将来、内部構造物を挿入可能なようにSG上部はフランジ構造とした。IHXは実機の2次側流路断面積を縮尺模擬した。ラブチャーディスクは口径3インチと4インチのものが取付けられるようにし、材質は実機での使用が予想されるインコネル600を選択した。またラブチャーディスクの型式は反転ナイフ型と反転スコア型の2種類とした。設定破裂圧は実機の設計例を参照して $7 \text{ kg/cm}^2$ とした。

各機器の仕様をTable 3. 1に示す。装置の配管配置およびSGの詳細寸法をFig. 3. 2, 3. 3に、ラブチャーディスクの寸法をFig. 3. 4~3. 6に示す。また試験装置の外観をPhoto 3. 1に示す。

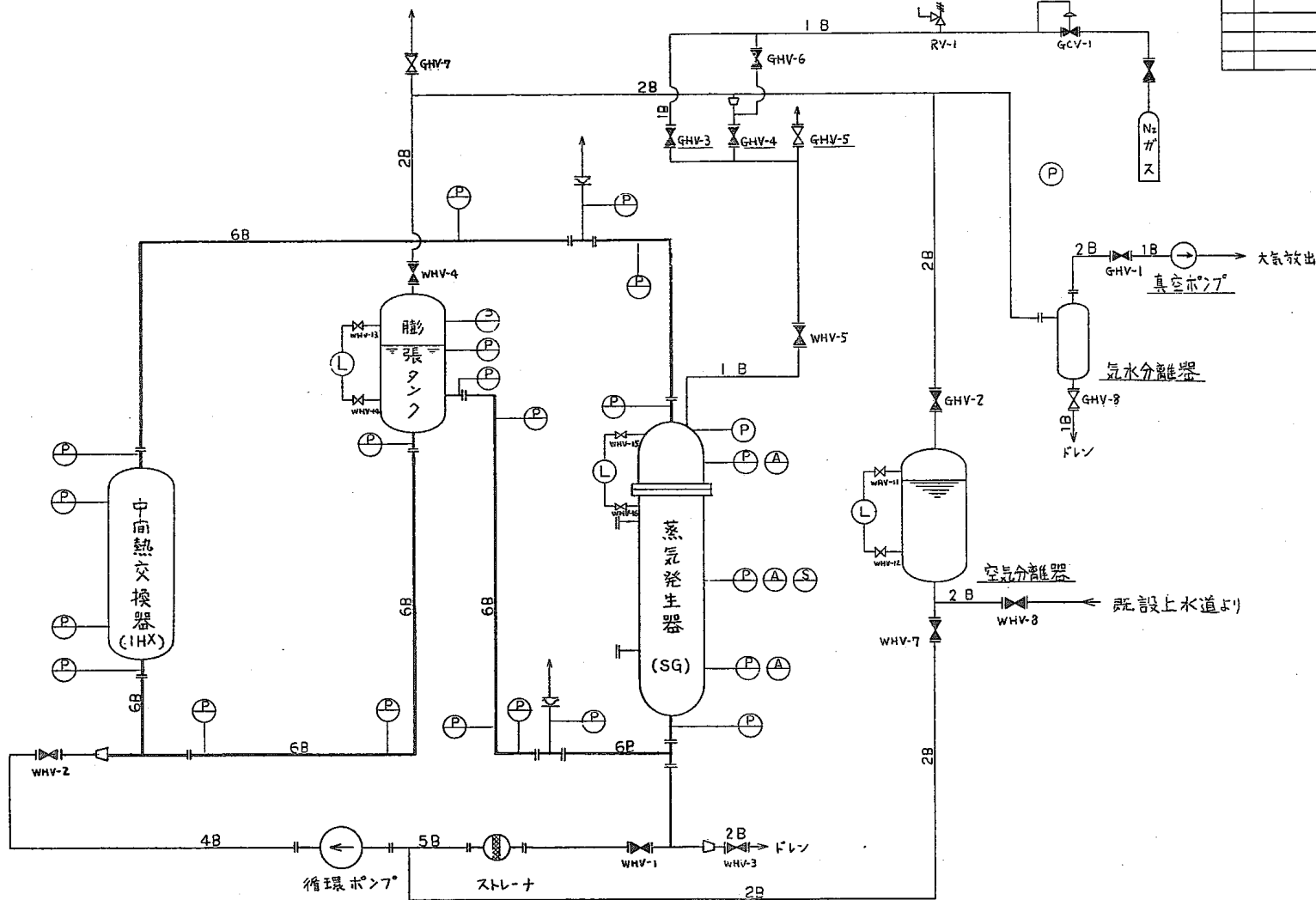
Table 3.1 Component's Specifications

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

Table 3.1 Component's Specifications (continued)

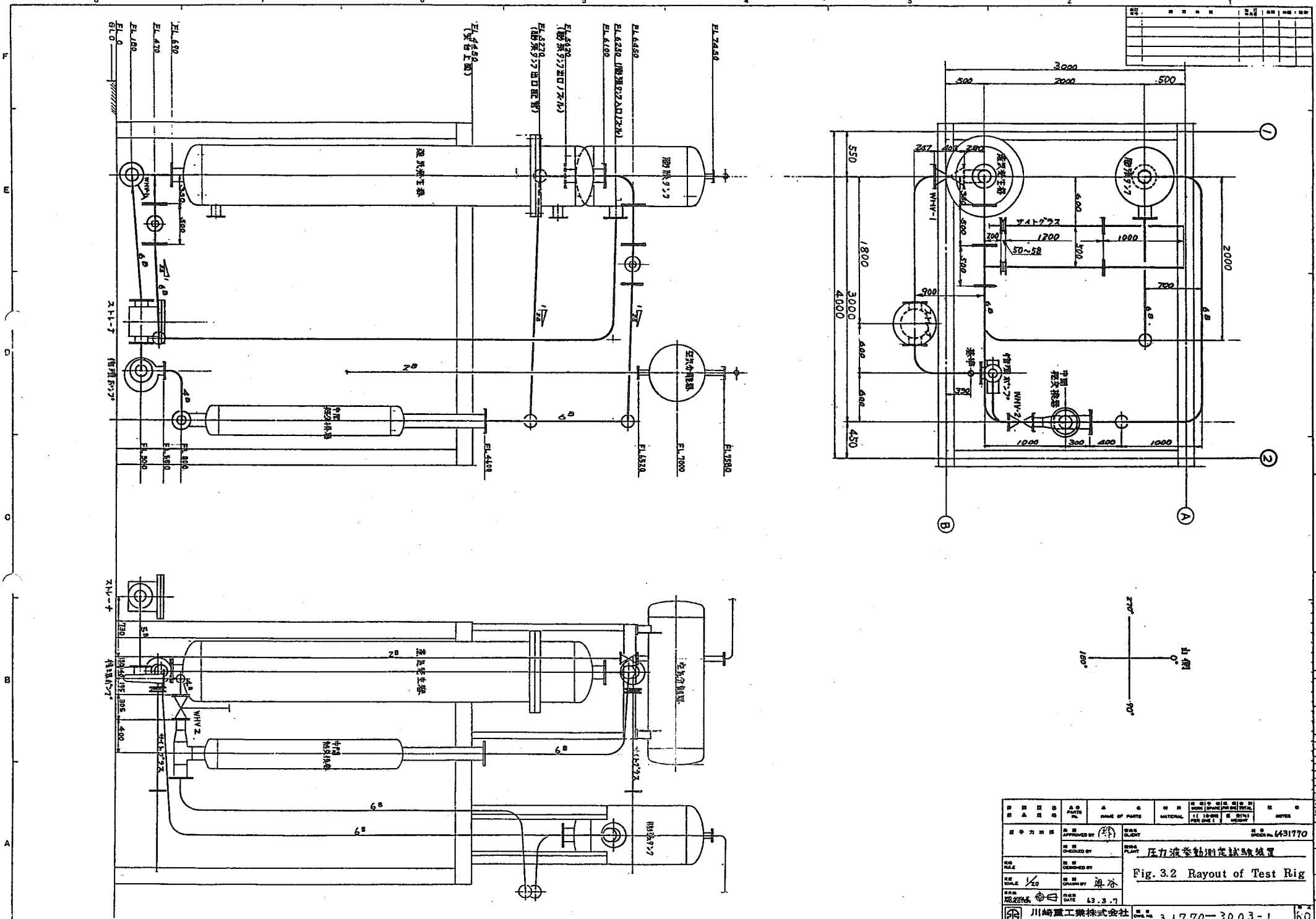
Items	Specifications		
5. Secondary Loop Material Outer Diameter×Thickness	STPG 38 165.2mm×7.1mm 6B sch 40		
6. Rupture Disc Type Nominal Diameter Material Burst Temperature Burst Pressure Quantity	Reverse Buckling with blades 3B Inconel 600 22°C 7.0 kg/cm <sup>2</sup> .g 60		Scored Reverse Buckling 3B Inconel 600 22°C 7.0 kg/cm <sup>2</sup> .g 10
7. Pump Type Head Flow Rate Diameter Revolution Rated Power	Single stage, Single suction, Volute 10 m 2.5 m <sup>3</sup> /min Suction : 125 mm Discharge : 100 mm 1480 rpm 5.5 kW		
8. Vaccum Pump Type Discharge Rate Vaccum Pressure Rated Power Revolution Diameter	Oil Type 320 ℓ/min 2.7×10 <sup>-2</sup> Pa 0.75 kW 1200 rpm suction 1 B exhaust 1½ B		

訂正 番号	訂正 理由	訂正 年月日	承認 者	検印	設計
RO	6431770 に使用可	56.3.2.12	藤井	藤井	藤井

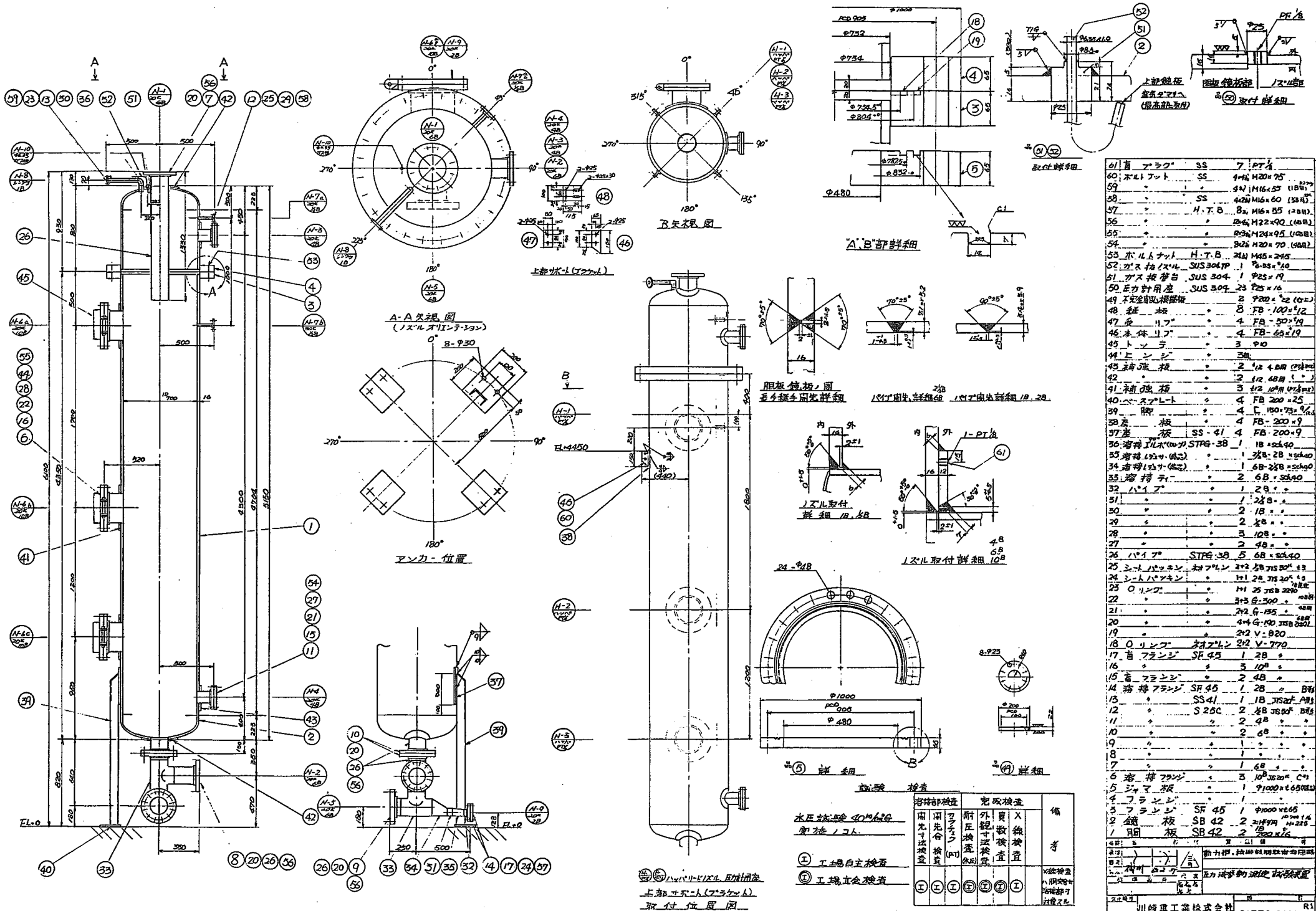


詳細図書 部品規格	部品名 PARTS No.	品名 NAME OF PARTS	材料 MATERIAL	常備予備個数合計 WORK   SPARE FOR ONE   TOTAL		記号 NOTES
				( ) 分個数 PER ONE ( )	重量 (kg) WEIGHT	
原子力本部 承認	承認 APPROVED BY	発注先 CLIENT 動力炉核燃料開発事業団 図番 6431770				
規格 RULE	検印 CHECKED BY	設置先 PLANT				
尺度 SCALE	設計 DESIGNED BY	Fig. 3.1 Flow Diagram				
三角形 記号	製図 DRAWN BY	製図日 DATE 56.3.5				
川崎重工業株式会社 KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES, LTD.			図番 DWG. No. 31770-3002-2			訂正 RO

TITLE
ITEM No.
承認印
出図先
工務
検査
図庫
出図部
送受部
検査部
出図日



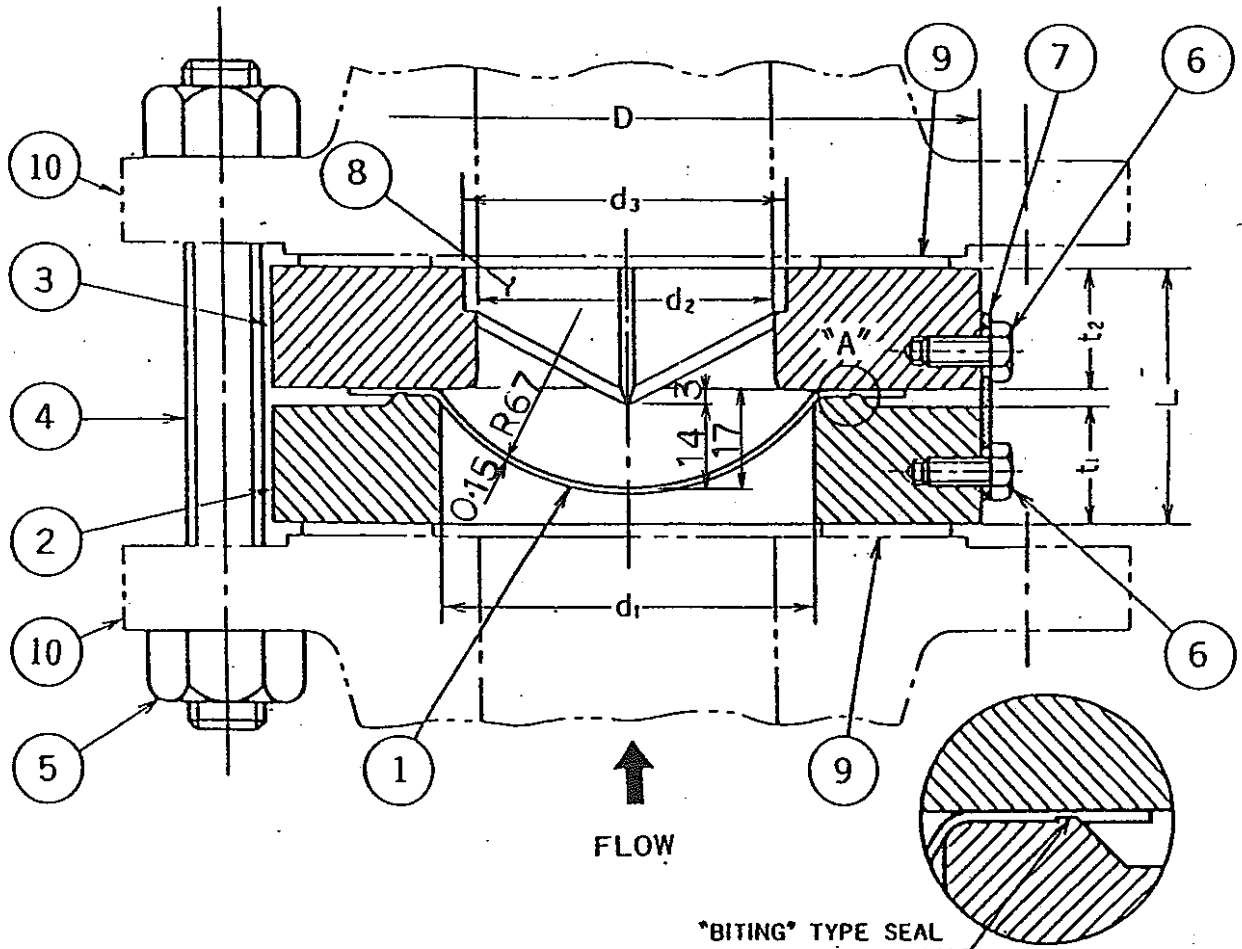

製図者 川崎重工業株式会社	承認者 川崎重工業株式会社	図名 圧力液巻動測定試験装置	図号 6431770
設計者 川崎重工業株式会社	検査者 川崎重工業株式会社	Fig. 3.2 Rayout of Test Rig	
設計 川崎重工業株式会社	承認 川崎重工業株式会社	DATE 43.3.7	NO. 31770-3003-1
川崎重工業株式会社 KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES, LTD.		図例	NO. KO



61	直アライフ	SS	7	PT	4
60	ホルムナット	SS	4	M20x75	
59	ホルムナット	SS	4	M16x55 (180)	
58	ホルムナット	SS	4	M16x60 (38)	
57	ホルムナット	H.T.B	8	M16x55 (180)	
56	ホルムナット	SS	2	M22x90 (40)	
55	ホルムナット	SS	2	M24x95 (40)	
54	ホルムナット	SS	2	M20x70 (38)	
53	ホルムナット	H.T.B	2	M16x24	
52	ホルムナット	SUS304	1	φ25x10	
51	ガス接合部	SUS304	1	φ25x19	
50	電力計用座	SUS304	2	φ25x16	
49	不銹鋼板	SS	2	φ20x22 (40)	
48	板	SS	8	FB-100x12	
47	板	SS	4	FB-50x19	
46	板	SS	4	FB-50x19	
45	板	SS	3	φ10	
44	板	SS	3	φ10	
43	板	SS	2	φ4.8M (40)	
42	板	SS	2	φ4.8M (40)	
41	板	SS	3	φ4.8M (40)	
40	板	SS	4	FB-200x25	
39	板	SS	4	E-150x75x9	
38	板	SS	4	FB-200x9	
37	板	SS	4	FB-200x9	
36	板	SS	1	18x54x40	
35	板	SS	1	38x28x54x40	
34	板	SS	1	68x28x54x40	
33	板	SS	2	68x54x40	
32	板	SS	1	28x16	
31	板	SS	1	28x16	
30	板	SS	2	18x16	
29	板	SS	2	28x16	
28	板	SS	3	108x16	
27	板	SS	2	48x16	
26	板	SS	5	68x54x40	
25	板	SS	2	28x75x54x40	
24	板	SS	1	28x75x20x40	
23	板	SS	1	28x75x20x40	
22	板	SS	1	25x75x20x40	
21	板	SS	2	42x135x48	
20	板	SS	4	φ100x75x20x20	
19	板	SS	2	φ100x75x20x20	
18	板	SS	2	φ100x75x20x20	
17	板	SS	1	28x16	
16	板	SS	3	108x16	
15	板	SS	2	48x16	
14	板	SS	1	28x16	
13	板	SS	1	18x75x40	
12	板	SS	2	28x75x40	
11	板	SS	2	48x16	
10	板	SS	2	68x16	
9	板	SS	1	28x16	
8	板	SS	1	28x16	
7	板	SS	1	68x16	
6	板	SS	3	108x16x40	
5	板	SS	1	φ100x68x20	
4	板	SS	1	φ100x68x20	
3	板	SS	1	φ100x68x20	
2	板	SS	2	28x75x40	
1	板	SS	2	28x75x40	

Fig. 3.3 Steam Generator

TAG NO.	RATING	DIMENSION (mm)								
		D	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	L (APPROX)		
	80A, JIS 20K (3B)	138.0	89.0	76.2	80.0	23.8	25.0	50		



MAX. ALLOWABLE OPERATING PRESSURE 5.9 kg/cm<sup>2</sup> & F.V.

BOLTING TORQUE ON EACH NUT (PART NO. 5) 1659 kg-cm

DETAIL "A"

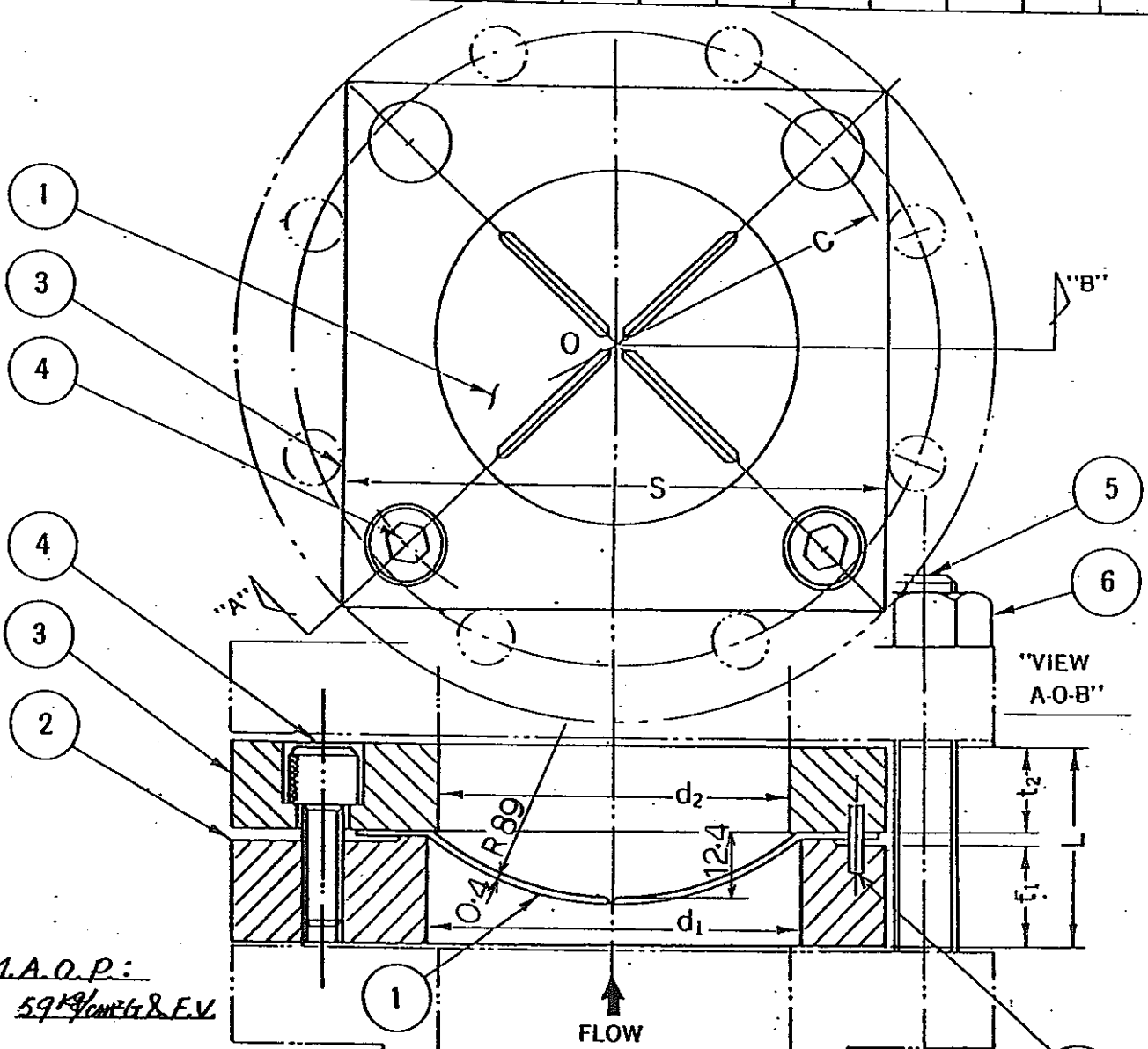
WT: 10 kg/set

PART NO	PART NAME	MATERIAL	Q'TY	DESCRIPTION
10	COMPANION FLANGE			PREPARED BY CUSTOMER
9	GASKET			PREPARED BY CUSTOMER
8	KNIFE BLADE	SUS 631	1	
7	LUG	SUS 304	3	
6	CAP SCREW	SUS 304	6	M6
5	NUT	SUS 304	16	M20
4	STUD	SUS 304	8	M20 x 160
3	HOLD DOWN	SUS 304	1	
2	BASE	SUS 304	1	
1	RUPTURE DISK (STIFF RIM) SIZE: 3" (DISK) TYPE: RB -90 (LINING)	INCONEL 600	1	RUPTURE PRESSURE: <u>7.0 kg/cm<sup>2</sup></u> TEMP. AT: <u>22°C</u> MFG. RANGE: <u>6.65 ~ 7.0 kg/cm<sup>2</sup></u> TOLERANCE: ± <u>5%</u> SPARE DISKS: <u>58</u> PC(S) FOR <u>2</u> SET(S)

Fig. 3.4 Reverse Buckling Rupture Disc with Blades (3B)



TAG NO.	RATING	DIMENSION (mm)							
		S	C	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	L	
	80A JIS 20KG/CM <sup>2</sup> (3")	125	139	89	84.9	26.4	26.4	55	



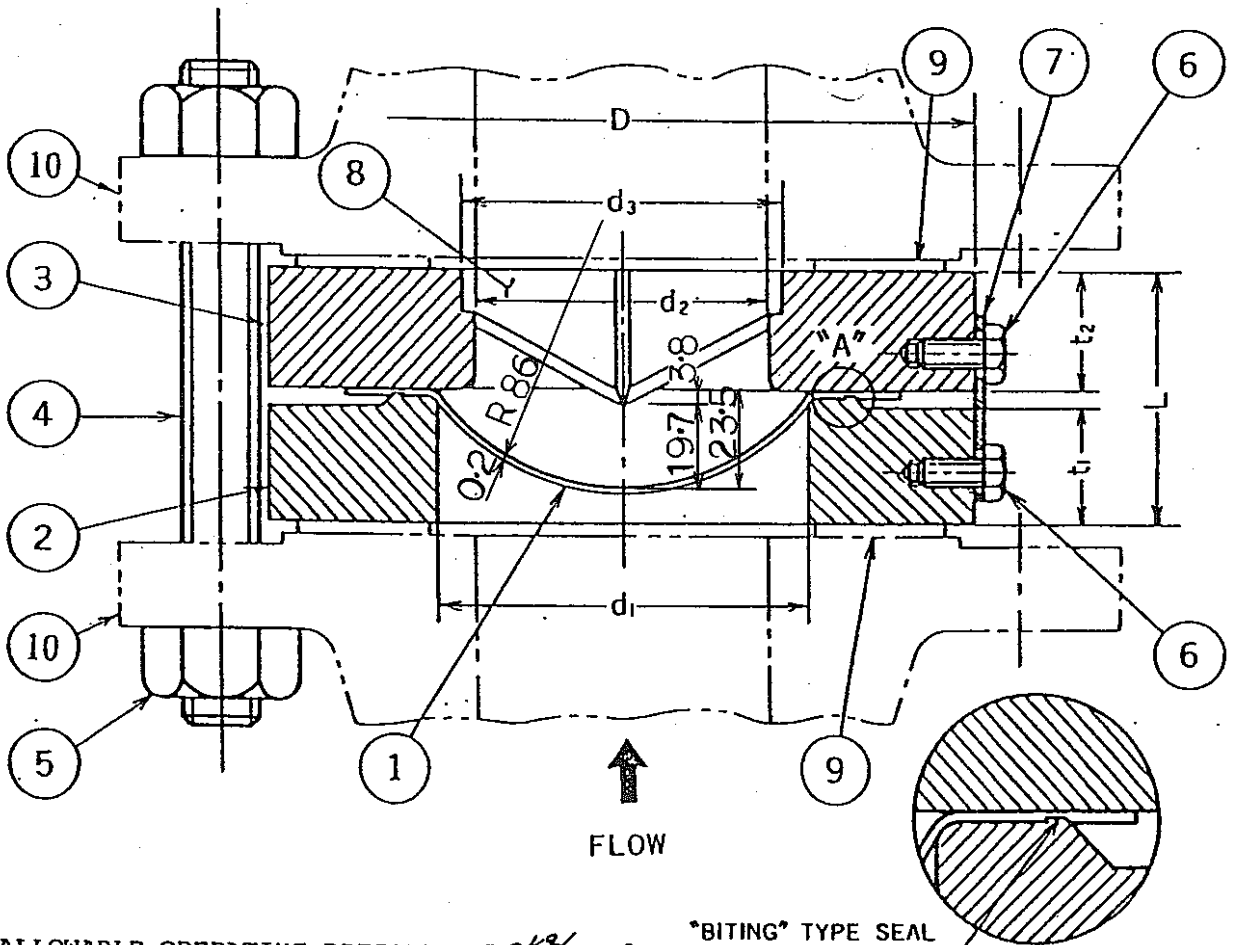
M.A.O.P:  
59 kg/cm<sup>2</sup> G & F.V.

