

JAERI-M

7 6 2 4

BWR格納容器圧力抑制効果小型試験
データ報告 No.1

(プール・スウェル試験：Runs 106, 111,
114, 153, 160, 161, 162, 164, 165)

1978年4月

久木田 豊・生田目 健・岡崎元昭・斯波正誼

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

B WR 格納容器圧力抑制効果小型試験データ報告 No.1
(プール・スウェル試験 : Runs 106, 111, 114,
153, 160, 161, 162, 164, 165)

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

久木田 豊・生田目 健

岡崎 元昭・斯波 正誼

(1978 年 3 月 1 日受理)

B WR 格納容器圧力抑制効果小型試験は、Mark II 格納容器を $\frac{1}{6}$ に縮尺した試験部によって、
LOCA 時に格納容器圧力抑制系に発生する熱水力現象の模擬試験を行うことを目的とするもの
である。

本報では、1977年1月から8月にかけて実施したプール・スウェル現象に関する試験9ラン
の試験結果および定性的な考察の結果を報告する。

JAERI-M 7624

Mark II Containment 1/6-Scale Pressure Suppression Test Program:
Data Report No.1
(Pool Swell Tests: Runs 106, 111, 114, 153, 160, 161, 162, 164, 165)

Yutaka KUKITA, Ken NAMATAME
Motoaki OKAZAKI and Masayoshi SHIBA

Division of Reactor Safety
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received March 1, 1978)

The Mark II Containment 1/6-Scale Pressure Suppression Test Program of JAERI started in December 1976, sponsored by the Japanese BWR owners' group, to investigate the thermohydraulic response of a BWR Mark II pressure suppression system during a postulated loss-of-coolant accident with a 1/6-scale test facility. A total of 23 runs of pool swell and steam condensation tests were performed from January to June 1977 for the BWR owners' group, and after the termination of the contract, the test facility was transferred to JAERI.

The present report provides a brief description of the test facility and instrumentation, test matrix and raw data from 9 runs of air-blowdown pool swell tests carried out from January to August 1977 as supplement to the runs performed under the contract. Qualitative interpretations of the data and plans for the future work are also presented.

Keywords: BWR, LOCA, Mark II Containment, Pressure Suppression System, Pool Swell.

目 次

1. まえがき	1
2. 試験装置と試験方法	2
2.1 試験装置の構成	2
2.2 模擬格納容器	2
2.3 試験方法	3
3. 計測系	9
3.1 構成	9
3.2 計測点および計測器	9
3.3 データ集録装置およびデータ処理	9
4. 試験条件および試験結果	16
4.1 試験条件	16
4.2 試験結果の概要	18
4.3 各ランの試験結果	20
4.4 試験結果の検討	22
5. 結論	92
謝辞	92
参考文献	93

CONTENTS

1. INTRODUCTION	1
2. TEST FACILITY AND TEST PROCEDURE	2
2.1 Mark II 1/6-Scale Test Facility	2
2.2 Test Containments	2
2.3 Test Procedure	3
3. INSTRUMENTATION	9
3.1 Measuring System	9
3.2 Measuring Points and Transducers	9
3.3 Data Acquisition and Data Reduction Procedure	9
4. TEST CONDITIONS AND TEST RESULTS	16
4.1 Test Conditions	16
4.2 General Results	18
4.3 Results of Each Run	20
4.4 Discussion	22
5. CONCLUDING REMARKS AND FUTURE WORK	92
ACKNOWLEDGEMENT	92
REFERENCES	93

1. まえがき

沸騰水型原子炉（B WR）の冷却材喪失事故（LOCA）に際して格納容器圧力抑制系に種々の過渡的熱水力現象が発生することが予想され、これらの現象の予測は事故時の格納容器健全性の評価のために重要である。

B WR 格納容器圧力抑制効果小型試験は、新型のB WR に使用されている Mark II 格納容器を対象として、LOCA 時に圧力抑制系に発生する熱水力現象に関する実験的研究を行うことを目的としている。より具体的には、Mark II 格納容器をリニア・スケールで $\frac{1}{6}$ に縮尺した試験部によって、プール・スウェル現象および圧力抑制プール中の蒸気凝縮とともになう圧力振動現象に関する試験を行い、縮尺の効果、ダウンカマの本数、放出流量等のパラメタが現象におよぼす影響について実験的知見を得、実炉における現象の予測に資することを目的とする。

なお、本試験で使用する試験装置（B WR 格納容器圧力抑制効果小型試験装置）は、昭和 51 年 12 月から 52 年 6 月にかけて、東京電力株式会社を代表出資者として実施された受託試験研究「B WR 格納容器 $\frac{1}{6}$ スケールの健全性に関する試験研究」のために製作され、昭和 52 年 8 月委託元から原研に譲渡されたものである。

本報では、昭和 52 年 1 月から 8 月にかけて実施した空気ブローダウンによるプール・スウェル試験 9 ランの結果を報告する。試験期間が上記の受託試験期間と重複することに示されるように、本報で報告する試験は、受託試験研究と並行して、または追補として行ったものであり、充分な検討を行うためには受託試験研究の結果とあわせて参照すべきものである。

本報では、まず試験装置本体および計測系の概要について述べ、次に試験条件および試験結果の概要、試験結果に関する定性的な考察の結果を報告する。

2. 試験装置と試験方法

2.1 試験装置の構成

試験装置のフロー・シートを Fig. 2.1 に示す。試験装置は、試験部である 2 基の模擬格納容器、蓄圧タンクおよび蒸気・空気配管等によって構成され、試験のための付加的設備として給排水ライン、掃気ライン、真空排気系を含む。