BOLTING TORQUE ON EACH CAP SCREW (PART NO.4) 899 kg-cm  
 BOLTING TORQUE ON EACH NUT (PART NO.6) 1244 kg-cm WT: 8 kg/set

PART NO.	PART NAME	MATERIAL	Q'TY	DESCRIPTION
7	PIN	SUS304	3	
6	NUT	SUS304	16	M20
5	STUD	SUS 304	8	M20 x 165
4	CAP SCREW	SCM3 OR EQUAL	4	M10 JIS B1176 ... 12.9
3	HOLD DOWN	SUS 304	1	
2	BASE	SUS 304	1	
1	RUPTURE DISK SIZE: 3" (DISK) TYPE: S-90	INCONEL 600	1	RUPTURE PRESSURE: 7.0 kg/cm <sup>2</sup> G & F.V. TEMP. AT: 22°C MFG. RANGE: 665-7.0 kg/cm <sup>2</sup> G & F.V. TOLERANCE: ± 5% SPARE DISKS: 8 PC(S) FOR 2 SET(S)

Fig. 3.5 Scored Reverse Buckling Rupture Disc (3B)

TAG NO.	RATING	DIMENSION (mm)								
		D	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	L (APPROX)		
	100A JIS 20KG/CM <sup>2</sup> (4")	160.0	114.3	101.5	105.5	28.4	28.0	58.0		



MAX. ALLOWABLE OPERATING PRESSURE  $5.9 \text{ kg/cm}^2 \text{ G.E.V.}$

"BITING" TYPE SEAL

BOLTING TORQUE ON EACH NUT (PART NO. 5)  $1659 \text{ kg-cm}$

DETAIL "A"

$R/O$  O.D. Trimming: 158.8 mm

WT.: 13 kg/set

PART NO	PART NAME	MATERIAL	QTY	DESCRIPTION
10	COMPANION FLANGE			PREPARED BY CUSTOMER
9	GASKET			PREPARED BY CUSTOMER
8	KNIFE BLADE	SUS 631	1	
7	LUG	SUS 304	3	
6	CAP SCREW	SUS 304	6	M6
5	NUT	SUS 304	16	M20
4	STUD	SUS 304	8	M20 x 170
3	HOLD DOWN	SUS 304	1	
2	BASE	SUS 304	1	
1	RUPTURE DISK (STIFF. RIM) SIZE: 4" TYPE: RB -90 (DISK) (LINING)	INCONEL 600	1	RUPTURE PRESSURE: $70 \text{ kg/cm}^2$ TEMP. AT: $22^\circ\text{C}$ MFG. RANGE: $665-70 \text{ kg/cm}^2$ TOLERANCE: $\pm 5\%$ SPARE DISKS: 9 PC(S) FOR 1 SET(S)

Fig. 3.6 Reverse Buckling Rupture Disc with Blades (4B)



Photo 3.1 Appearance of Test Equipment

## 4. 試験および計測方法

試験は試験装置内に所定量の水を注入し、低爆速火薬（以下「火薬」）をワイヤー製の火薬固定台を用いてSGの所定位置にセットして実施した。計測時の現象開始の起点は火薬表面に取り付けた銅線が破断する時刻とし、全ての計測はこの起点にて同期させた。また高速撮影する場合には高速カメラのフィルム回転速度が一定になった時点でトリガー信号を発破器へ送信し、同期させた。

圧力センサー、歪ゲージおよび加速度計取付位置をFig. 6. 1に示す。尚、歪ゲージは圧力センサー $P_1$ （SG下部、圧力源）と同レベルにて周、軸方向に1枚ずつ取付けた。またラプチャーディスクの破裂時刻と破裂後の放出流速を計測するため、ラプチャーディスク直後とそれより1.2m（あるいは1.6m）離れた地点にフォイルを取付けた。（別冊データ集、ラプチャーディスク・破裂時刻一覧表を参照）

各試験の計測ブロックダイアグラムをFig. 4. 1および4. 2に示す。圧力センサー、歪ゲージ、加速度計、高速カメラおよびデータ処理の仕様をTable 4. 1に示す。各々の信号は全てデータ・レコーダに収録し、A/D変換処理を経て作図した。データのサンプリングは圧力、歪に対して $25 \mu \text{sec}$ にて、また加速度に対して $250 \mu \text{sec}$ にて実施した。

Table 4.1 Specification of Measuring System

Pressure History	<p>Pressure Transducer          Model ; PGM-100 KD          (KYOWA Electronic Instruments)          Range ; 100 kg/cm<sup>2</sup>·g          (Allowable Over Load ; 150%)          Natural Frequency ; 80 KHz</p>
Strain History	<p>Foil Strain Gage          Type ; KFC-2-C1          (KYOWA Electric Instruments)          Range ; 2.8% strain          Gage Length ; 2 mm</p>
Acceleration History	<p>Acceleration Transducer          Type ; ASW 10 A          (KYOWA Electric Instruments)          Frequency ; 0~150 Hz ± 5 %          Natural Frequency ; about 320 Hz          Range ; ± 10 G</p>
High-Speed Photographing	<p>High-Speed Camera          Model ; PHOTEC IV 16 mm          Fixed Photographing Speed ; 700, 500 FPS          Film Analyzer ; SANPICO Analyzer 401</p>
Data Recorder	<p>( i ) Model : SR 71 (TEAC)          No. of channel : 21          Frequency : 40 KHz          ( ii ) Model : R 570 (TEAC)          No. of channel : 14          Frequency : 20 KHz</p>
Software System	<p>Model : HP-9300 (TEAC)</p>

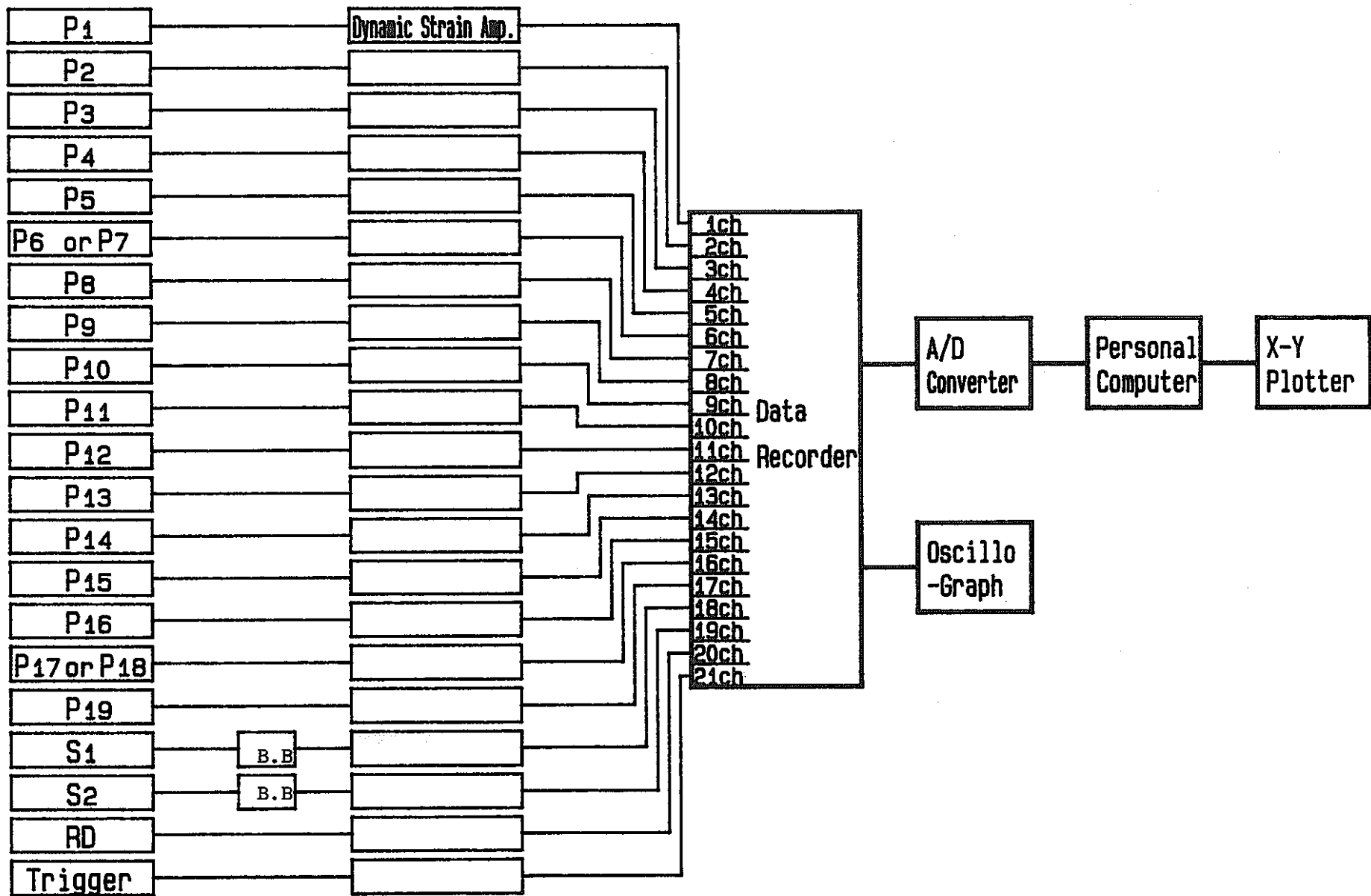


Fig. 4.1 Block Diagram of Pressure & Strain History Measuring System

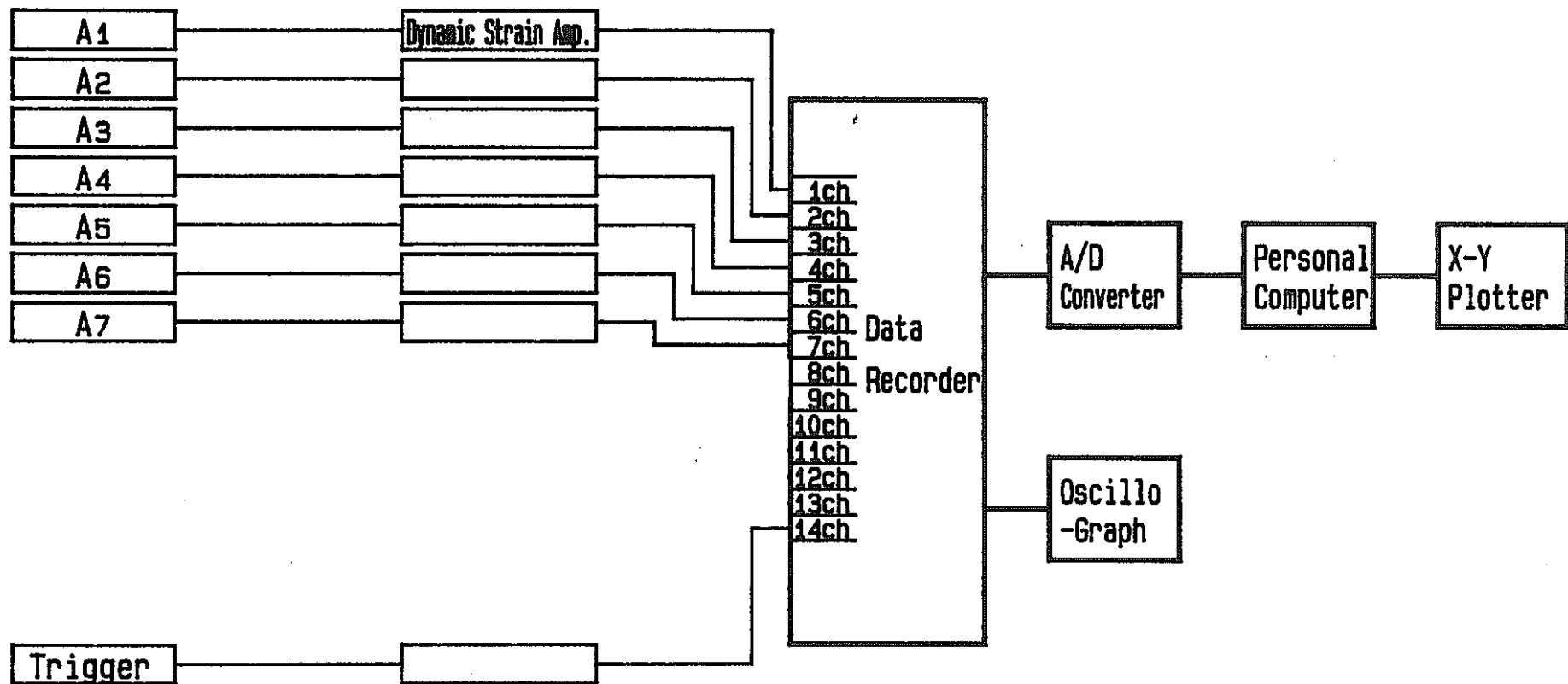


Fig. 4.2 Block Diagram of Acceleration History Measuring System

## 5. 火薬特性試験

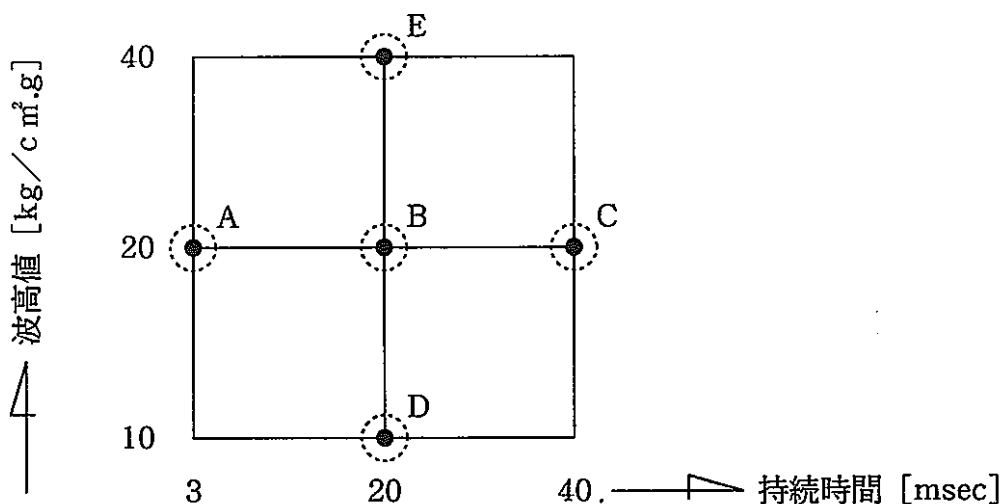
### 5.1 低爆速火薬

圧力源として使用する火薬は、薬種、粒度、薬量および火薬殻強さなどの調整によって、ナトリウム-水反応時のスパイク圧を模擬し得る。今回使用した標準的な火薬の主成分は黒色火薬で、火薬殻は塩化ビニール製とした。

圧力源の波形は、周囲の構造物からの反射波が含まれるため、実際に試験装置内で発破し確認した。

### 5.2 目標とする圧力源の波形

目標とする圧力源の波高値と持続時間は実証炉の無液面型SGにおける伝熱管1本の両端破断事故(1 DEG)相当の水リーク率を用いた解析結果\*を基に、波高値は  $20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  に、持続時間は100msecをIso-velocityスケール則によりスケール1/5を乗じて20msecとし、これを標準ケースとして設定し、前後にパラメトリックに振り分け下図に示すように5種類とした。



※図中に示すA~EはTest No.上の識別を表わす。

\*PNC SN941 87-037, 無液面型および有液面型SGの大リーク・ナトリウム-水反応事象評価 1987. 4 田辺他



### 5.3 試験条件

火薬特性試験ではSG内部を無液面とし、実機ではSG下部でのリーク率が高く厳しい事故が想定されるため、火薬はSG下部にセットして圧力源位置 ( $P_1$ ) の圧力履歴を計測した。試験はラブチャーディスク破裂時の影響が圧力源の波形に影響を与えることを避けるため、ラブチャーディスクを取付けずに実施することとした。発破後の火薬燃焼ガスは系統内に設置された膨張タンクのカバーガス (大気開放) にて吸収される。

### 5.4 試験結果

最終的に得られた各目標値に対する圧力源の波形をFig.5.1~5.7に示す。Fig. 5. 1およびFig. 5. 2は $20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g} \times 20 \text{ msec}$ の再現性を、またFig. 5. 3およびFig. 5. 4は、 $10 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g} \times 10 \text{ msec}$ の再現性を示す。

ラブチャーディスクを使用しない場合の系統内の圧力波伝播挙動を見るため、20msの $10 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ および $20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ について、系統の全点について圧力履歴を計測した。これらを別添のデータ集のTest No. ND28, ND29およびNB30に示す。これらの結果は6. 7. 3項に述べる。

### 5.5 試験結果の検討

標準ケースの $20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g} \times 20 \text{ msec}$ の場合、初期波の波高値 $20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ と有意な減衰勾配を持つ部分とを直線的に結び三角波形状とし、持続時間 $20 \text{ msec}$ であるとした。 $20 \text{ msec}$ 以降の圧力波は低い波高値が指数関数的に減衰しながら継続する形状となる。

$10 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g} \times 20 \text{ msec}$ の場合、初期波の波高値は約 $11 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ で標準ケース同様の三角波の定義づけによって持続時間は約 $20 \text{ msec}$ の圧力波が得られる。

$40 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g} \times 20 \text{ msec}$ の場合も標準ケースと同様の定義により所定の圧力波が得られた。

$20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g} \times 3 \text{ msec}$ の場合、Fig 5. 6に示すように初期波は $3 \text{ msec}$ で元の圧力に戻るため初期波のみで三角波形状を成す。

$20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g} \times 40 \text{ msec}$ の場合、標準ケースに比べて持続時間は長いが三

角波の定義づけが難しく、初期波より第三波までのピーク値を直線で結び持続時間を求めた。

以上から、目標とする5つの領域の圧力波形状が火薬特性試験により求められた。

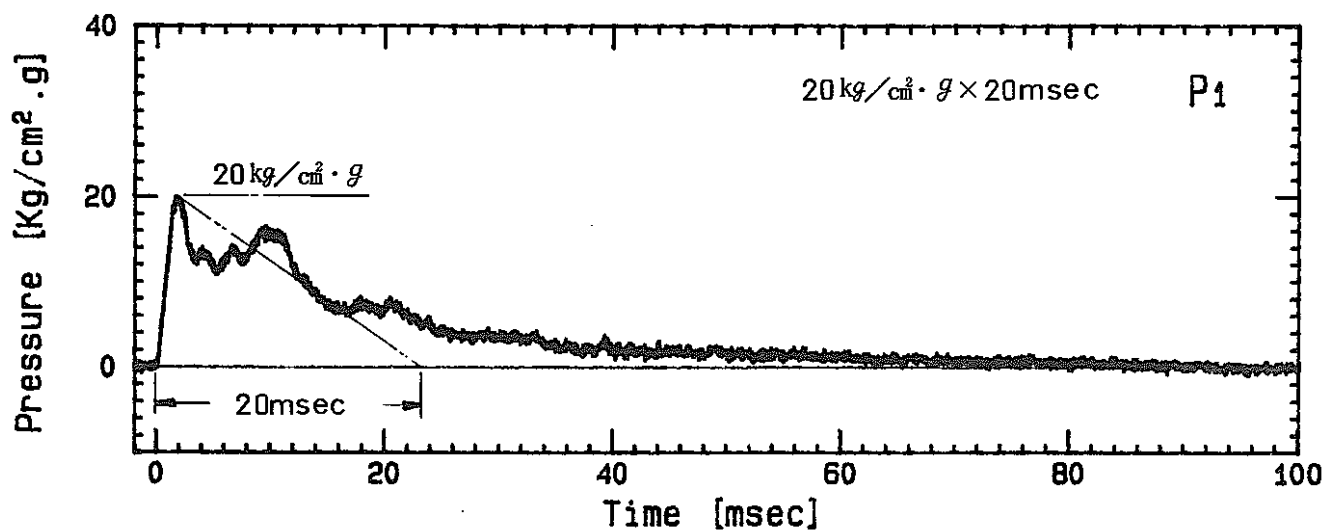


Fig. 5.1 Pressure History [Test No.A003]



再現性の確認

Detailed description: The text '再現性の確認' (Confirmation of reproducibility) is enclosed in a cloud-shaped border.

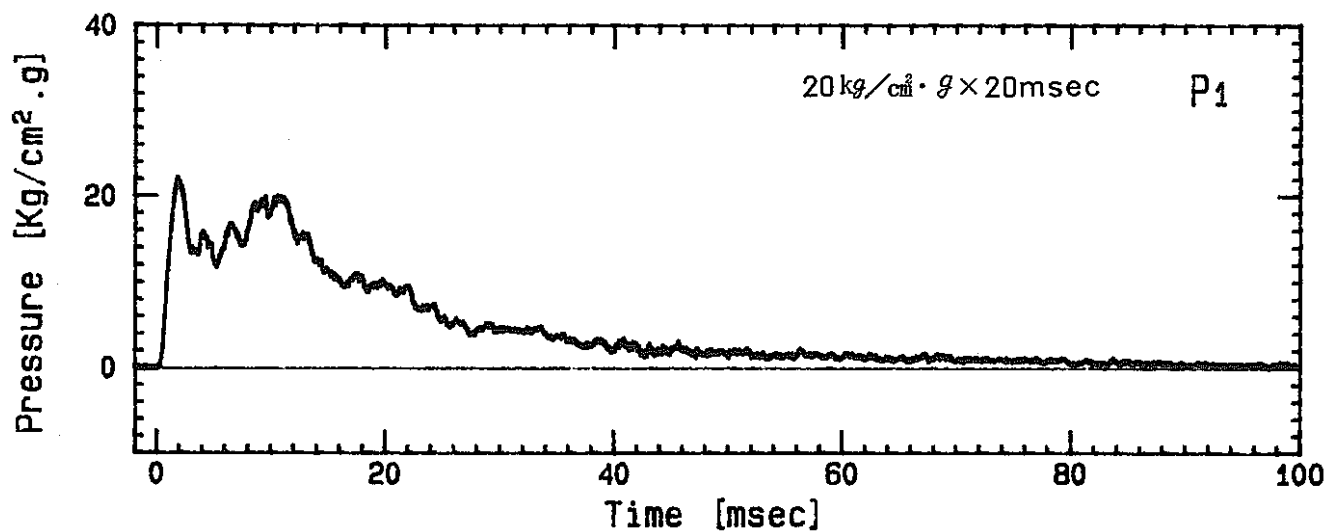


Fig. 5.2 Pressure History [Test No.A046]

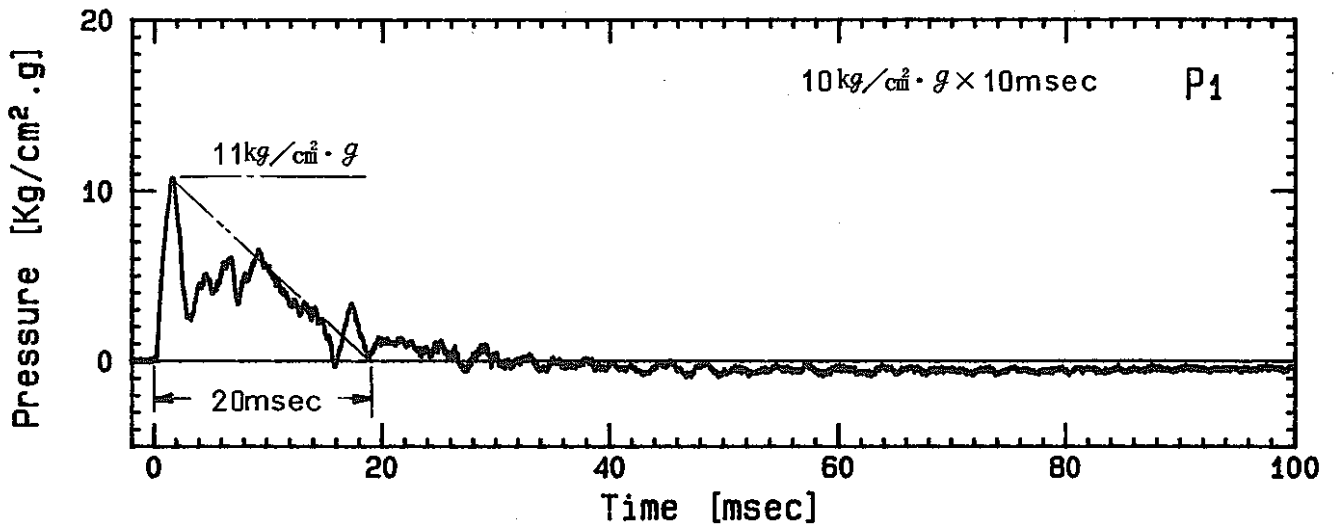


Fig. 5.3 Pressure History [Test No. A044]

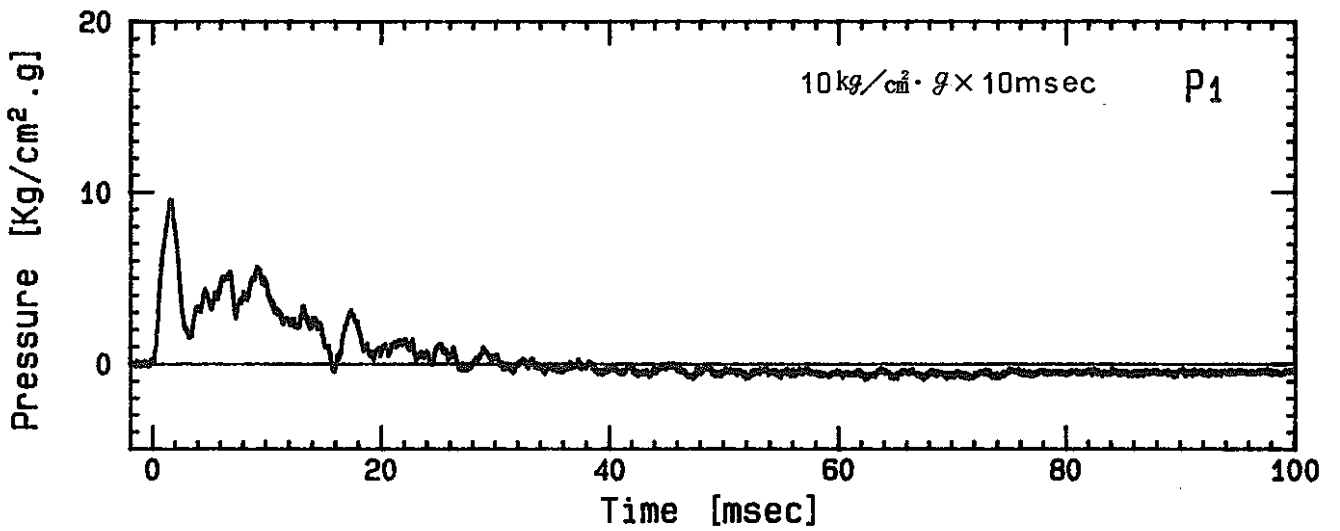
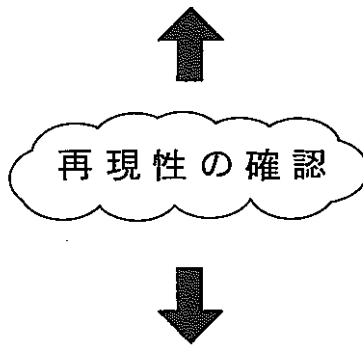


Fig. 5.4 Pressure History [Test No. A045]

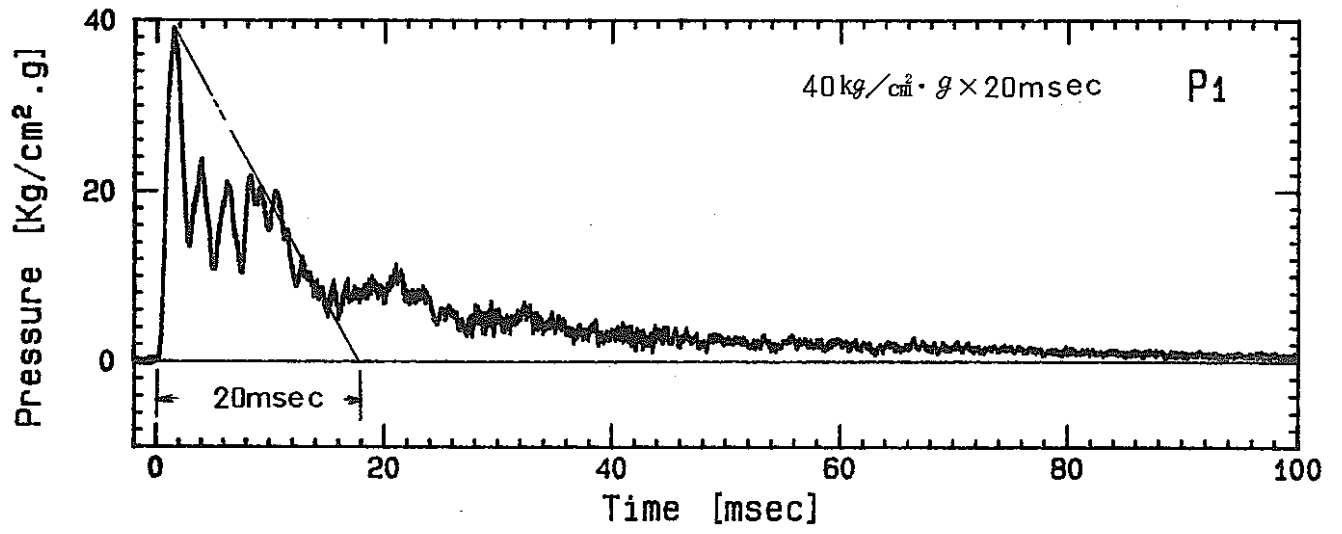


Fig. 5.5

Pressure History

[Test No.A037]

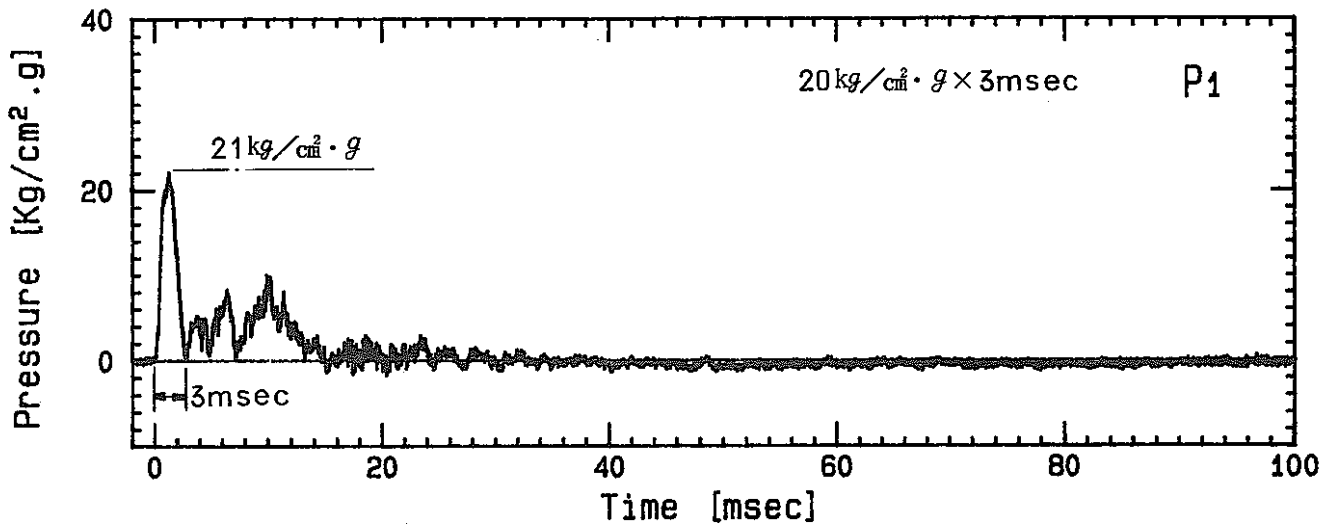


Fig. 5.6 Pressure History [Test No.A033]

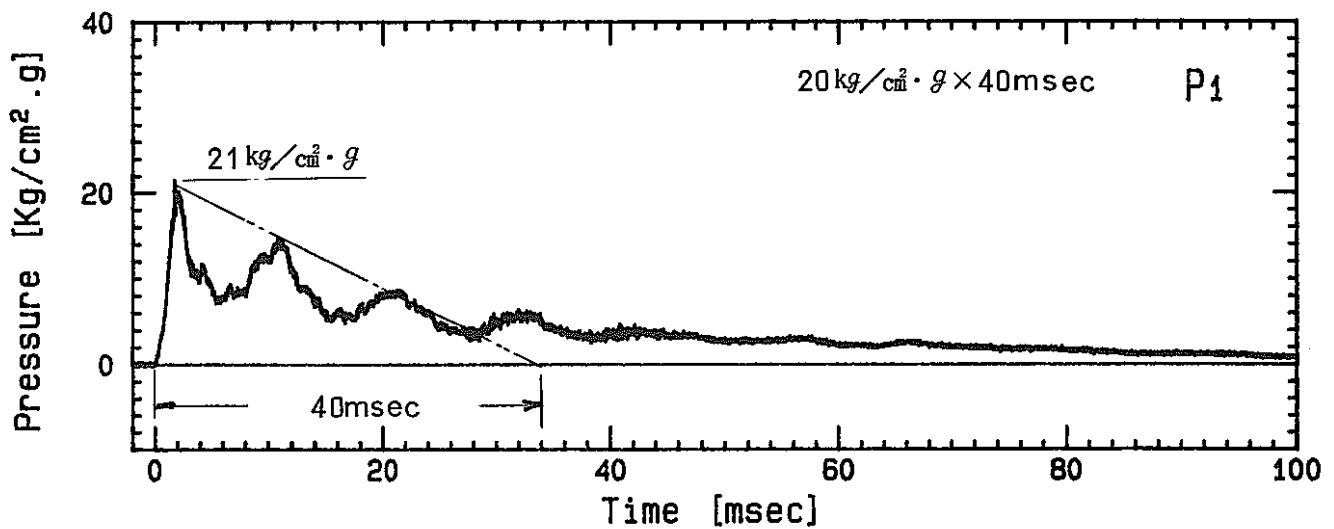


Fig. 5.7 Pressure History [Test No.A035]

## 6. ナトリウム－水反応模擬水中試験

本試験は、ナトリウム－水反応の圧力波伝播挙動を把握する試験と、それに先立って行う試験方法の妥当性を確認する試験（真空引効果試験，カバーガス圧効果試験）から成っている。

圧力，歪および加速度の計測点位置をFig. 6. 1に、また試験結果の一覧をTable 6. 1に示す。

尚、本試験の結果は、Test No.ごとに圧力，ラプチャーディスク破裂時刻，歪および加速度の各履歴を整理し、別冊のデータ集にまとめた。また、代表的なラプチャーディスクの破裂後の状況（写真）をデータ集に載せた。

### 6. 1 真空引効果試験

系統内が大気圧でオーバフロー方式によるガス抜きを行う通常手順で、系統内のガスが抜けているかどうかを確認する目的で実施した。系統内を真空にして、真空脱気器より脱気水を注入してガス抜きを行った場合（Test No. PB01）と通常手順でガス抜きを行った場合（Test No. PB02）について同一条件で試験を実施し、音速が同じであることにより通常手順でガスが抜けていることを確認した。

#### (1) 理論音速

配管内の水中、理論音速  $C_e$  は次式で表わされる。

$$C_e = \sqrt{\frac{g \cdot K / \gamma}{1 + (K/E) D/t}}$$

ここで、

K : 水の体積弾性率	..... $2.07 \times 10^8$	[kg / m <sup>2</sup> ]
E : 配管の縦弾性率	..... $2.1 \times 10^{10}$	[kg / m <sup>2</sup> ]
$\gamma$ : 水の比重量	..... $1 \times 10^3$	[kg / m <sup>3</sup> ]
g : 重量加速度	..... 9.8	[m / s]

Table 6.1 List of Test Results

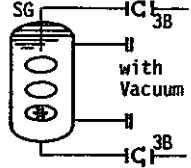
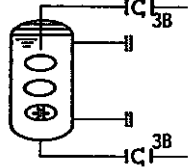
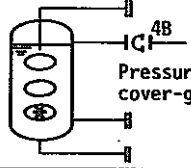
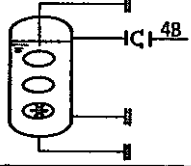
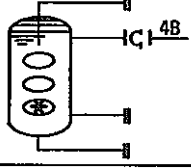
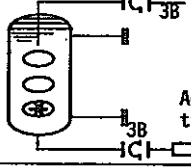
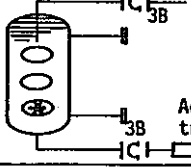
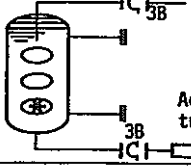
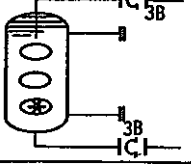
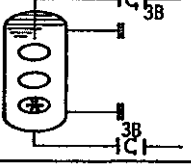
Test No.	Illustration of Test Conditions	Pressure History			
		SG (source)		THX (P <sub>10</sub> )	
		peak [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	time [msec]	peak [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	time [msec]
PB01		24	20	13	25
PB02		23	20	14	25
PB03		23	10	—	—
CB04		24	10	—	—
NB05		19	20	8	30
ND06		15	20	7	30
PE07		32	20	26	20
NE07		30	20	18	25
NA08		23	3	3	30
NC09		19	40	12	30



Table 6.1 List of Test Results (continued)

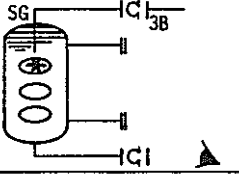
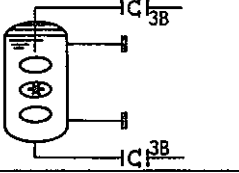
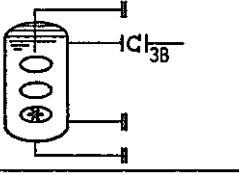
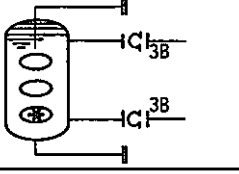
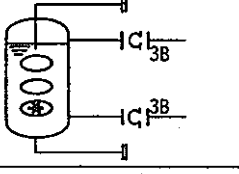
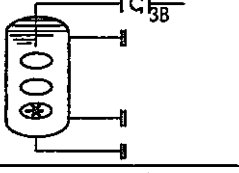
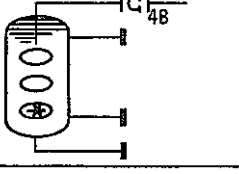
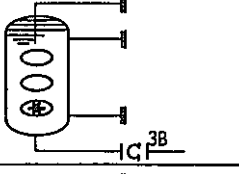
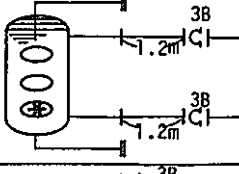
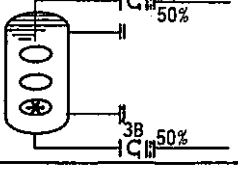
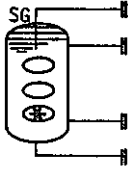
Test No.	Illustration of Test Conditions	Pressure History			
		SG (source)		HX (P <sub>10</sub> )	
		peak [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	time [msec]	peak [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	time [msec]
NB 10		26	20	3	80
NB 11		19	20	8	25
NB 12		21	20	25	25
NB 13		23	20	12	30
CB 14		25	10	—	—
NB 15		26	20	11	25
NB 16		28	20	9	25
NB 17		22	20	25	25
NB 18		23	20	24	20
NB 19		24	20	9	30

Table 6.1 List of Test Results (continued)

Test No.	Illustration of Test Conditions	Pressure History			
		SG (source)		THX (P <sub>10</sub> )	
		peak [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	time [msec]	peak [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	time [msec]
NB20		21	20	13	25
NB21		24	20	10	25
ND22		8	20	1	50
NB23		21	20	7	35
CB24		21	20	2	20
CB25		23	20	1	15
NB26		14	20	8	30
NB27		23	20	20	25
ND28		11	20	3	40
ND29		10	20	2	50

Table 6.1 List of Test Results (continued)

Test No.	Illustration of Test Conditions	Pressure History			
		SG (source)		THX (P <sub>10</sub> )	
		peak [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	time [msec]	peak [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	time [msec]
NB 30		20	20	30	25

- Notes 1) Type of reverse buckling with blades is used as a rupture disc if there is no commented.  
 2) Mark (➤) shows an observation by high speed camera.

P; Pressure  
 A; Acceleration  
 S; Strain

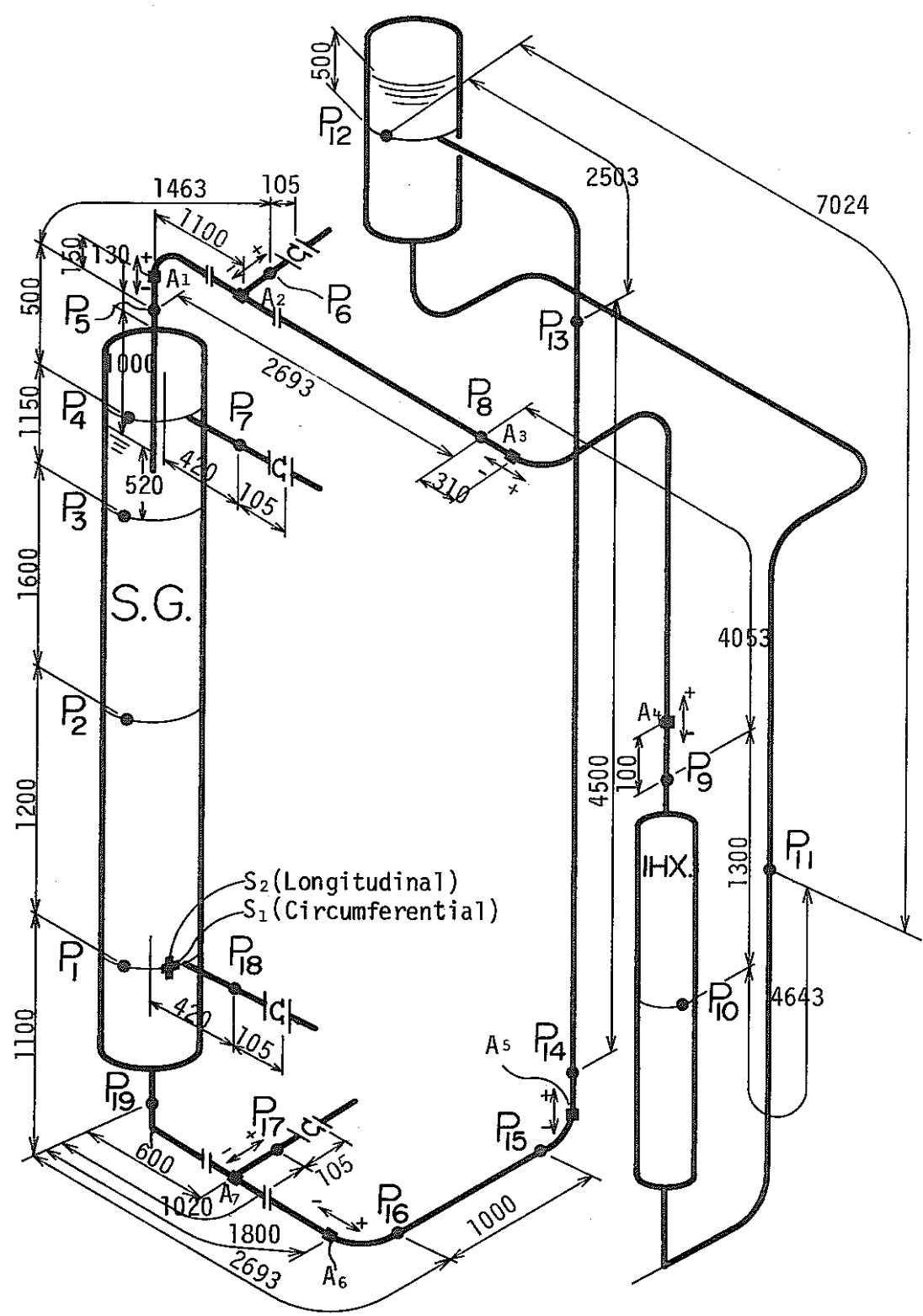


Fig. 6.1 Transducer Location

すなわち、

$$C_e = \frac{1424}{\sqrt{1+0.099(D/t)}} \quad \left( \begin{array}{l} D: \text{配管内径} \\ t: \text{配管肉厚} \end{array} \right)$$

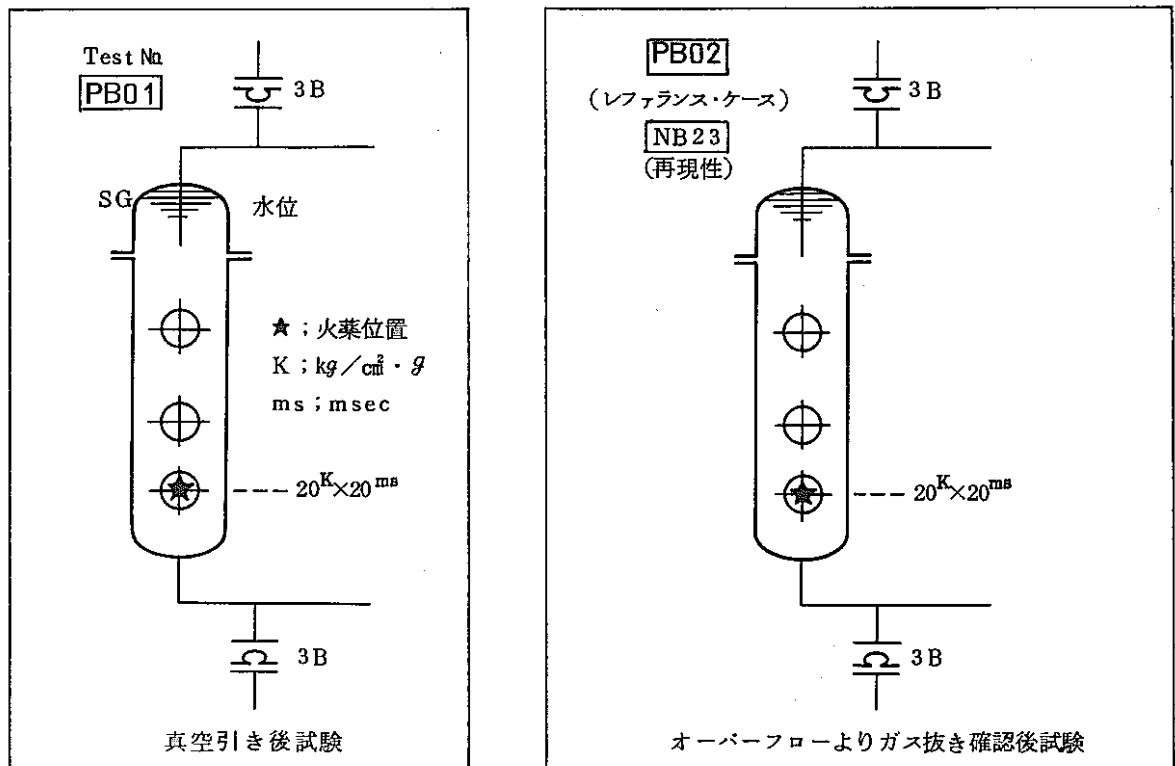
従って理論音速は各部で以下の通りとなる

場 所	D/t	C <sub>e</sub> [m/s]
S G 内	700/16	1190
主 配 管 内	151/7.1	1290

系統内に気泡が0.1%（体積比）存在するだけで音速は上記の値の約半分に減衰する\*。  
従って、音速を測定すれば気泡の存在が予測できる。

## (2) 試験条件

Test No. PB01およびPB02の試験条件をFig. 6. 2に示す。



(注) ラプチャーディスク型式の記載なき場合は反転ナイフ型である。

Fig. 6. 2 真空引効果試験

\* "FLUID TRANSIENTS" 1983, E. Benjamin Wyliy etc.

### (3) 試験結果と検討

圧力源 ( $P_1$ ) は両者とも約  $24 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g} \times 20 \text{ msec}$  で各点の圧力履歴はデータ集の Fig. 1 および 8 に見る通り酷似し、他の各点についても圧力波伝播挙動上、差はない。因に、SG 内部 ( $P_1$  と  $P_3$ )、鉛直配管部 ( $P_{13}$  と  $P_{14}$ ) および水平配管部 ( $P_{15}$  と  $P_{16}$ ) において圧力履歴を拡大し、比較したものを Fig. 6. 3 (データ集 Fig. 6. 13) に示す。圧力の立ち上がり地点を判定するに当たって、読み取り誤差があるが同じ読み方を定めて Test No. PB01 と PB02 を比較した結果を Fig. 6. 3 の図中に示す。即ち、SG 内の音速は両者とも約  $1240 \text{ m/s}$  で一致し、この値は理論値に見合っている。配管内でも真空引きをしていない Test No. PB02 において、音速が垂直配管部で  $1297 \text{ m/s}$ 、水平配管部で  $1282 \text{ m/s}$  となり、これらも理論値に見合う。

以上から通常手順のガス抜きを行えば圧力波伝播挙動を調べる上で問題のない事が確認された。従って Test No. PB02 以降の試験は通常のガス抜き操作後に行い、真空引きは行わないで実施することにした。

また Test No. PB02 は他の試験と比較する上で基本となるもので、以降レファランス・ケースと呼ぶことにした。

Test No. PB01 と PB02 の両者とも  $P_2 \sim P_4$  において  $40 \text{ msec}$  附近で、極めて高周波の波が観測される。これらは、下部ラプチャーディスクの破裂地点 ( $P_{17}$ ) から伝播して来た波が SG 内部で増幅されたと判断される。

ラプチャーディスクの破裂状況は Photo 6. 1 に示すように下部位置については、完全開口であるが、上部位置については部分開口であり、Test No. PB01 と PB02 ではバラツキがでている。

圧力源における歪履歴 (データ集 Fig. 7 および 14) から SG は発破時に周方向、軸方向とも伸びており約  $20 \text{ msec}$  間に周方向は  $200 \mu \text{ strain}$ 、軸方向は約  $100 \mu \text{ strain}$  であり、弾性範囲内の挙動を示す。歪履歴に関しても Test No. PB01 と PB02 は酷似し、再現性の良い試験であった。

尚、Test No. NB23 はレファランス・ケース (Test No. PB02) の再現性試験である。これらの図に示すように、圧力源が同程度の波高値を持つ波であれば、伝播特性の再現性は極めて良い。

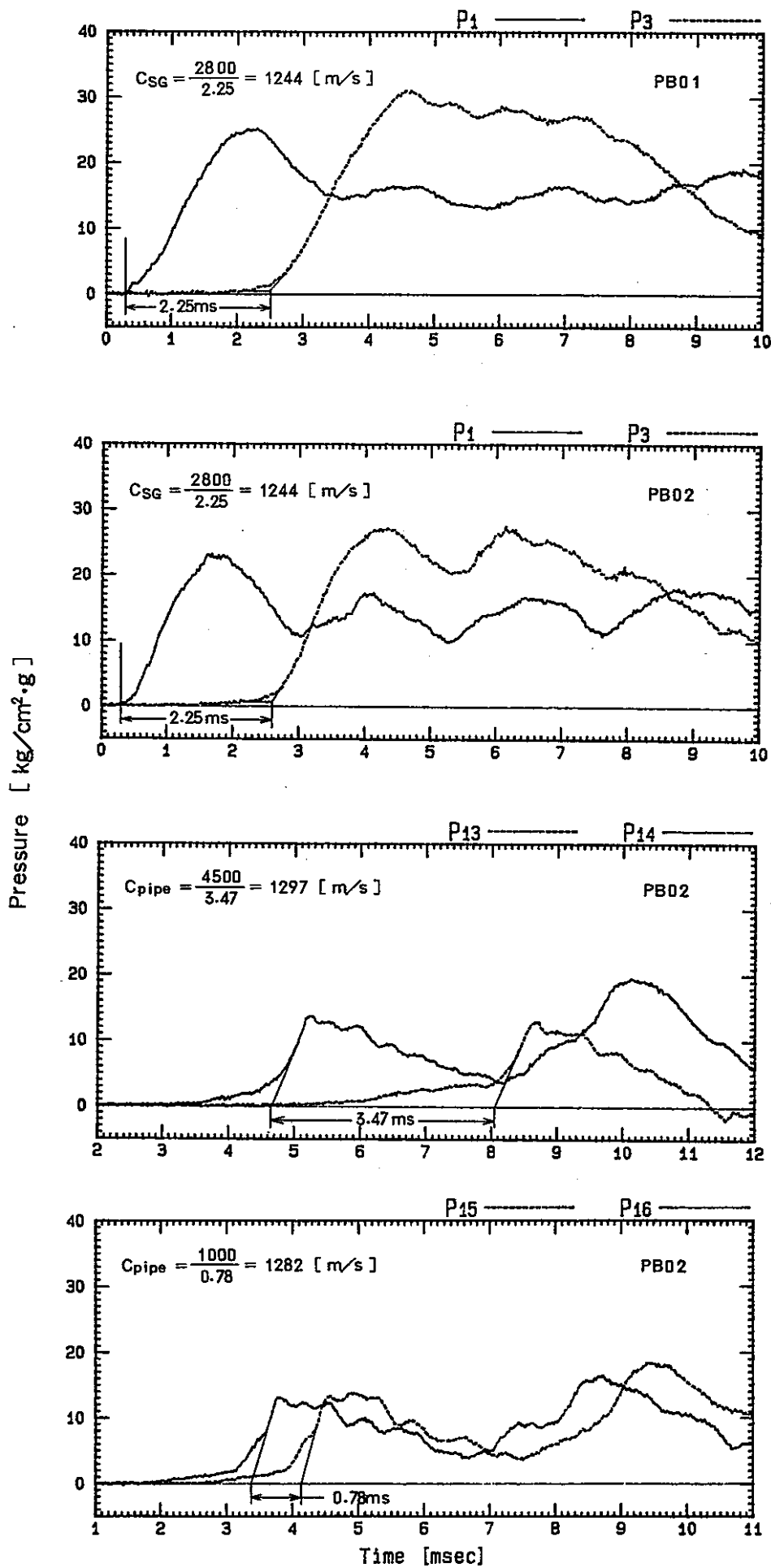


Fig. 6.3 Pressure History

## 6. 2 カバーガス圧効果試験

FBRの2次冷却系にはカバーガス圧が負荷されるため、カバーガス圧の圧力波形への影響度を調べる試験を実施した。

カバーガス圧  $1.8 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  の場合 (Test No. PB03) と大気圧の場合 (CB04) の試験を同一薬量の火薬を用いて実施した結果、圧力波形はカバーガス圧に左右されないことが確認された。以降の試験では、カバーガス圧は大気圧で実施することにした。

### (1) 試験条件

Test No. PB03 および CB04 試験条件を Fig. 6. 4 に示す。

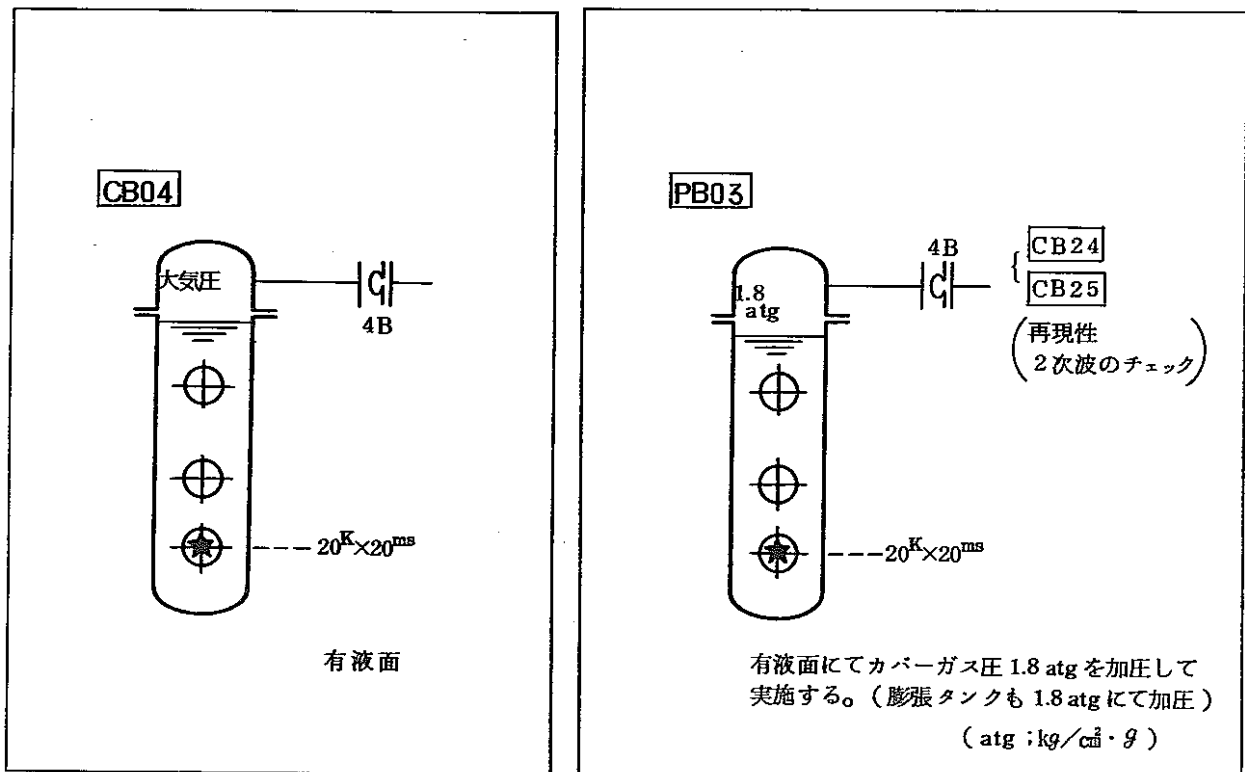


Fig. 6. 4 カバーガス圧効果試験

本試験では  $\text{N}_2$  ガスにて SG 及び膨張タンク内のカバーガスを  $1.8 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  に加圧して実施した。



## (2) 試験結果の検討

有液面の場合には、ガス中ラプチャーディスクはカバーガス圧が大気圧でも、 $1.8 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  加圧でも破裂しなかった。これは、スパイク圧だけでは液面が上昇してカバーガス圧がラプチャーディスクを破裂させるほどには至らないと判断される。

Test No. PB03とCB04の圧力履歴を比較してわかるように、両者とも再現性が良く、圧力波形はカバーガス圧に影響されないことが確認された。

有液面の場合に特徴的な事は圧力源の波形が液面からの反射によって、大きく削除され持続時間が短縮されることその他、火薬上部の流体（スラグ）が燃焼ガスによって上昇し、ある時間を経て下降するが、下降時に第二の圧力波（二次波）を発生させることである。スラグは上部カバーガスと下部の火薬の燃焼ガスにはさまれ、軸方向に振動する（スラグ・バウンスィング）現象が出現する。（Fig. 6.5参照）

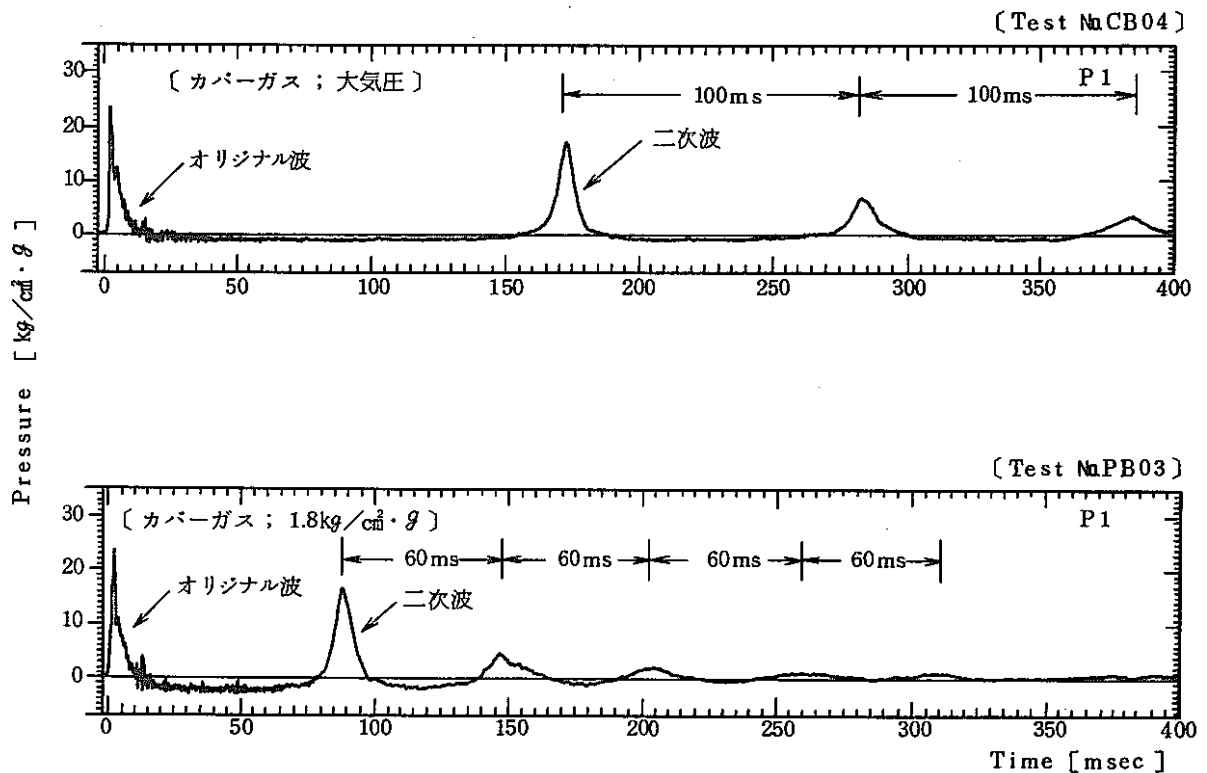


Fig. 6.5 スラグ・バウンスィング

Test No. CB04の $P_1$ 圧力履歴に示すようにカバーガス圧が大気圧の場合、二次波は圧力源において発破後、約160msecで発生しその波高値、持続時間は初期の圧力波と同程度の値となっている。カバーガスを加圧した場合はTest No. PB04の $P_1$ 圧力履歴に示すように二次波はカバーガス圧が大気圧の時に比べ、2倍ほど早く発生し、その周期が小さくなることがわかった。カバーガスを $1.8 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ に加圧した場合のバウンスィング周期は約60msec、カバーガス圧が大気圧の場合は約100msecであった。ただし、このスラグのバウンスィングによる二次波はパルス的なエネルギーの注入が成された場合に起こる現象で、実機のナトリウム-水反応ではスパイク圧の後に伝熱管からの蒸気の噴出という形でエネルギーの注入が継続するので、スラグ下降時のインパクトは小さいと予想される。

また、たとえスラグのバウンスィング現象が起きても実機ではSG内に管束群があって、それらがインパクトを緩和する方向に影響すると思われるが、二次波のエネルギーはかなり大きいためこの現象が実験特有なものかどうかを今後、確認する必要がある。

Test No. CB24とCB25はカバーガスを $1.8 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ に加圧した場合の再現性試験である。スラグのバウンスィングによる二次波の発生時刻にバラツキがある点を除き各点の圧力波の再現性は良い。

Test No. CB25において二次波の発生する75msec時点では歪および加速度も対応して変化していることがわかる。データ集Fig. 206に示す $A_1$ の加速度履歴からは75msec時点で、負の加速度が検出されスラグが軸方向下方へ下降していることを示している。

## 6.3 液面影響評価試験

### (1) 試験条件

Test No. CB04とNB05の試験条件をFig. 6.6に示す。

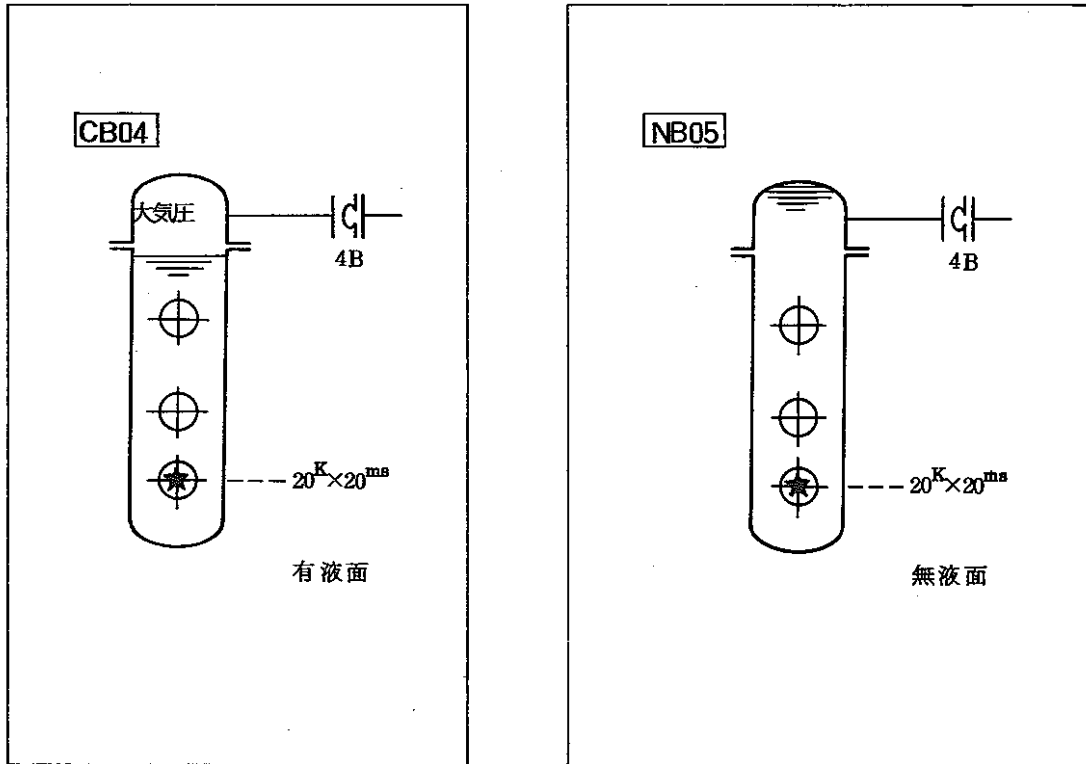


Fig. 6.6 液面影響評価試験

### (2) 試験結果の検討

有液面 (Test No. CB04) と無液面 (Test No. NB05) の圧力履歴を比較すると、有液面では  $P_1 \sim P_2 \sim P_3$  の順で液面に近づくほど圧力波が削除され (液面からの負の反射)、無液面では同様の順で圧力波が増幅 (SG 上部のデッド・エンドによる正の反射) される。有液面の場合、液面近傍の軽微な圧力波しか (波高値、持続時間ともに小さい波が繰り返された状態) SG 上部、配管に伝播しないためホットレグ配管および IHX 内は、有意な圧力上昇が見られない。(データ集 Fig. 24, 25 の  $P_6 \sim P_{12}$  参照)

有液面の場合、SG 下方 (コールド・レグ配管) へ伝播する波は無液面の場合と変わらない伝播挙動を示す。

圧力源近傍のSG胴部の歪履歴は、有液面の場合も無液面の場合も、各々の圧力波の波高値と持続時間に対応している。(データ集 Fig. 28, 34 参照)

有液面の場合はガス中のラプチャーディスクは破裂せず、無液面の場合の液中ラプチャーディスクは完全開口の破裂であった。

加速度は前項で述べたスラグ・バウンスィングによる圧力二次波に呼応した加速度応答であることを除いて、液面による影響はなかった。また加速度は圧力源の発破とほぼ同時に応力波で伝播し、初期加速度の波は全点とも正方向への応答を示し、SGを起点として伝播方向と一致していることがわかる。

## 6. 4 圧力波影響評価試験

### 6. 4. 1 波高値の影響

#### (1) 試験条件

圧力源の持続時間 20 msec を固定して波高値を 10, 20 (レファランス・ケース) および 40  $\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$  の 3 段階に変えて試験を実施した。

このうち、10 および 40  $\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$  の試験ケースについては下部ラプチャーディスク破裂後の放出配管の流動状況を高速撮影することとした。(第 6. 8 章参照)

Test No. ND06 (ND22) と PE07 (NE07) の試験条件をレファランス・ケースと比較して Fig. 6. 7 に示す。

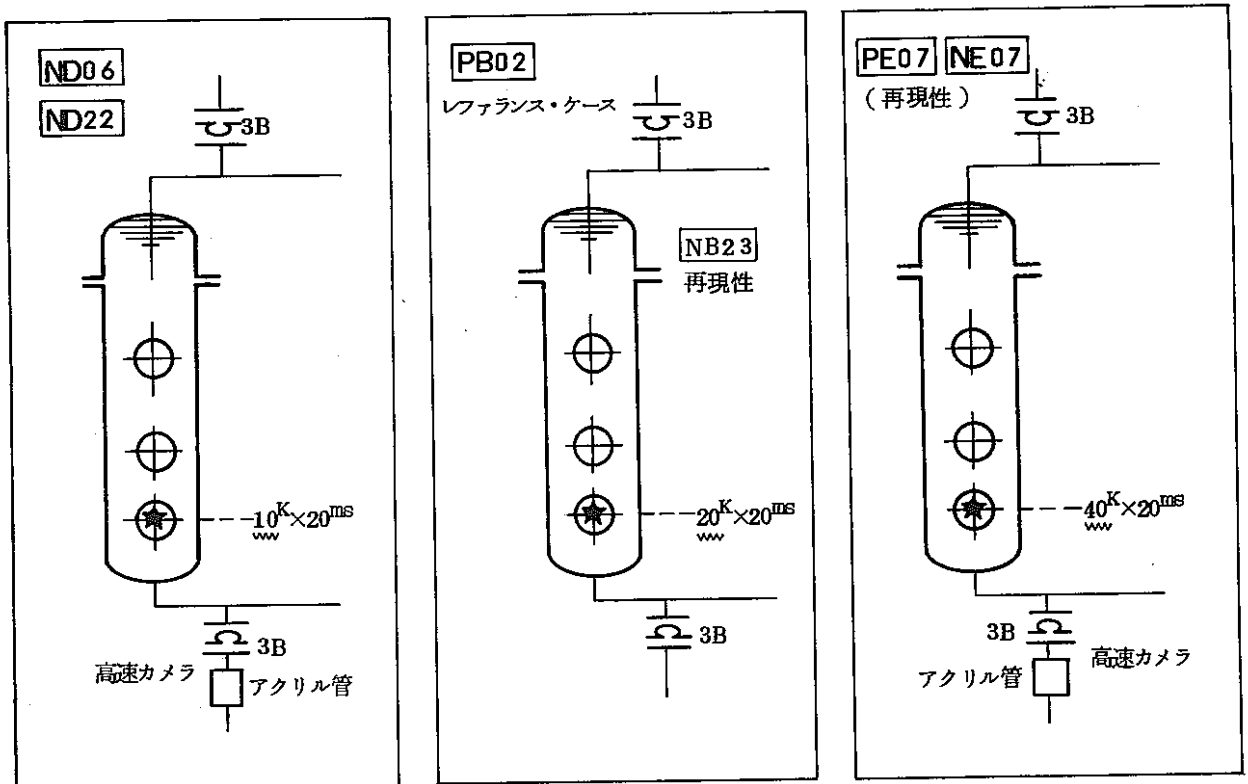


Fig. 6. 7 圧力波影響評価試験 [波高値効果]

#### (2) 試験結果

各ケースとも、各点の伝播圧力波の波高値は圧力源波高値に比例している。各点の最大値について、Table 6. 2 に比較表を示す。この表に示すように例えば、IHX 内部では圧力源の波高値が 2 倍になれば伝播圧力波の波高値も約 2 倍に上昇している。

SG 上部  $P_4$  位置の波形を見ると、圧力源に十分なインパルス量（圧力履歴の時間積分値）がある場合、SG 上下の鏡部による反射波が長く継続する特徴がある。

SG の全長が 5150mm、音速を 1200m/s とすれば、 $P_4$  で出現する反射波の周期は往復で 8.6msec となり、実測された 10msec とオーダ的に見合う。（データ集 Fig. 45 の  $P_4$  参照）

ラプチャーディスク破裂は下部については、どのケースでも完全開口で、上部のラプチャーディスクについては、どのケースでも同程度の部分開口であった。これは、上部より流出する流体質量が小さく、ラプチャーディスクを完全開口させるのに十分な流体エネルギーを持たないからと判断される。また下部のラプチャーディスクについては、圧力源がどの波高値であっても発破後約 5ms 遅 C（ラプチャーディスク後面の銅フォイルの破断時刻）で破裂するが、上部のラプチャーディスクは圧力源の波高値の影響を受け破裂時刻が遅れることがわかった。

今回の試験からは Table 6. 2 から分るように、上部ラプチャーディスクは圧力源の波高値が半減すると、波高値が高い場合に比べて破裂時間が約 30% 遅れることを示している。

歪履歴は圧力源の波高値に対応した値を示した。Table 6. 1 に示すように各ケースの最大周歪値は線形に上昇した。

加速度は圧力源の波高値が支配的な要因となって現われる。即ち、圧力源における圧力波の持続時間が一定である場合に、圧力波高値が高いほど加速度の値も大きく、かつ持続時間も長く現われる傾向がある。圧力波の持続時間が 20 msec で波高値が 8 kg/cm<sup>2</sup>・g の Test No. ND22（ND06 に対する追加試験）と 21 kg/cm<sup>2</sup>・g の Test No. NB23（レファランス・ケースの再現性試験）および 32 kg/cm<sup>2</sup>・g の Test No. PE07 の 3 ケースを比較してみる。ホットレグ配管の  $A_2$  位置における加速度は圧力源の波高値に対応して、各々 14G×30 msec, 32G×50 msec, 41G×80 msec と上昇している。一方、コールドレグ配管  $A_7$  位置では各々 14G×50 msec, 22G×70 msec, 28G×110 msec と上昇している。

Table 6.2 Comparison of Peak Pressure

Item	Peak Pressure at Source Point		
	10 kg/cm <sup>2</sup> ·g (TEST No. ND06)	20 kg/cm <sup>2</sup> ·g (TEST No. PB02)	40 kg/cm <sup>2</sup> ·g (TEST No. PE07)
Pressure Source P <sub>1</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	15	23	32
Upper Part of SG P <sub>4</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	22	32	41
Hot Leg Piping P <sub>5</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	20	26	33
Hot Leg Piping P <sub>8</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	8	17	32
IHX P <sub>10</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	7	14	26
Cold Leg Piping P <sub>15</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	15	19	21
Circumferential Strain S <sub>1</sub> [ $\mu$ strain]	110	240	320
Rupture Time Lower / Upper [msec]	6 / 17	5 / 13	5 / 10

## 6. 4. 2 持続時間の影響

### (1) 試験条件

圧力源の波高値を  $20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  に固定して持続時間を 3, 20 (レファランス・ケース) および 40msec の 3 段階に変えて試験を実施した。

Test No. NA08 および NC09 の試験条件をレファランス・ケースと比較して Fig. 6. 8 に示す。

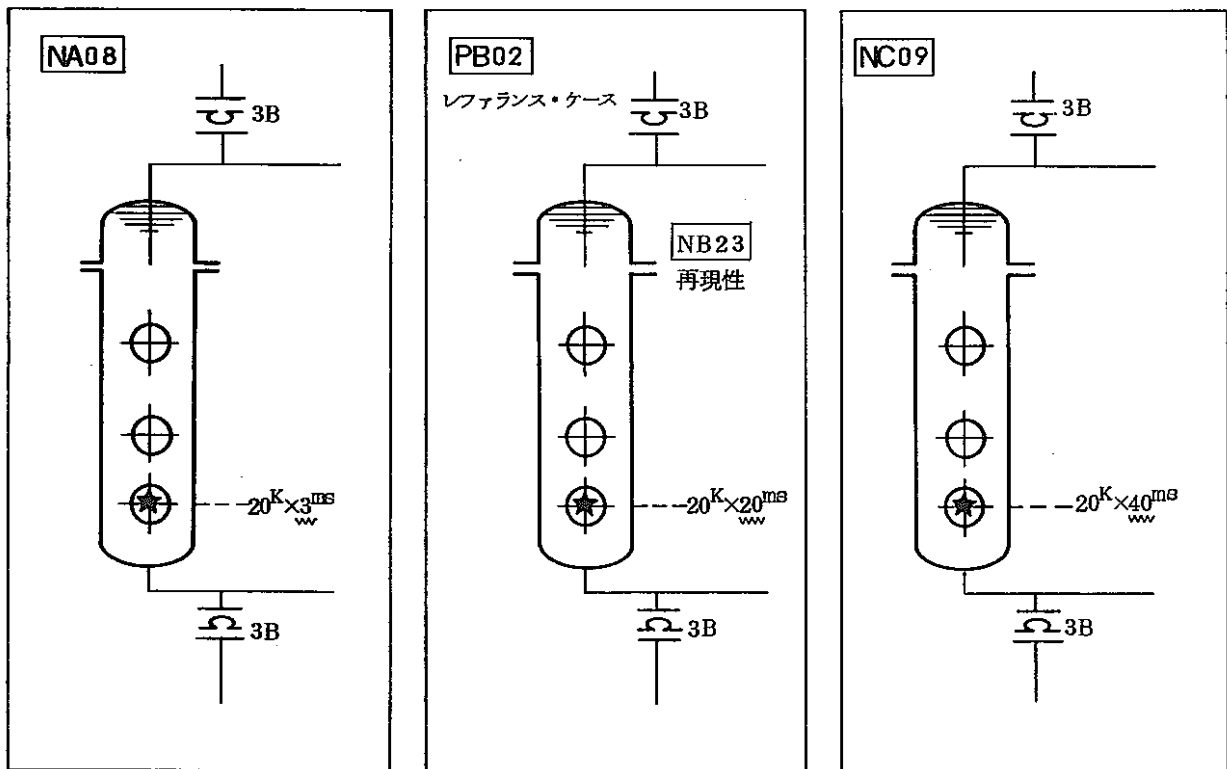


Fig. 6. 8 圧力波影響評価試験 [持続時間効果]

圧力源の持続時間が短い場合 (Test No. NA08:  $20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g} \times 3 \text{ msec}$ )、インパルス量が小さいため伝播の過程で減衰し易く、各部で反射波が出現しにくいことが圧力履歴から把握できる。上部ラブチャードディスクの破裂も不完全で、Test No. NA08 のケースではラブチャードディスクが反転しナイフに当たった時点で止まっている。

レファランス・ケースと比較して圧力源の持続時間が短い場合に顕著なことは、圧力源の波高値が同じであっても、IHX へ伝播する波がほとんど減衰していることである。これに対して、持続時間が 20msec の場合は、IHX へ伝



播する波の波高値は圧力源の60%程度までの大きな値を示している。

一方、圧力源の持続時間がレファランス・ケースより長い、40msecの場合 (Test No. NC09) は、レファランス・ケースとほとんど変わらない伝播挙動を示した。

歪履歴は圧力源の持続時間に対応した値を示した。

加速度は圧力源の波高値が一定であれば圧力の持続時間にかかわらず同じ程度であった。従って前項に記述したように加速度の支配的要因は圧力波の波高値である。

## 6.5 圧力発生点影響評価試験

### (1) 試験条件

標準波形の圧力源をSGの上部、中央部および下部（レファランス・ケース）に変えて、圧力源の位置の変化による圧力波伝播上の影響を調べた。

Test No. NB10およびNB11の試験条件をレファランス・ケースと比較してFig. 6.9に示す。

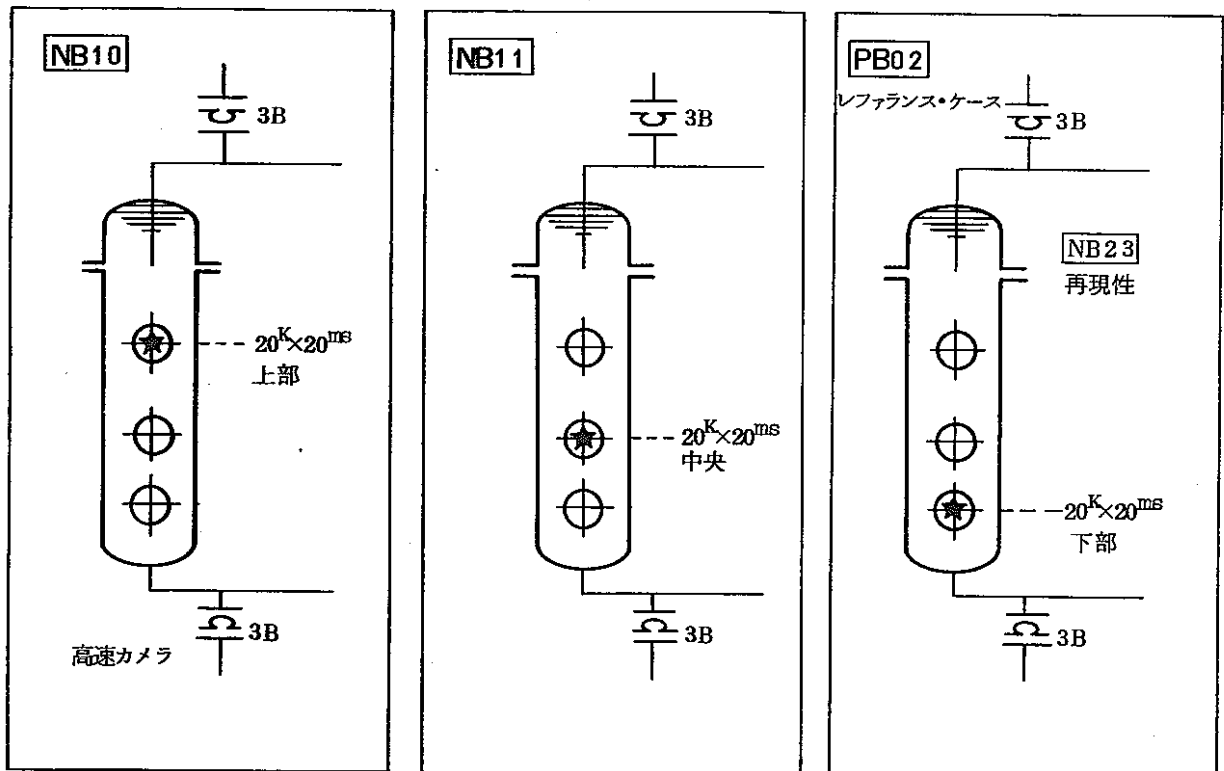


Fig. 6.9 圧力発生点影響評価試験

尚、Test No. NB10においては下部ラプチャーディスク（反転ナイフ型）の破裂状況を高速撮影し、圧力波伝播挙動との関連性を調べた。この結果は第6.8章に述べる。

### (2) 試験結果の検討

代表的な各点の最大波高値をTable 6.3に示す。また圧力源を20 kg/cm<sup>2</sup>・gとして、ノルマライズして整理した値を同表（ ）内に示す。

圧力源がSGの上部および中央部である場合には、SG上下の鏡部で波高値が圧力源の約1.5倍に上昇している。(デッド・エンド効果)ている。しかし圧力源がSGの下部の場合、燃焼ガスがSG下部のデッドエンド付近に発達するため、SG下部の波高値は上昇していない。

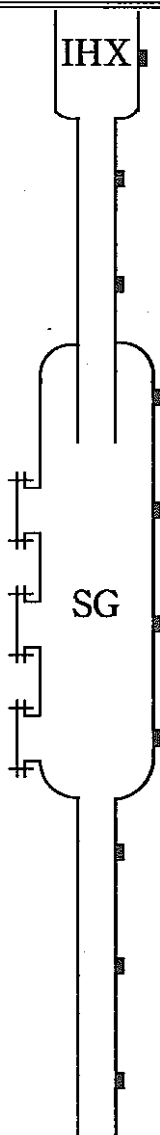
SGから配管へ入射する圧力波について見てみると圧力源がSG上部の場合、ホットレグ配管の波高値は圧力源に近いので、大きな値を示すと考えていたが、実際には小さな値を示し、一見逆の現象が見られる。(Table 6. 3,  $P_8$ および $P_{10}$ 参照)これはホットレグ配管位置の燃焼ガス球面からの減圧波の伝播によるものと思われ、非常に興味深い結果が得られた。今後Test No. NB10と同一の条件で現象の再現性を確認する必要がある。

一方、SG下部のコールドレグ配管へも同様の現象となるが、SG上部と違い下部は配管への圧力波伝播がし易い構造のために、ホットレグ配管ほどの減衰がない事が観測された。(Table 6. 3,  $P_{18}$ ～ $P_{19}$ 参照)

尚、上下のラプチャーディスクの破裂状況に圧力源位置による差は見られなかった。

加速度は圧力源位置が異なってもほとんど変わらない。

Table 6.3 Comparison of Peak Pressure

Pressure [kg/cm <sup>2</sup> ·g]	Source Location			
	Upper (TEST No. NB10)	Medium (TEST No. NB11)	Lower (TEST No. PB02)	
	P <sub>10</sub>	3 (2)	8 (8)	1.4 (12)
	P <sub>8</sub>	3 (2)	1.0 (10)	1.7 (15)
	P <sub>5</sub>	2.4 (20)	3.5 (35)	2.5 (20)
	P <sub>4</sub>	3.9 (30)	3.4 (35)	3.2 (28)
	P <sub>3</sub>	2.6 (20)	2.8 (30)	2.7 (23)
	P <sub>2</sub>	3.0 (25)	1.9 (20)	2.0 (17)
	P <sub>1</sub>	3.8 (30)	2.8 (30)	2.3 (20)
	P <sub>19</sub>	4.4 (35)	2.9 (30)	2.6 (23)
	P <sub>15</sub>	2.5 (20)	1.8 (20)	1.8 (16)
	P <sub>13</sub>	2.0 (16)	1.5 (15)	1.2 (10)

shows source location  
 ( ) shows normalized data

## 6. 6 放出系配管レイアウト影響評価試験

### 6. 6. 1 放出系配管の設置位置による影響

#### (1) 試験条件

Fig. 6. 10に示すように放出系が主配管の場合（主配管付）と胴付の場合とを比較した。

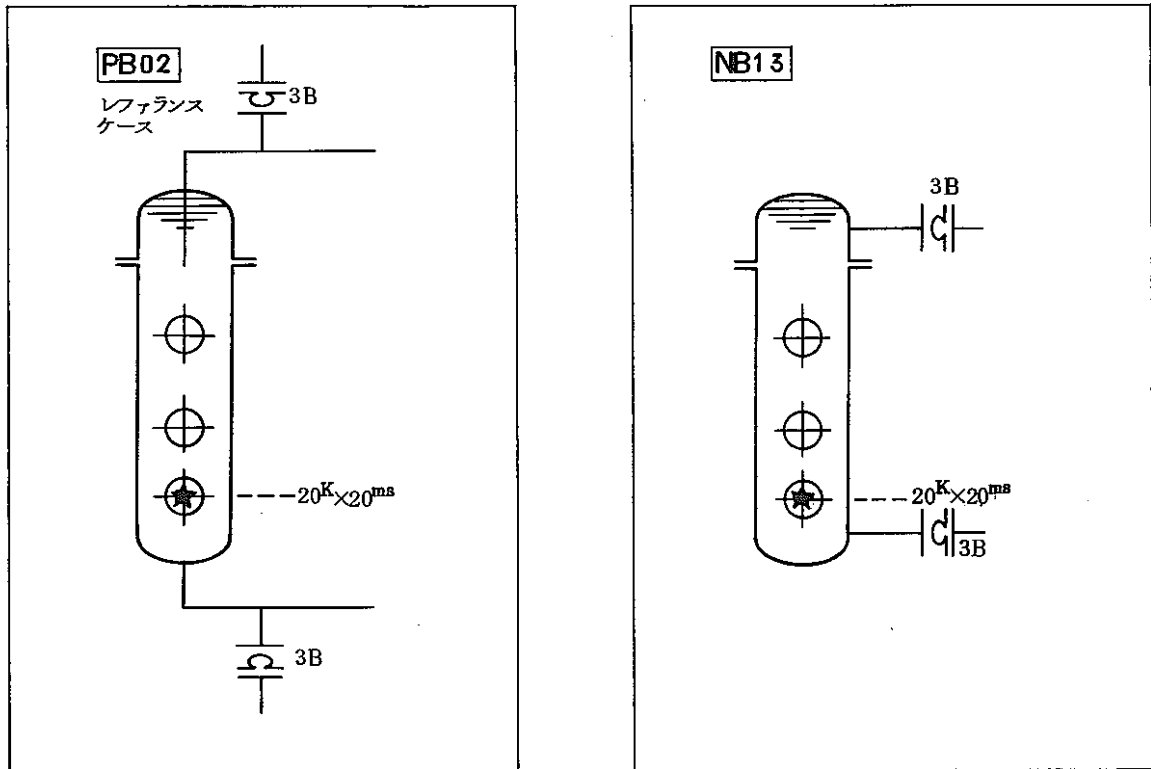


Fig. 6. 10 設置位置による違い

#### (2) 試験結果の検討

ラプチャーディスクの破裂状況については、両者とも大きな差は見られなかった。胴付の場合においても、上部の液中ラプチャーディスクは不完全開口であった。ラプチャーディスクの破裂時刻は、胴付の場合下部が3msecで上部が6msecであった。主配管付の場合は下部が5msec、上部が12msecで破裂した。このように胴付の方が早く破裂するためSG内の圧力波は、主配管付に比べて早く減衰する。しかしながらラプチャーディスク破裂以前に初期の圧力波はホットレグおよびコールドレグ配管内に伝播するため放出系配管の設置位置によらず、SG内部以外に大きな差異は見られないがIHX内部（P<sub>10</sub>）においては胴付の場合、ホットレグ配管に入った圧力波はラプチャーディス

ク開放による減圧効果が主配管内で生じないため波高値は約20%高くなる  
ことが認めれた。

## 6. 6. 2 主配管付放出系配管の系統数の影響

### (1) 試験条件

Fig. 6. 11に示すように放出系が2つある場合、上部のみに1つの場合、および下部のみに1つの場合の3ケースを比較してその影響を調べた。

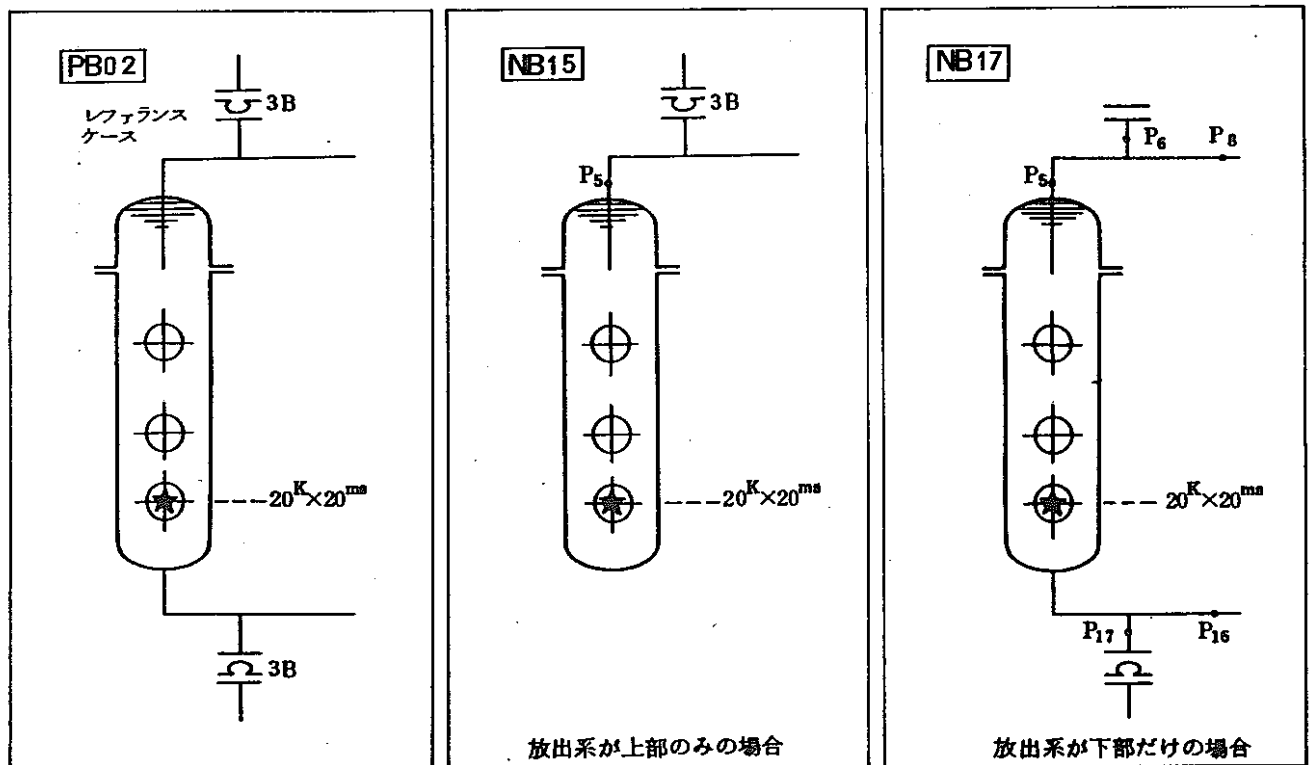


Fig. 6. 11 系統数による違い (主配管付)

### (2) 試験結果の検討

ラブチャーディスクを2つ取り付けた場合 (Test No. PB02), 下部は5msec, 上部は12msecで破裂した。単独に取り付けた場合でも変わらず下部のみの場合 (Test No. NB17) は5msecで、上部のみの場合 (Test No. NB15) は12msecで破裂している。即ち、ラブチャーディスクの破裂時間は圧力源の位置と規模で決まり、他のラブチャーディスク破裂の影響を受けない。

実験ではラブチャーディスクを取り付けない場合、その部分に盲板をするため Test No. NB15では  $P_{17}$  位置において、また Test No. NB17では  $P_6$  位置においてデッド・エンドによると思われる圧力のビルド・アップが生じる。Test No. NB17では結果的に、ビルド・アップされた圧力波によって、IHX 内部に

他のケースに比べて高い（波高値）圧力波が出現する。これは上部ラプチャーディスクが破裂していない事によるものか、あるいはP<sub>17</sub>位置のビルド・アップされた圧力波によるものか、いずれかの原因によりIHX内で増幅すると思われる。

Test No. NB15ではこのビルド・アップによる圧力波は膨張タンクの波面で減衰するため、顕著とはならない。

以上の点を除いて、ラプチャーディスクが主配管付の場合、放出系系統数による圧力波伝播挙動への影響は見られなかった。これは、ラプチャーディスク破裂以前に初期圧力波が配管内に伝播することが主な要因と思われる。



### 6. 6. 3 胴付放出系配管の系統数の影響

#### (1) 試験条件

Fig. 6. 12 に示すように、放出系が SG の胴付で 2 つある場合と SG 上部に 1 つだけの場合を比較してその影響を調べた。

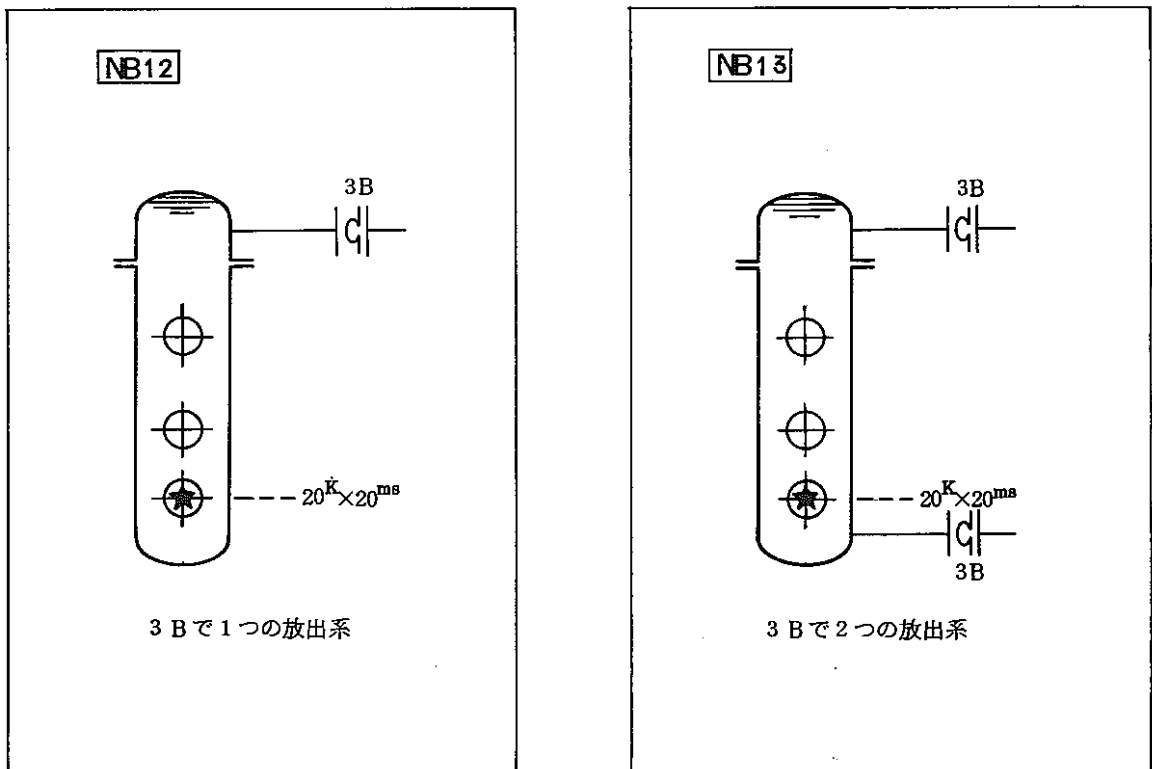


Fig. 6. 12 系統数による違い (SG 胴付)

#### (2) 試験結果の検討

6. 6. 2 項で述べたように、ラプチャーディスクは胴付の場合でも破裂時刻は固有に定まり、2 つある場合も 1 つの場合でも同じで上部は 6 msec で、下部は 3 msec であった。圧力源に近くラプチャーディスクが存在する場合は SG 内部の圧力波が減衰し、効果的であることがわかった。即ち、SG 下部のラプチャーディスクの破裂によって SG 内部の圧力波の持続時間は短くなる。

#### 6. 6. 4 有液面における放出系配管の系統数の影響

##### (1) 試験条件

Fig. 6. 44 に示すように胴部のラプチャーディスクを1ヶ(4B)取り付ける場合と、2ヶ(3B)取り付ける場合を比較して調べた。

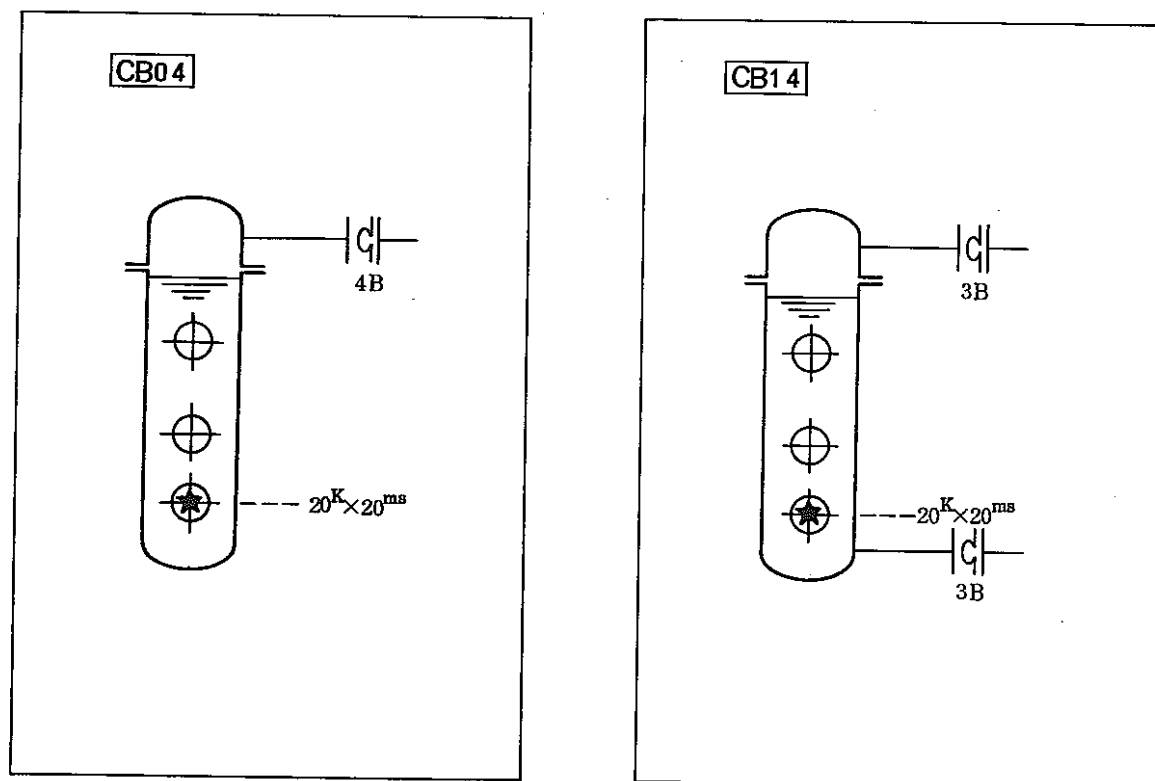


Fig. 6. 13 有液面で放出系統数が違う場合

##### (2) 試験結果の検討

上部ガス中ラプチャーディスクは両ケースとも破裂していない。2つ取付けた場合の胴部液中ラプチャーディスクは完全開口であった。2つ取付けた場合、液中ラプチャーディスクが完全開口であったにも拘らず、1つ取付けた場合と圧力波伝播挙動はほとんど同じであった。

### 6. 6. 5 ラプチャーディスクの口径による影響

#### (1) 試験条件

試験条件を Fig. 6. 14 に示すようにホットレグ配管に1つの放出系で、ラプチャーディスクの口径が3Bの場合と4Bの場合を比較して調べた。

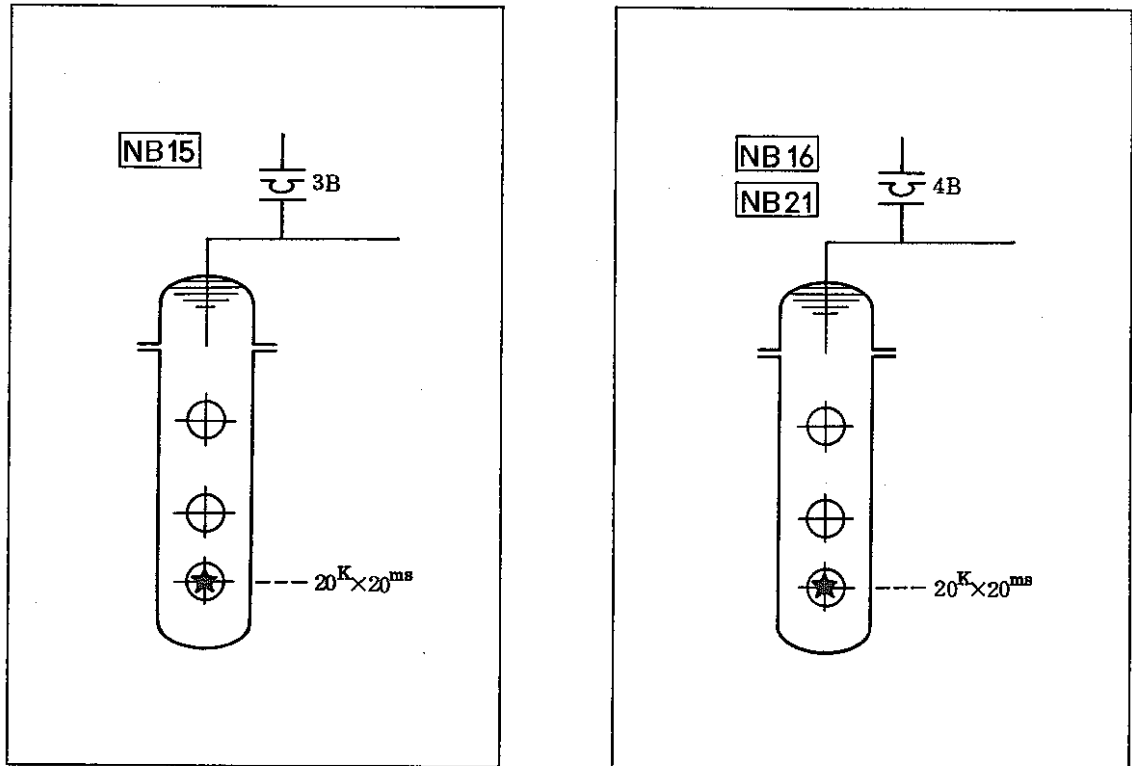


Fig. 6. 14 ラプチャーディスクの口径による影響

#### (2) 試験結果の検討

ラプチャーディスクの破裂時刻、破裂状況とも両者の差は少なく、圧力波の伝播状況もほとんど同様であるが、IHX 内部は、3B の場合の方が約 20% 高い波高値を示した。これは主配管 (6B) から分岐する場合の反射率の違いと、開口面積の差異による負圧の反射の程度の違いによるものと思われる。

## 6. 6. 6 主配管付放出系配管の長さによる影響

### (1) 試験条件

Fig. 6. 15 に示すように放出系配管長がレファレンスケースより 1.2m 長い場合の影響を調べた。

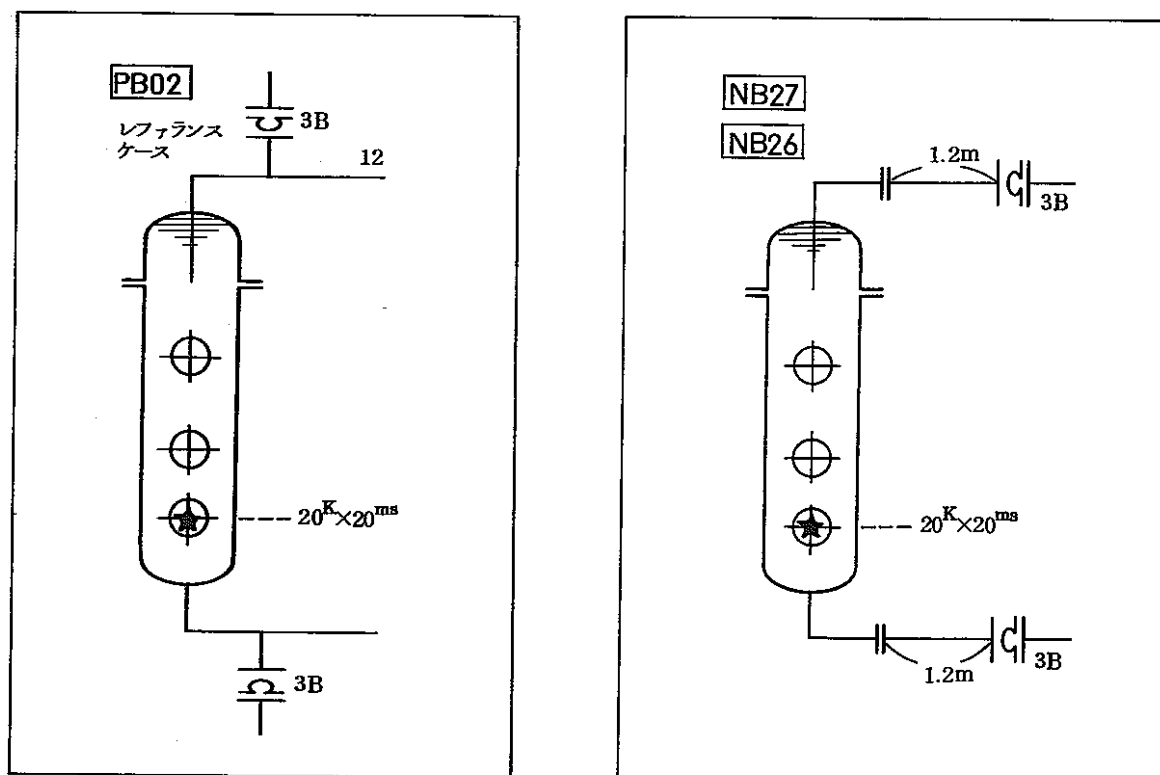


Fig. 6. 15 放出系配管長の影響（主配管付の場合）

### (2) 試験結果の検討

ラプチャーディスクの破裂状態に両ケースの差はなかったが破裂時刻は、放出系配管長の長い方が、上部、下部とも 1.5~2 倍遅く上部は 18 msec, 下部は 10 msec であった。圧力波伝播状況に両者とも似ているが、放出系配管の長い方が IHX 内部の圧力波高値は、約 40% 上昇した。

Test No. NB26 は NB27 と同一条件で、圧力源波高値を  $15 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  としたケースである。放出系配管を長くし、かつ、圧力源の波高値を小さくすると下部ラプチャーディスクも、上部同様不完全開口となった。

## 6. 6. 7 胴付放出配管の長さによる影響

### (1) 試験条件

Fig. 6. 16 に示すようにラプチャーディスクを胴付とした場合に、放出系配管を通常の長さよりも、1.2m 長くした場合の影響を調べた。

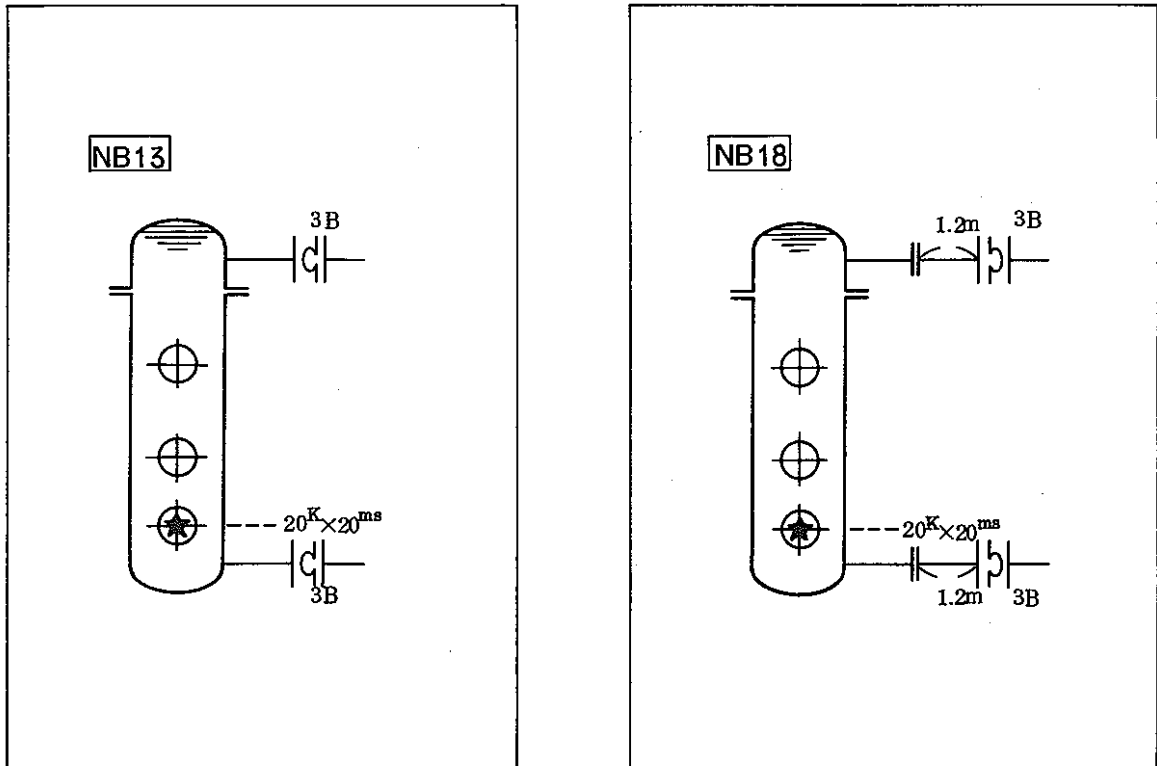


Fig. 6. 16 放出系配管の長さによる影響（胴付の場合）

### (2) 試験結果の検討

ラプチャーディスクの破裂状況については、下部の放出配管が長い場合に、やや不完全開口であった。破裂時刻は配管が長い方が2倍程度に遅れている。SG内の圧力波に関しては、放出配管が長い方がラプチャーディスクの破裂するまでの時間が長いため持続時間の長い傾向が認められた。但し、波高値は同程度であった。

また、IHX内部は放出配管が長い方が2倍程度高い波高値を示した。これは圧力源の持続時間が長いためホットレグ配管内のラプチャーディスク盲部からの反射が大きくなったためと思われる。

## 6. 7 圧力開放板開口挙動影響評価試験

### 6. 7. 1 ラプチャーディスク不完全開口の影響

#### (1) 試験条件

Fig. 6. 17に示すようにラプチャーディスクの後に半開口の鋼板を取付け、ラプチャーディスク破裂後の流体流出を開口面積の半分に抑制することによる圧力波伝播挙動の影響を調べた。

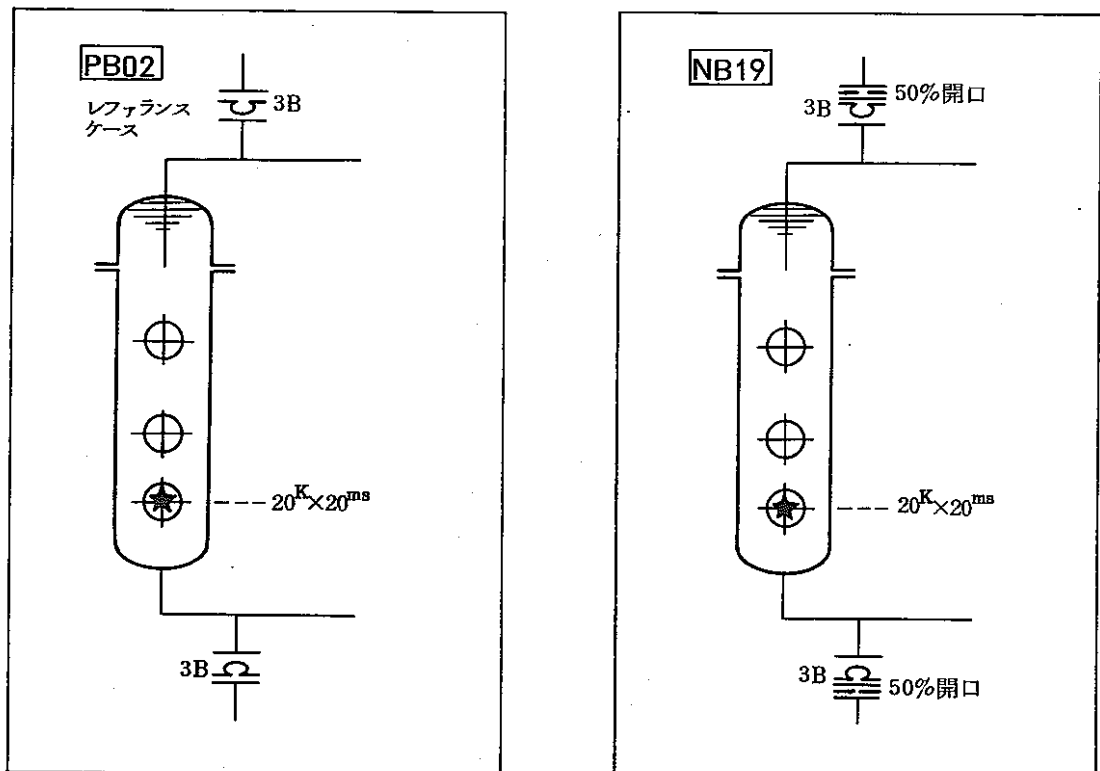


Fig. 6. 17 ラプチャーディスク不完全開口の影響

#### (2) 試験結果の検討

上部、下部ともラプチャーディスク破裂状況は破裂時間を含め、レファレンス・ケースと同様であった。ラプチャーディスク自体は完全開口であった。

圧力波伝播挙動上の差異は見られなかった。これはラプチャーディスクの破裂自体に違いがなく放出流を制限しているだけなので圧力波の伝播という早い時間帯での挙動に差がないためと言える。

従って今後ラプチャーディスクの不完全開口模擬の手法自体に工夫が必要と思われる。

## 6. 7. 2 ラプチャーディスクの型式による影響

### (1) 試験条件

Fig. 6. 18に示すようにラプチャーディスクを反転スコア型にして、反転ナイフ型との差が圧力波伝播挙動上に与える影響を調べた。

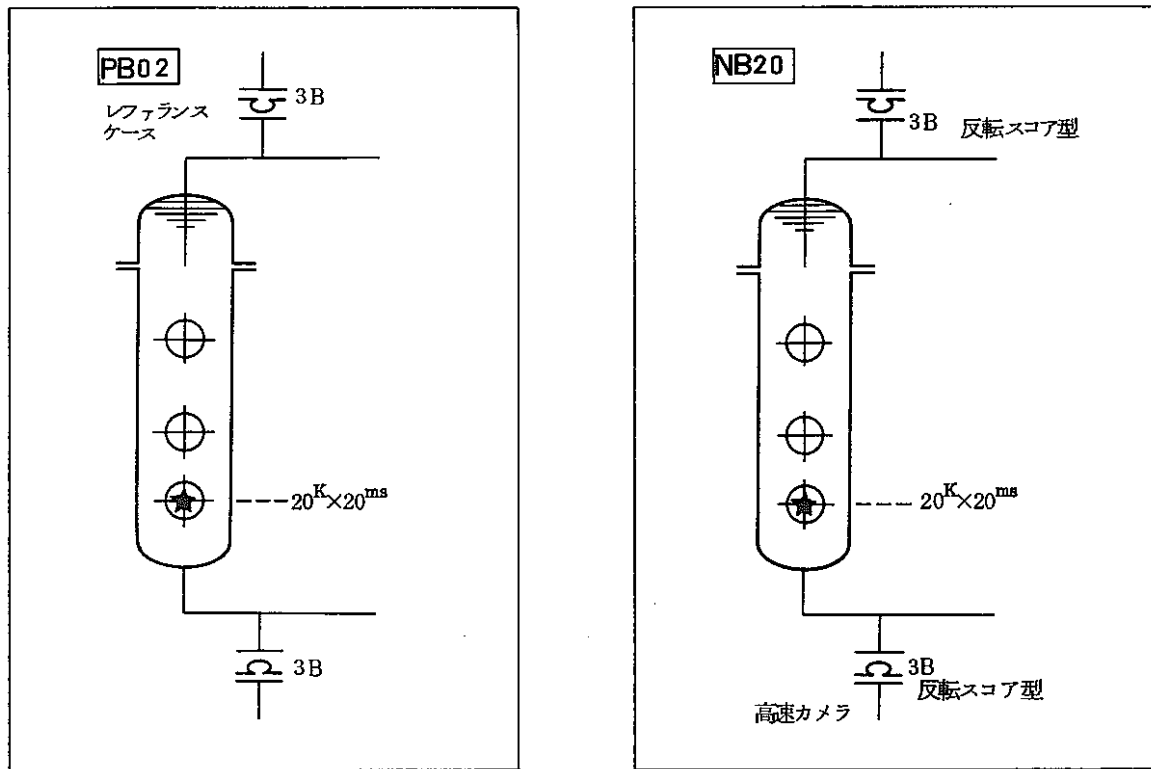


Fig. 6. 18 ラプチャーディスクの型式による影響

### (2) 試験結果の検討

反転スコア型ラプチャーディスクは反転ナイフ型に比べて、上下のラプチャーディスクとも完全開口であった。下部を100%の開口とした場合、上部は80%の開口であった。(Photo 6. 1参照) ただし、第6. 8章に述べるように、ラプチャーディスク破裂時の状況を高速撮影することにより変形開始から破裂(水噴出)までの時間はラプチャーディスク型式により異なり、スコア型の方が短いことがわかった。各点の圧力波伝播挙動に大きな差異は見られず、ラプチャーディスクの型式による影響はないと思われる。

### 6. 7. 3 ラプチャーディスクが破裂しない場合の影響

#### (1) 試験条件

Fig. 6. 19 に示すようにラプチャーディスク地点に盲板をし、ラプチャーディスクが破裂しない場合の圧力波伝播挙動に及ぼす影響を調べた。

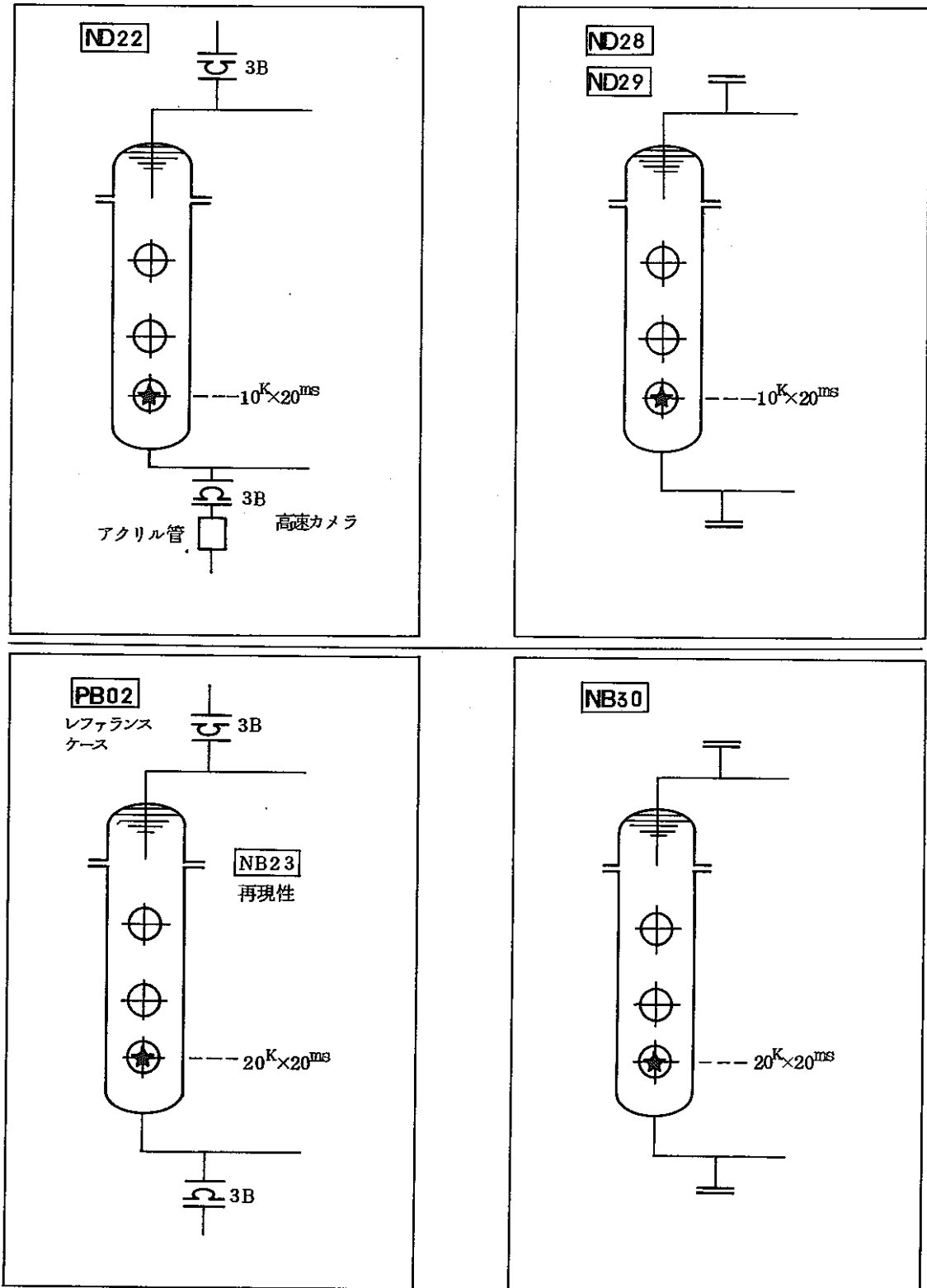


Fig. 6. 19 ラプチャーディスクの破裂しない場合の影響



## (2) 試験結果の検討

Test No. ND28とND29は $10 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g} \times 20 \text{ msec}$ の再現性試験の結果を示すが、全点において、極めて良く一致している。

### a. 圧力源の波高値が $10 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ の場合

この場合、Test No. ND28とND22を比べるとわかるようにラプチャーディスクの有無にかかわらず、各点の圧力履歴に大きな差はない。即ち圧力源の波高値が小さい場合ラプチャーディスクの存在の有無による圧力波伝播挙動上の影響はないと思われた。

### b. 圧力源の波高値が $20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ の場合

波高値が $20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ の場合であっても、各点の有意な波高値を持つ初期波と、第二波はラプチャーディスクの有無にかかわらず影響は少ない。

Test No. NB30では $P_9$ 付近に、ラプチャーディスク不破裂の模擬による影響か、あるいは盲によるデッドエンド部からと思われる反射が強く現われ、後流の $P_9 \sim P_{11}$ に影響させているのが特徴的である。一方、波高値の小さい場合はデッドエンド部からの反射による影響が小さいため、反射波が強くは現われていない。

また、Test No. NB30において垂直配管部 $P_{13}$ 、 $P_{14}$ においては、膨張タンクの液面による負圧の反射による影響からか、 $P_{14}$ の第二、第三の波（Fig. 6. 20、図中ⒶおよびⒷ）が極端に減衰し、消滅する傾向が見受けられる。

また、 $P_{13}$ （Fig. 6. 20、図中Ⓒ、Ⓓ）において遅れて現われる波は周期約 $35 \text{ ms}$ から換算される伝播距離（片道）約 $20 \text{ m}$ から類推すれば、SGの上方と下方へ伝播した波が膨張タンク内液面で、反射を複数回繰り返し互いに交差することから減圧波が反転し正圧となって現われた波と思われる。

ラプチャーディスクのないTest No. NB30の場合と、ラプチャーディスクのあるTest No. PB02の場合を比較すると破裂による放出系配管内の圧力波の減圧効果が評価できる。完全開口したコールドレグ側ラプチャーディスクの手前 $P_{17}$ （放出系配管部）および $P_{19}$ （主配管部）の圧力波を比較して論ずることとする。Test No. NB30では、 $P_{19}$ の圧力波が減衰して放出系配管

に入射し、盲部のデッド・エンド効果により波高値が2倍になると仮定すると、放出系配管には、主配管部（P19）の波高値の70％に減衰した圧力波が入射したことになる。ラブチャーディスクを取り付けたTest No.BP02の場合も同様にP19の圧力波高値の70％に減衰した波が放出系配管に入射するとすれば、放出系配管部（P17）の圧力波と比較して、破裂による約30％の減圧効果のあることが評価できる。Test No.BP02では反転ナイフ型のラブチャーディスクであるが、反転スコア型を取り付けたTest No.NB20でも上記と同様の減圧効果が評価できる。

放出系配管内の波高値は、ラブチャーディスクの破裂によって30％減衰するが、破裂後も圧力波は存在し、持続時間は、SG内の圧力源と同程度に持続することがわかった。

ラブチャーディスクの無い場合（Test No. NB30）と胴付の液中ラブチャーディスクが破裂した場合（Test No. NB05）の圧力履歴を比較すると、Test No. NB05の圧力波形はラブチャーディスクの破裂による開放圧力波の減圧波の伝播により減衰することが認められる。これに対応して、ホットレグ配管、IHX内の圧力上昇が少なくなる。これにより胴付の液中ラブチャーディスクの存在による有効性が確認できる。一方、コールドレグ配管内の圧力波伝播についてはラブチャーディスクの破裂による影響を大きくは受けないと判断される。これはSG下部で発生した圧力源の第一波がラブチャーディスクの破裂前にコールドレグ配管内に伝播するためである。またSG下部は、上部と異って圧力波が伝播しやすい構造となっている。

加速度は放出系配管レイアウトおよびラブチャーディスクの開口挙動の違いによって大きくは影響されず、圧力源によって定まることが認められた。

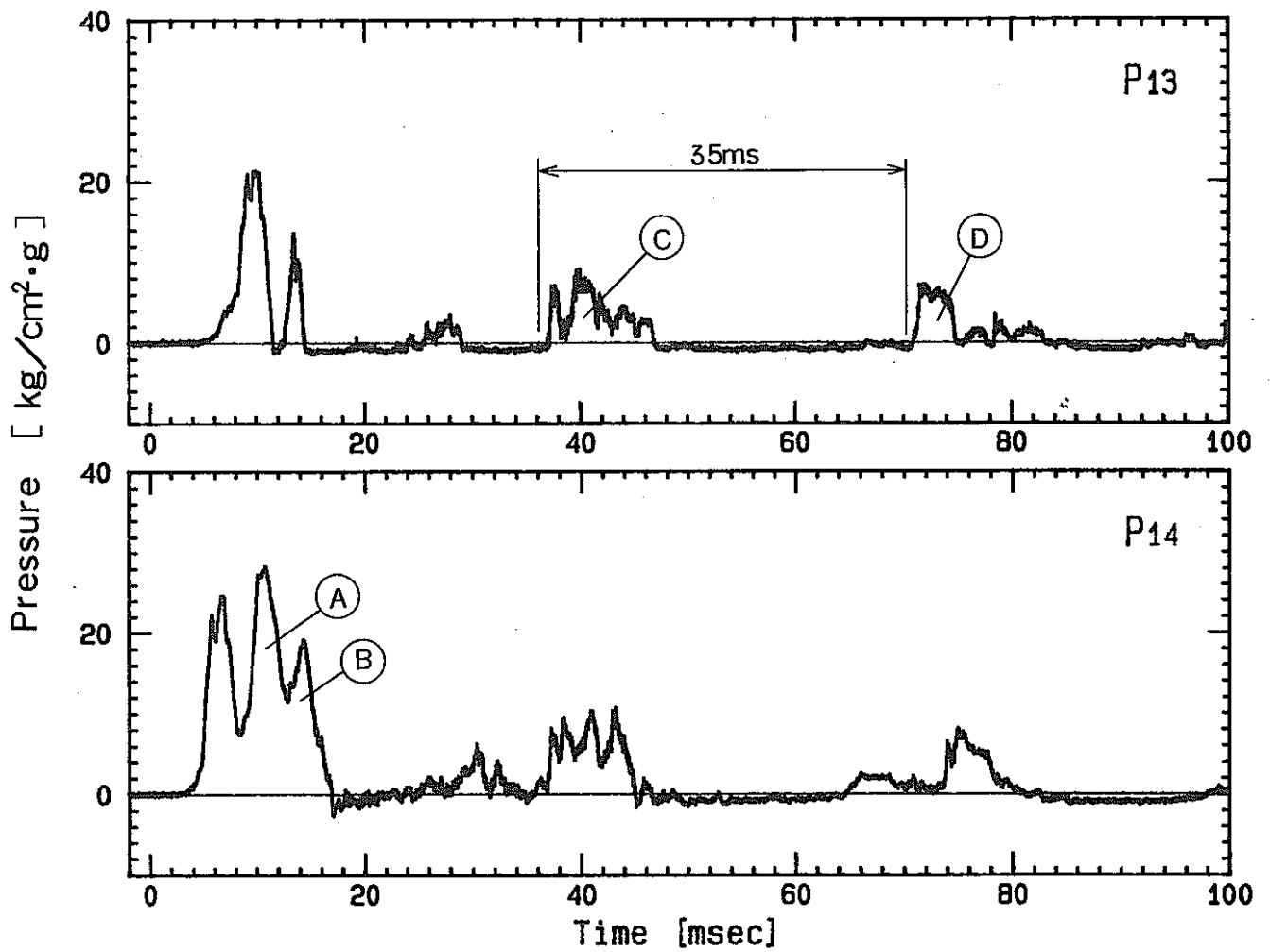


Fig. 6.20 Pressure History [ Test No. NB30 ]

## 6. 8 放出流動およびラプチャーディスク破裂状況の高速撮影結果

高速撮影の対象とした試験ケースと撮影条件を Table 6. 4 に示す。下部主配管付放出系を対象に流動状況および破裂状況の高速撮影を実施した。

### 6. 8. 1 流動状況の観察

#### (1) Test No. ND06 ( $15 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g} \times 20 \text{ msec}$ )

火薬発破 ( $t=0$ ) より 7.3 msec 後にラプチャーディスクの最初の亀裂から噴出した飛沫がアクリル管の入口に認められる。その後約 6 msec ではっきりとした噴出スラグが流速、約  $30 \text{ m/s}$  にて出現する。 $t=0$  より約 45 msec 後に流速は減衰しはじめ、約 400 msec で  $6\sim 7 \text{ m/s}$  となり後は 5 秒後までこの速度で流れる。

以上の流動の時刻歴を Fig. 6. 21 に示す。また高速撮影時の 16mm フィルムからコピーした時刻ごとの流動状況を示す写真を Photo 6. 1 に示す。

#### (2) Test No. NE07 ( $32 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g} \times 20 \text{ msec}$ )

火薬発破 ( $t=0$ ) より 6.4 msec 後に最初の飛沫がアクリル管の入口に出現する。その後 4.7 msec で噴出スラグが流速約  $45 \text{ m/s}$  で流れる。発破より約 23 msec 後には噴出水の先端がアクリル管の出口付近に達するが  $t=60 \text{ msec}$  あたりから流速が減少しはじめる。540 msec 付近でアクリル管の出口付近に逆流が進行してきて正流を押し返しなが、徐々に入口方向へ進む。約 670 msec で管内の流れはほぼ静止する。その後、再び正流方向に流れ始める。

以上の流動の時刻歴を Fig. 6. 22 に、写真を Photo 6. 2 に示す。

#### (3) まとめ

圧力源の波高値が約 2 倍になると、下部ラプチャーディスク破裂後の放出流、流速は約 1.5 倍に上昇した。また流速が早い場合には、圧力源の負圧現象により、逆流を生ずることが把握できた。

## 6. 8. 2 ラプチャーディスク破裂状況の観察

### (1) Test No. NB10 (反転ナイフ型ラプチャーディスク)

本試験の圧力源位置はSG中央部である。火薬発破より3.59 msec後にラプチャーディスクの最初の変形が認められる。その変形は中心部ではなく外縁部に発生する。ラプチャーディスクは不規則な形で変形しながら、中央部のナイフによって破れ、5.29 msecにスラグ噴出が始まる。変形開始から破断まで1.7msecを要した。

破裂現象の時刻歴をFig. 6. 23に、各時点の破裂状況をPhoto 6. 3に示す。

### (2) Test No. NB20 (反転スコア型ラプチャー・ディスク)

火薬発破より1.51 msecでラプチャーディスクが変形開始する。変形はラプチャー・ディスクの中心から半径20mmの円周上付近に発生する。その後変形は外縁部へ伝播し2.26 msecで中央線上の上部に亀裂が発生する。亀裂は中央部に伝わり、ここから最初のスラグ噴出が起こる。その後縦の中央線下部と左右の水平線上にも亀裂が発生し、ラプチャーディスクは上下、左右対称形で割れ、噴出スラグが飛出す。

ラプチャー・ディスクの変形開始から最初の亀裂発生まで0.75msecを要した。

破裂現象の時刻歴をFig. 6. 24に、各時点の破裂状況をPhoto 6. 4に示す。

反転スコア型ラプチャーディスクの場合、破断部開口面積が高速撮影写真から明らかとなるため、その開口履歴から完全開口する時点が予測できる。Fig.6.25にスコアー型の開口履歴を示す。開口面積は高速写真より、開口部の投影面積を実測し、算出した。

この図から、完全開口はラプチャーディスク面に初期圧力波が到達し、変形を開始してから約4msec後であることが予測できる。この結果は今後、解析コード検証時に有用である。

### (3) まとめ

両ケースとも発破よりラプチャーディスク変形開始時刻までの時間差より計算される速度は音速に等しく、ラプチャーディスクは初期圧力波によって変形を開始する事が確認できた。

反転ナイフ型よりも反転スコア型の方が2倍程度、早く破裂するが圧力波伝播現象には影響しない。

Table 6.4 List of High-speed Photographing

Item	T e s t N o			
	ND06	NE07	NB10	NB 20
Objective of high-speed Photograph	Observation of fluidity		Observation of rupture characteristic	
Photographing speed	700 FPS		5000 FPS	
Test Objective	Influence of peak pressure		Difference of rupture disc type	
Disc type	Reverse buckling with blades			Scored reverse buckling
Source pressure peak $\times$ time [kg/cm <sup>2</sup> ·g] $\times$ [msec]	15 $\times$ 20	32 $\times$ 20	26 $\times$ 20	21 $\times$ 20
Frame interval time [msec]	1.547	1.553	0.189	0.187
Flow velocity [m/s]	30	45	—	—
Time to see the initial flow in acrylic tube [msec]	7.30	6.41	—	—
Time to start the disc deformation [msec]	—	—	3.59	1.51
Pressure source location	lower	lower	upper	lower

Test No. ND06

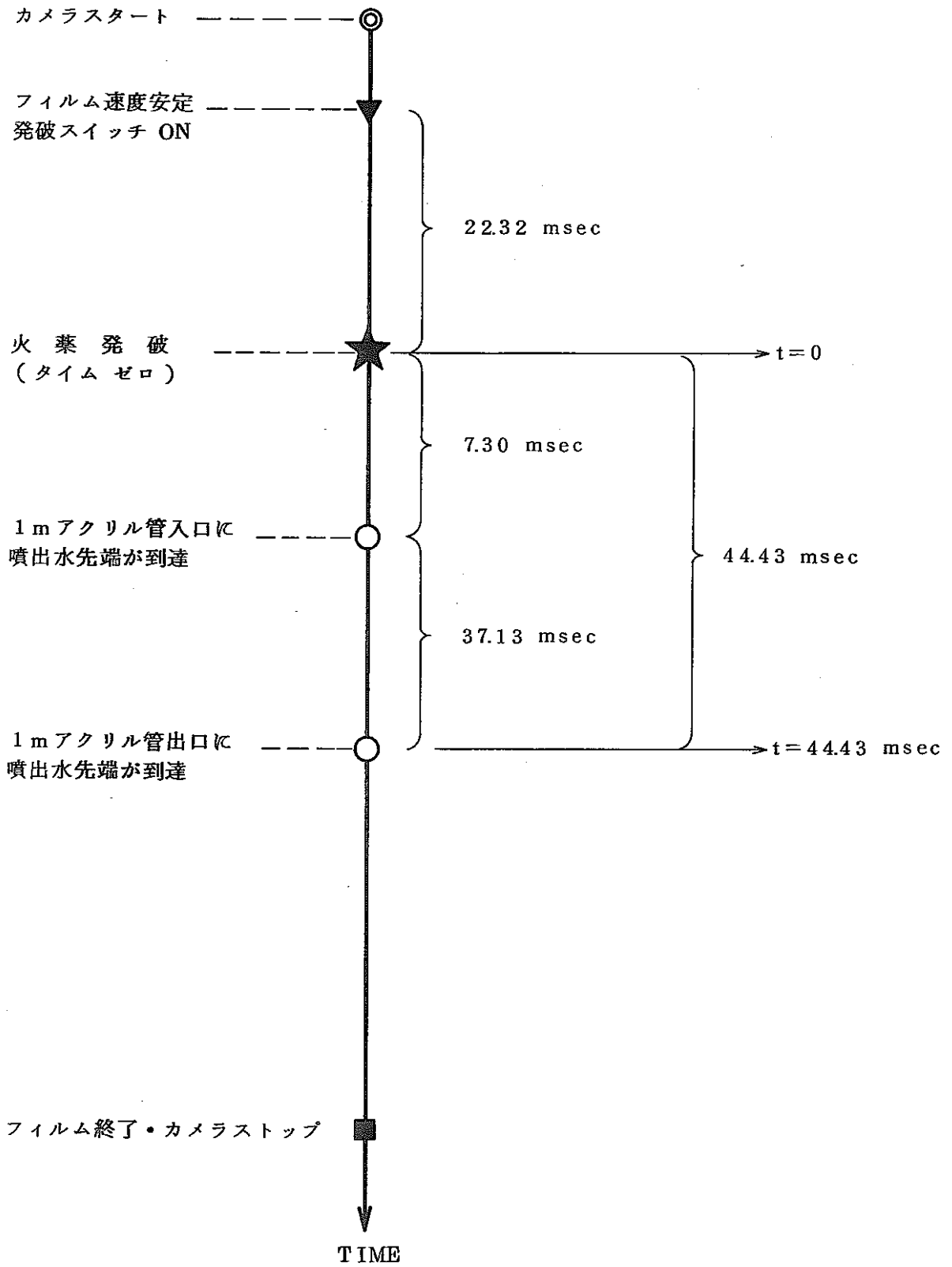


Fig. 6.21 Time History of Slug Flow ( $P_1 : 15 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g} \times 20 \text{ msec}$ )



Test No. NE07

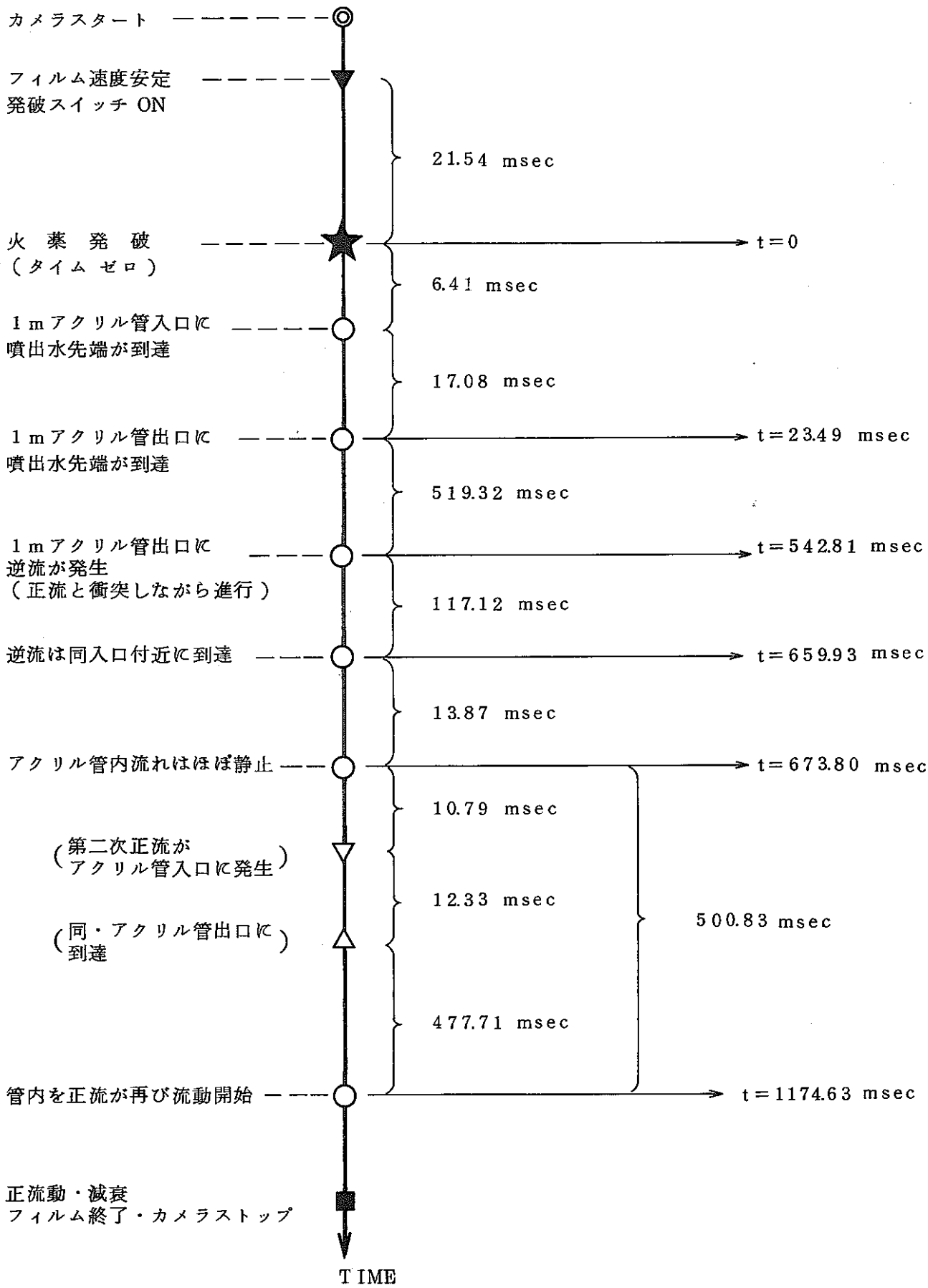


Fig. 6.22 Time History of Slug Flow ( $P_1 : 32 \text{ kg/cm}^2 \cdot \vartheta \times 20 \text{ msec}$ )

Test No. NB10

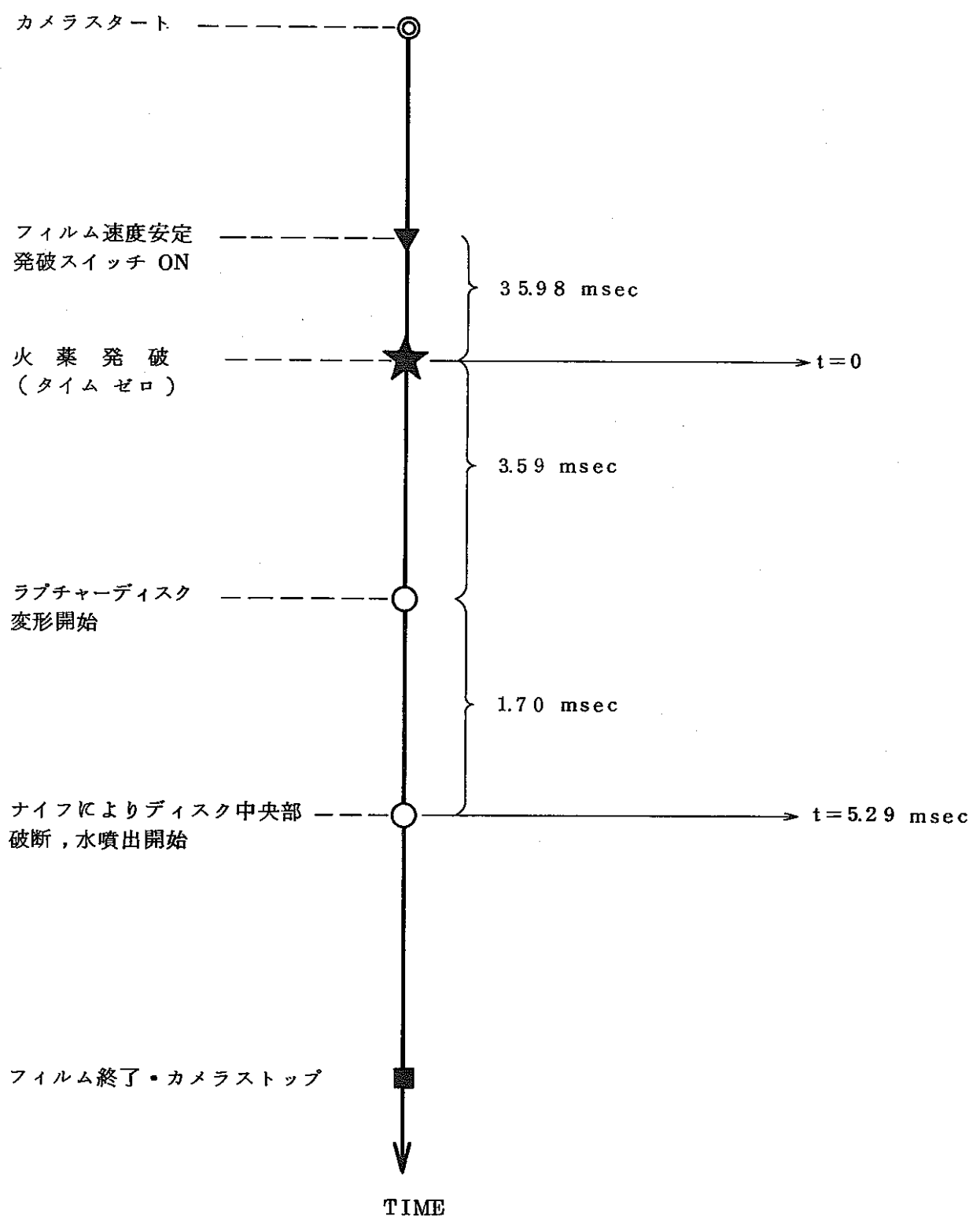


Fig. 6.23 Time History of Disc Rupture (Type of Reverse Buckling with Blades)

Test No. NB20

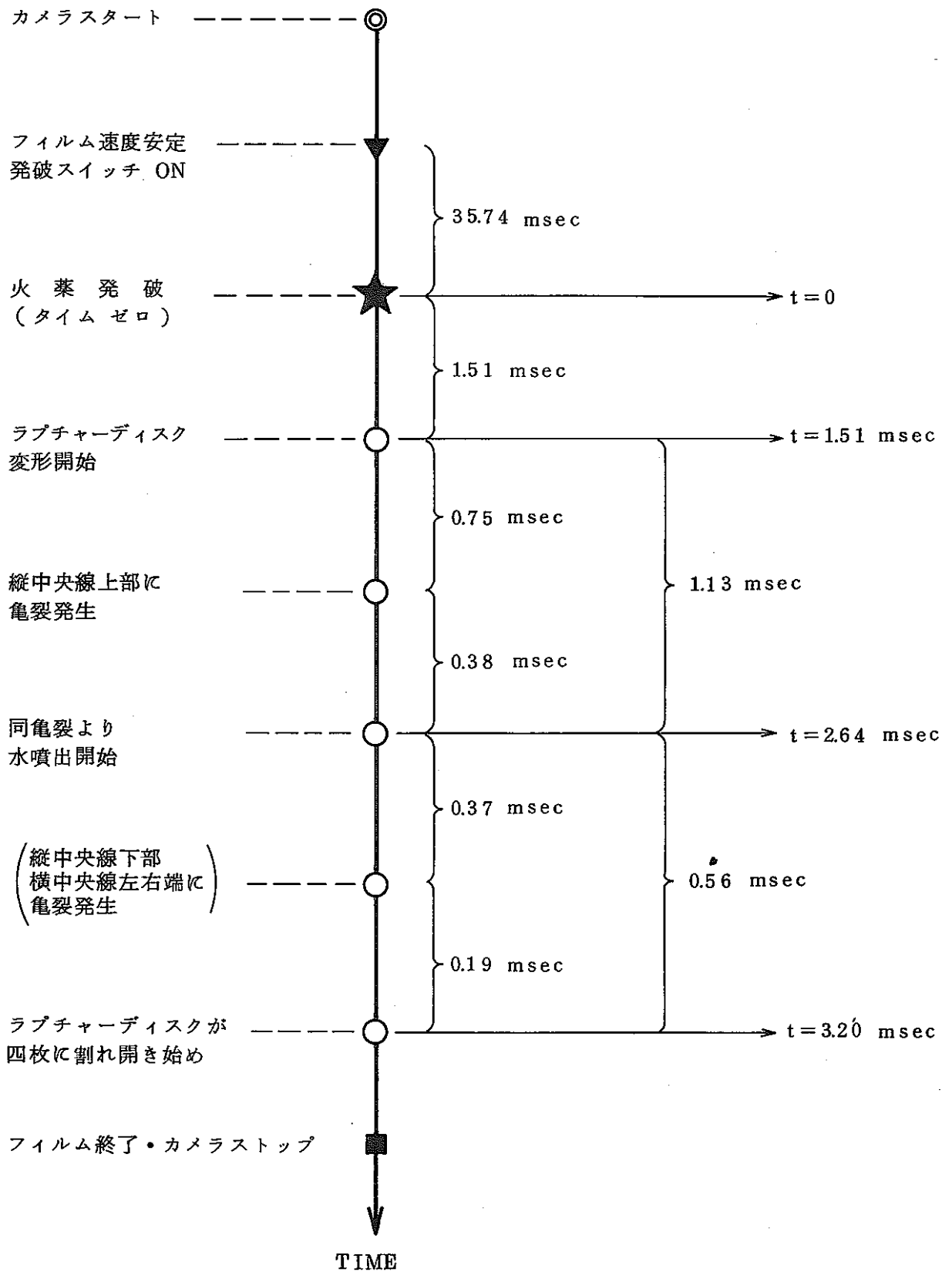


Fig. 6.24 Time History of Disc Rupture (Scored Reverse Buckling Type)

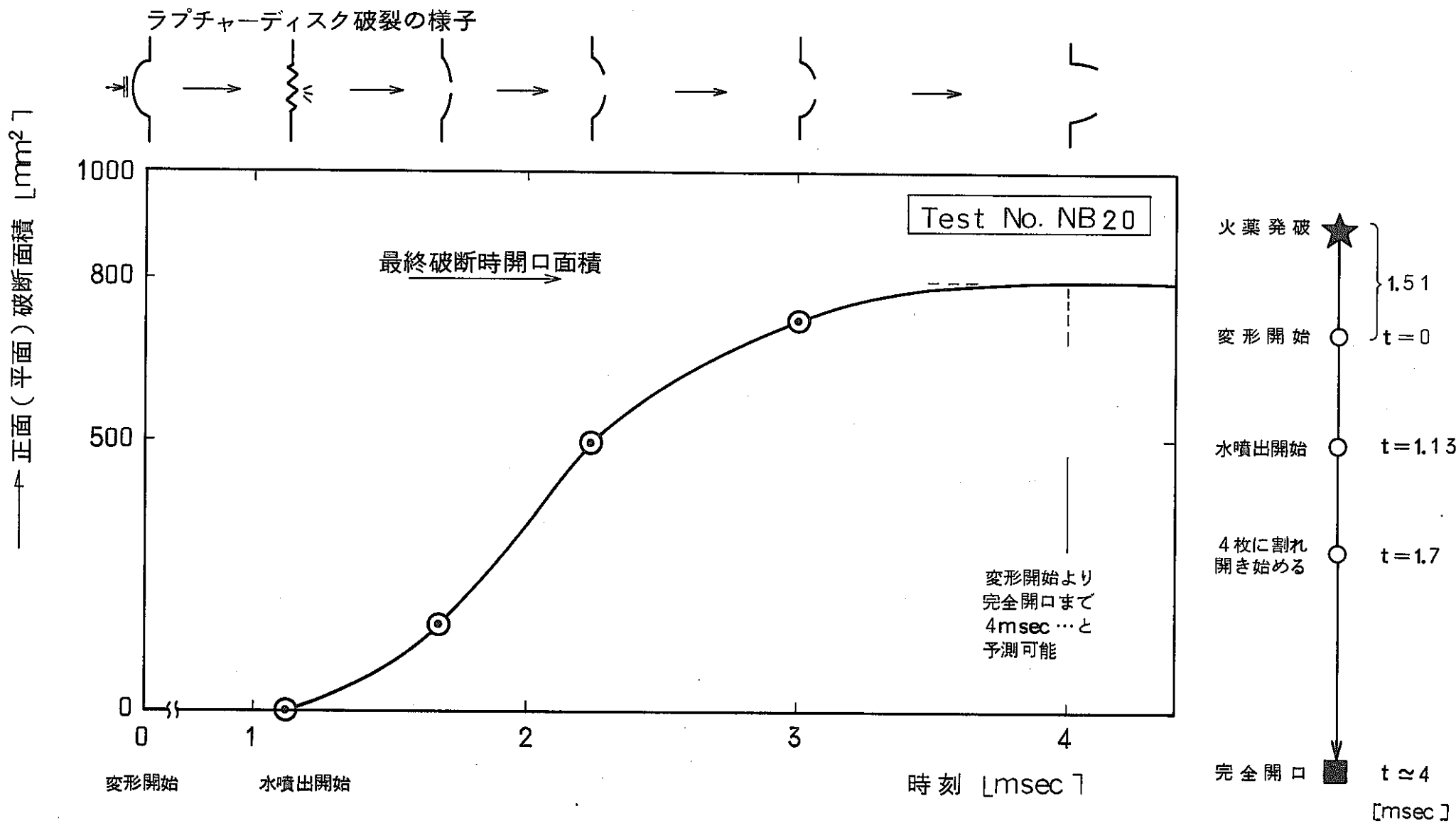


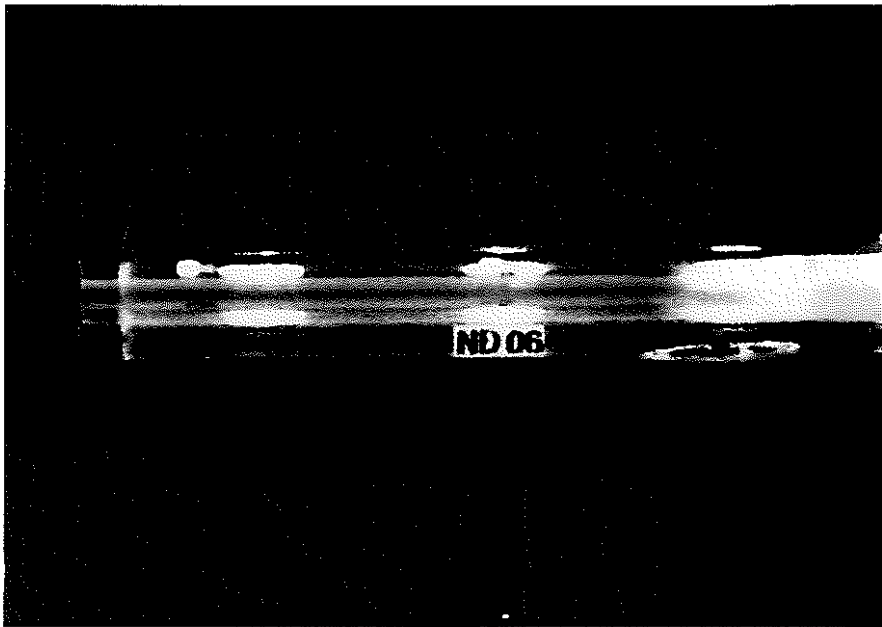
Fig. 6.25 Opening History of Scored Reverse Buckling Rupture Disc



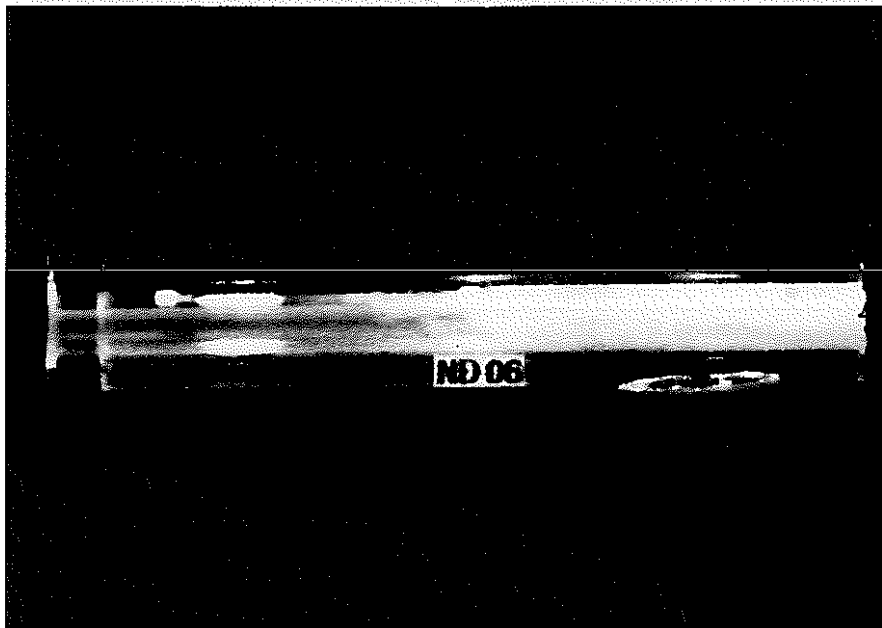
back  
side  
mesh ;  
50mm/div.

Photo 6.1 Appearance of Rupture Discs after Tests

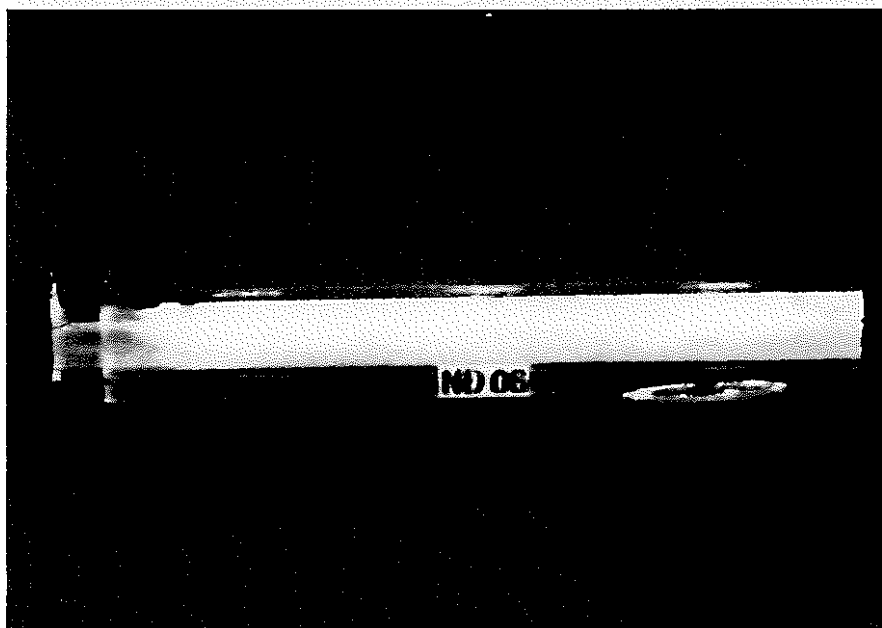
Test No.  
ND 0 6



$t = 13$  msec



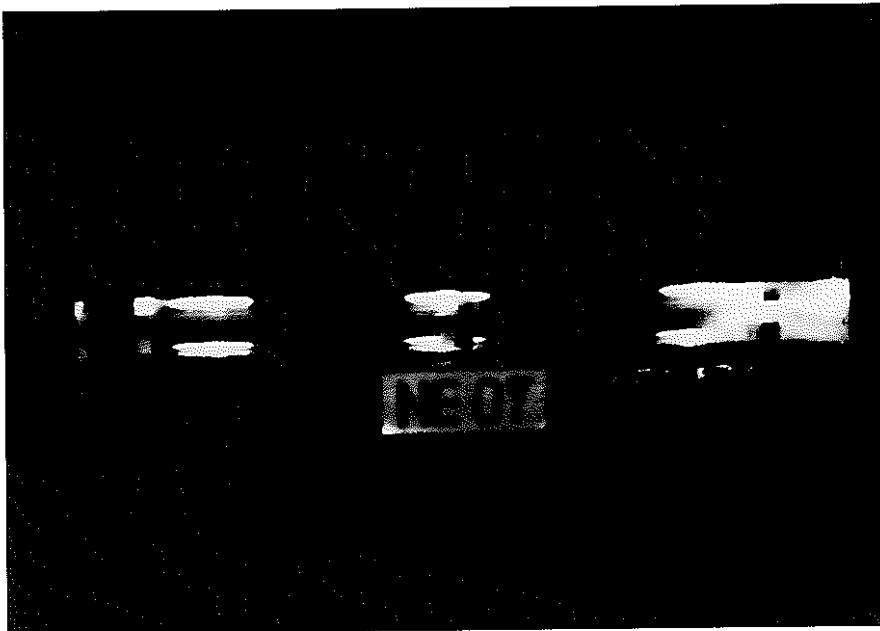
$t = 27$  msec



$t = 43$  msec

Photo 6.2 High - speed photograph of fluidity ( $15\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{gx}20\text{msec}$ )

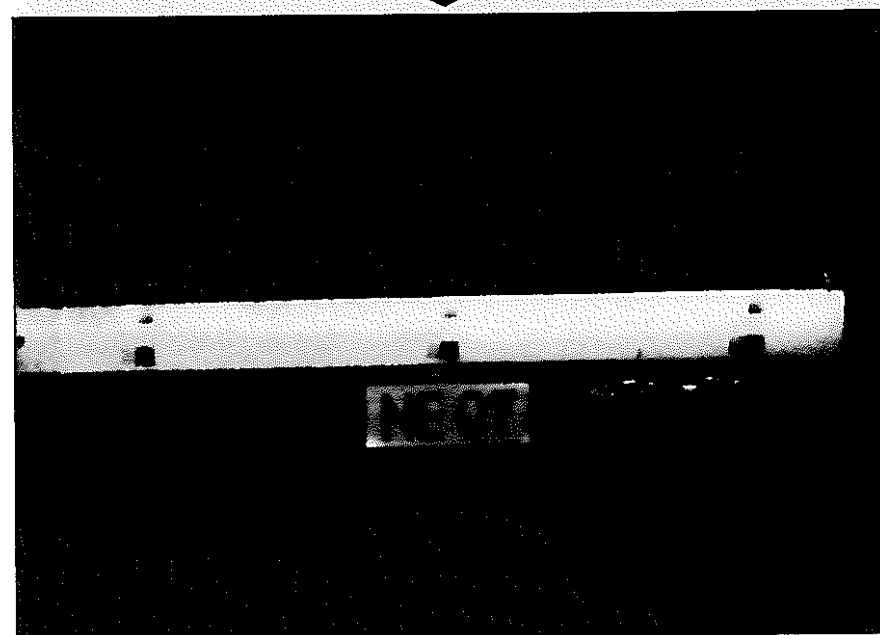
Test No.  
NE 07



$t = 8 \text{ msec}$

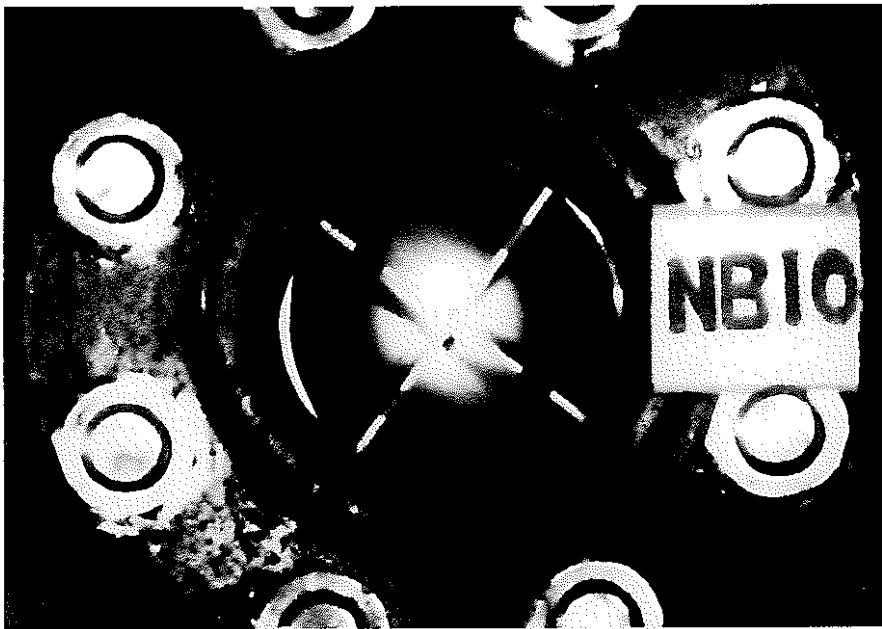


$t = 27 \text{ msec}$



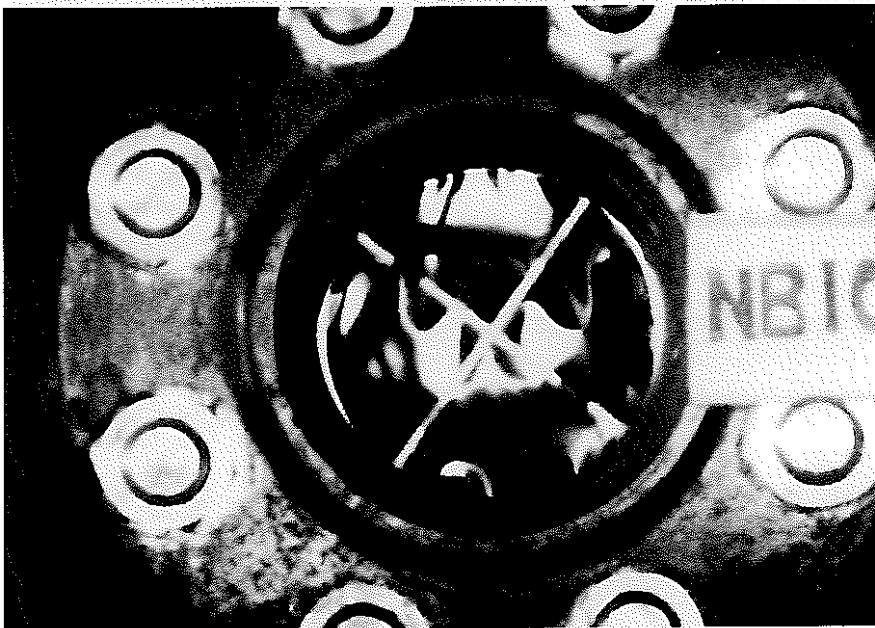
$t = 564 \text{ msec}$

Photo 6.3 High - speed photograph of fluidity ( $32\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{gx}20\text{msec}$ )

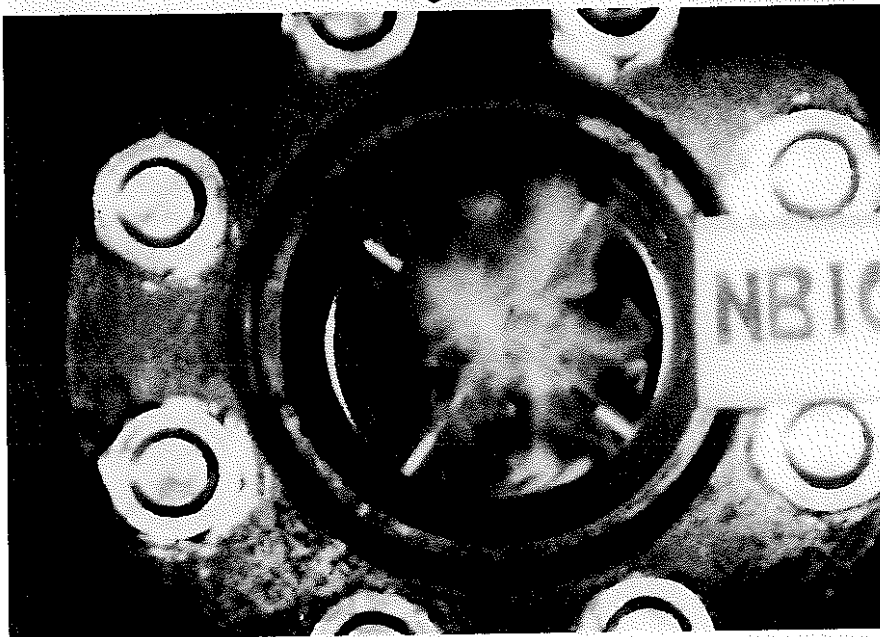


Test No.  
NB 1 0

$t = 0$



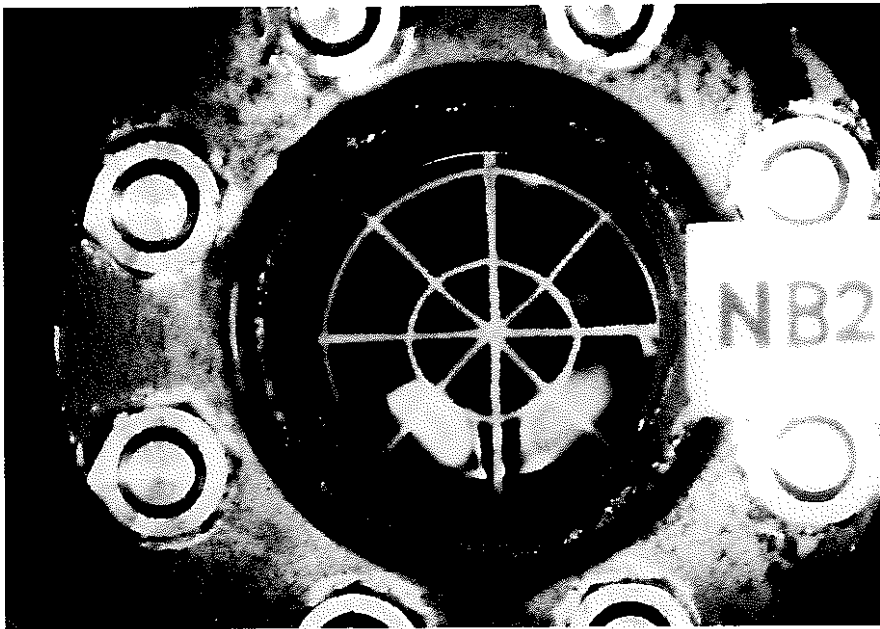
$t = 4.4 \text{ msec}$



$t = 5.7 \text{ msec}$

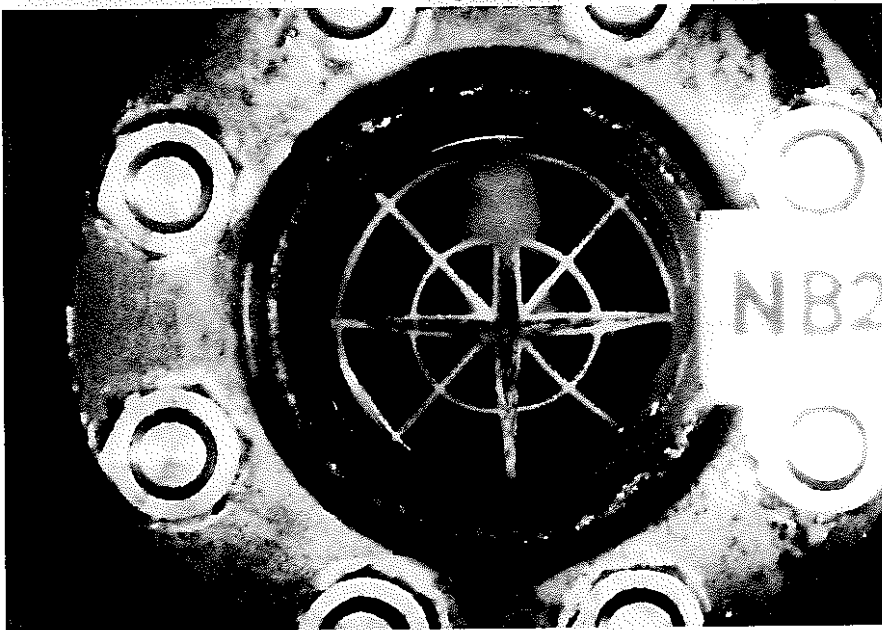
Photo 6.4 High-speed photograph of rupture disc  
(Reverse buckling with blades)



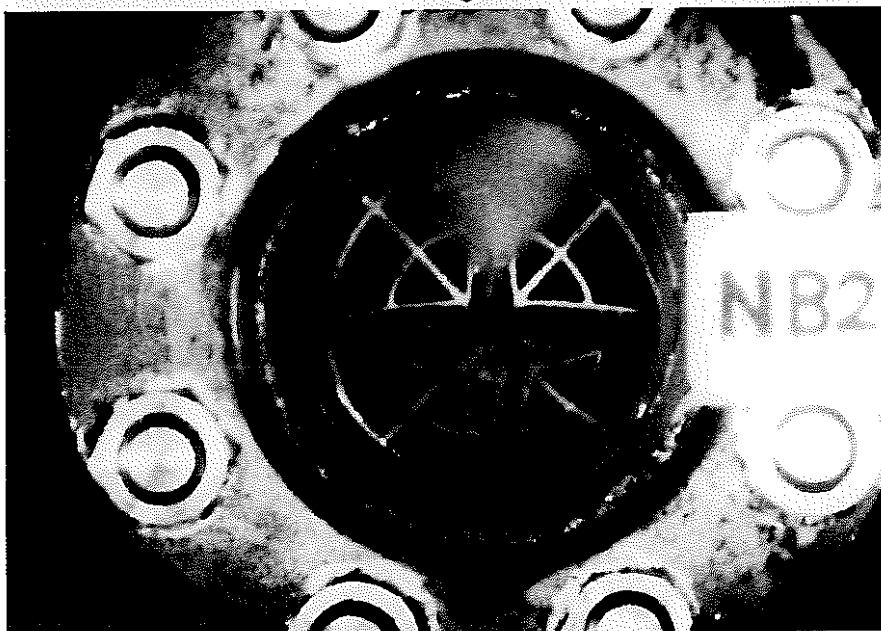


Test No.  
NB 2 0

$t = 2.3 \text{ msec}$



$t = 3.2 \text{ msec}$



$t = 3.8 \text{ msec}$

Photo 6.5 High-speed photograph of rupture disc  
(Scored reverse buckling)

## 7. 結 言

FBR実証炉設計の1概念である2次冷却系の1/5の縮尺試験装置を製作し、低爆速火薬による衝撃的な圧力波を発生させて、ナトリウム-水反応によるスパイク圧を模擬した実験を実施した。ラプチャーディスクの破裂状況を含め、系統内の圧力波伝播挙動を把握するうえでの基礎的な知見を蓄積した。

これらの成果をまとめると以下のように結言される。

### (1) 真空引効果試験

真空チャージをしなくても通常のガス抜き操作により理論値に見合う音速値が得られ、SG内は約1240 m/sであった。圧力波伝播挙動上の再現性は極めて良好であった。

### (2) カバーガス圧効果試験

カバーガス圧は圧力波形に影響を与えないことが確認された。尚、実際のナトリウム・水反応時とは異なると思われるが、有液面の場合、発破後スラグ下降による二次波が発生することがあり、またカバーガス加圧による二次波以降の圧力波の発生周期の短縮効果が明らかとなった。

### (3) 液面影響評価試験

有液面の場合、液面近傍は圧力波が削減されるため、ホットレグ配管およびIHX内は圧力上昇が見られない。一方、コールドレグ配管へは、無液面の時と同様の圧力波伝播をする。従って有液面型SGはホットレグ配管およびIHXに対しては圧力波の発生を緩和させるには有効である。

カバーガス中のラプチャーディスクはスパイク圧に対して作動しない事が確認された。

### (4) 圧力波影響評価試験

圧力源の波高値に対応した波高値で各部へ圧力波は伝播する。但し持続時間に関しては、圧力源に十分なインパルス量が存在しなければ反射波が出現せず、時間的に

延びない傾向を示した。

#### (5) 圧力発生点影響評価試験

圧力源に近い方の配管内の圧力の方が低い波高値の伝播圧力波となり、予測とは逆の現象を示す傾向が把握された。これは圧力源が接近するほど、発生したガス面により減圧波が反射されるための減衰効果と見ることができる。従って、SG上部に圧力源があればホットレグ、IHX等は圧力がビルド・アップされない結果となる。

#### (6) 放出系配管レイアウト影響評価試験

放出系が主配管付の場合に比べて、胴付の場合は圧力源の圧力波の持続を削減する効果があり、その結果としてIHX内部に有意な波高値の圧力波が伝播しないことが認められた。

ラブチャーディスクが破裂しない場合は、圧力源の圧力波の持続時間が大きくIHX内部に大きな圧力波を出現させた。これはラブチャーディスクが破裂しないことによる影響と実験上取り付けられた盲板によるデッド・エンドの効果の両者によるものと思われた。

放出系系統数、ラブチャーディスクの口径および開口度による圧力波伝播上の影響は小さかった。

スパイク圧のうち、最大波高値を有する初期の部分はラブチャーディスク破裂前に系統内を伝播するためラブチャーディスクは伝播圧力波の波高値の減衰に対しては有効ではないことがわかった。

ラブチャーディスクを取付けた場合と取付けない場合の比較により、コールドレグ放出系配管内の圧力波高値に対し、ラブチャーディスクの破裂によって30%の減圧効果のある事が評価できた。

#### (7) 高速撮影から得られた知見

圧力源が30 kg/cm<sup>2</sup>・gおよび20 msec程度であると、ラブチャーディスク破裂後、圧力源の負圧効果による放出流の一端静止および逆流のある事がわかった。またラブチャーディスクは音速で伝播した初期圧力波で変形開始する事が確認された。変形開始から水噴出までに要する時間は、反転ナイフ型が1.7 msec、反転スコア

型が1.1 msecであった。またラプチャーディスク破裂部の高速撮影写真から開口履歴が得られ、反転スコア型ラプチャーディスクが変形し始めてから完全開口するまでの時間は約4msecであると評価できた。

尚、今期に行われた試験を踏まえて、以下の点が今後の課題としてあげられる。

- a. 今期の試験は無液面型SGで、膨張タンクを有する体系を標準にして実施した。この場合ホットレグ側に伝播した圧力波とコールドレグ側の圧力は膨張タンクを境界にして圧力波の伝播を遮断する結果となる。しかしながら、膨張タンクが無い場合はSG内の圧力源よりホットレグ側に伝播した圧力波とコールドレグ側に伝播した圧力波が重畳して増巾されることが考えられる。実機では、有液面型SGで膨張タンクの無い場合もあるため、今後この体系でのデータを取得しておくことが必要である。
- b. 今期試験はパラメータが多く、試験作業の効率化を計る必要から、ラプチャーディスクを取付けない部分は盲板を設置した。このため、デッド・エンドによる効果と思われる増巾された圧力波が系統内に含まれた。今後はデッド・エンドのない構造での圧力波伝播挙動試験が必要である。
- c. 今期は解析コード検証用データの取得に主眼を置き、モデルを単純化してを実施したが、より実機に近づけた体系での圧力波への影響を今後調べておく必要がある。
- d. 圧力源が上部の場合、ホットレグ配管内の伝播圧力波が減衰した結果が得られたが、再現性を確認しておく必要がある。
- e. 今回液中ラプチャーディスクは1枚としたが実機では二重に取付けられているため、開放特性が異なってくる。今後二重のラプチャーディスクの破裂挙動を把握しておく事が必要である。

## 謝 辞

本報告書を結ぶにあたり、研究の方向づけ、遂行ならびに報告書作成において御指導と有益な、御討論をいただいた大洗工学センター 安全工学部 プラント安全工学室の田辺裕美 副主任研究員ならびに下山一仁殿に厚く謝意を表します。

なお、本研究は、姫野嘉昭室長の御鞭撻により遂行し得たものであり、深く感謝いたします。