LOCA 時の一次冷却材の放出は、模擬格納器ドライウェル内に圧縮空気ないし加圧蒸気を放出することにより模擬する。プール・スウェル試験においては蓄圧タンクを空気ないし蒸気により加圧し、ラプチャディスクの破断によって放出を開始させる。圧縮空気源としては空気圧縮機（5 馬力、最高出口圧力 $8.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ ）および高圧窒素ボンベを使用し、蒸気源としては所内ボイラ（元圧 $5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 、最大供給量 10 ton/hr）を使用した。

2.2 模擬格納容器

本試験装置の試験部は、それぞれダウンカマ 5 本（模擬格納容器 I）および 1 本（模擬格納容器 II）を有する 2 基の模擬格納容器によって構成される。これらの断面図および詳細を Figs. 2.2 ~ 2.4 に示す。模擬格納容器は、1100 MWe 級 B WR 用 Mark II 格納容器を模擬したものであり、ウェットウェル部の寸法は実炉相当部分を $\frac{1}{6}$ に縮尺した値となっている。

格納容器 I は、肉厚 12 mm、内径 760 mm の円筒容器であり、5 本のダウンカマは Figs. 2.2, 2.3 に示すように対称に配置され、ダイアフラムフロアおよびブレイシングにより固定されている。

格納容器 II のウェットウェル部は、肉厚 9 mm、内径 340 mm の円筒容器（14B STPG 38, SCH 20）であり、Figs. 2.2, 2.4 に示すように、ダウンカマ 1 本をダイアフラムフロアおよびブレイシングにより固定した構造となっている。ウェットウェル断面積およびドライウェル容積は、格納容器 I のほぼ $\frac{1}{5}$ にとられている。

実炉との対応

Table 2.1 に実炉の格納容器諸元と模擬格納容器諸元との比較を示す。

まずドライウェルについては容積の模擬のみを考慮し、格納容器 I, II について、ダウンカマ 1 本あたりの容積を実炉のはば $\frac{1}{216}$ とした。

Fig. 2.5 に示すように、格納容器 I は、典型的な実炉においてダウンカマが最も密に配置されている部分の模擬を目的としている。ただし、ダウンカマの配置は対称とし、ピッチは実炉相当部分の平均的な値を模擬した。^{2) 3)} プール・スウェル現象の模擬において、プール断面積とダウンカマ総断面積の比は重要なパラメータであるが、Table 2.1 に示すように本試験装置における値が、典型的な実炉のプール全面に関する平均値より小さいのはこのためである。また試験結果相互の比較を容易にするため、格納容器 I, II の断面積比は等しくとられている。

ウェットウェル部の高さ方向の寸法は典型的な実炉の値を $\frac{1}{6}$ に縮尺したものである。

ダウンカマについては、厳密な縮尺は困難であるため 4 B, SCH 40 の鋼管を使用し、出口部

のみ肉厚 3 mm になるようにテーパーをほどこした。ダウンカマ入口部形状や入口高さについては実炉の模擬は考慮されていない。実炉のダウンカマは振れ止めを目的として相互にブレイシングにより機械的に結合されている。本試験装置は、プール・スウェル試験および蒸気凝縮試験に使用されるが、蒸気凝縮試験においてダウンカマの先端変位および曲げ歪からダウンカマへの水平荷重を評価するためには、ダウンカマの固有振動数が高いことが望ましく、ブレイシングによる固定が有効である。しかし、プール・スウェル試験に際しては、実炉のような構造では上昇水面とブレイシングとの干渉が予想され、本試験装置では、比較的高い位置に 1 個所のみブレイシングを設けた構造となっている。

模擬格納容器の支持

プール・スウェル現象あるいは蒸気凝縮現象によって格納容器壁面・底面には過渡的な圧力が加わるが、この圧力の振幅は、試験装置の機械的特性の影響を受ける可能性がある。本試験装置は ROSA 試験装置の放出ピット上に配置されており、Fig. 2.6 に示すように 2 基の模擬格納容器はそれぞれウェットウェル気相部で架台（200×200 H ビーム 2 本）に結合されている。このような構造から、上下モードあるいは転倒モードの振動に対する強度が不充分ではないかという疑念が生じたが、打撃試験の結果によれば振動の減衰は速やかであり、機械的共振等は認められなかった。なお、試験装置支持部については、78年3月までにより剛性を高めた構造に改造する予定である。

2.3 試験方法

本試験装置による試験は、試験方法により以下の 3 種のモードに分類される。

- 試験モード 1. 空気ブローダウン試験
- “ 2. 準定常蒸気凝縮試験
- “ 3. 蒸気ブローダウン試験

本報で報告する試験は、いずれも試験モード 1.、空気ブローダウンによるプール・スウェル試験である。

本試験モードでは、事故時の冷却材放出によるドライウェル圧力上昇をドライウェル内への空気の放出によって模擬し、圧力上昇速度の制御は破断装置下流のオリフィス (Fig. 2.1 OR-1, OR-2) によって行った。

試験は、GE 社の Moody によるスケーリング理論⁴⁾に基いて行った。この理論によれば、試験に先立って試験部圧力を $\frac{1}{6}$ 気圧まで減圧する必要があり、真空ポンプによる排気を行い、水銀マノメータによる初期圧力の設定を行った。

圧力抑制プール初期水位の設定には連通管式のゲージを使用した。

今回の試験はすべてドライウェルとウェットウェルの初期圧力が等しい条件で行ったため、均圧弁は試験開始の直前に閉鎖した。

試験に先立って蓄圧タンクを空気圧縮機により $8.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ まで加圧し、その後高圧窒素ボンベによって $9.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ まで加圧した。放出は制御室から操作される破断装置の動作によって開始し、AV-1 の閉鎖によって停止した。

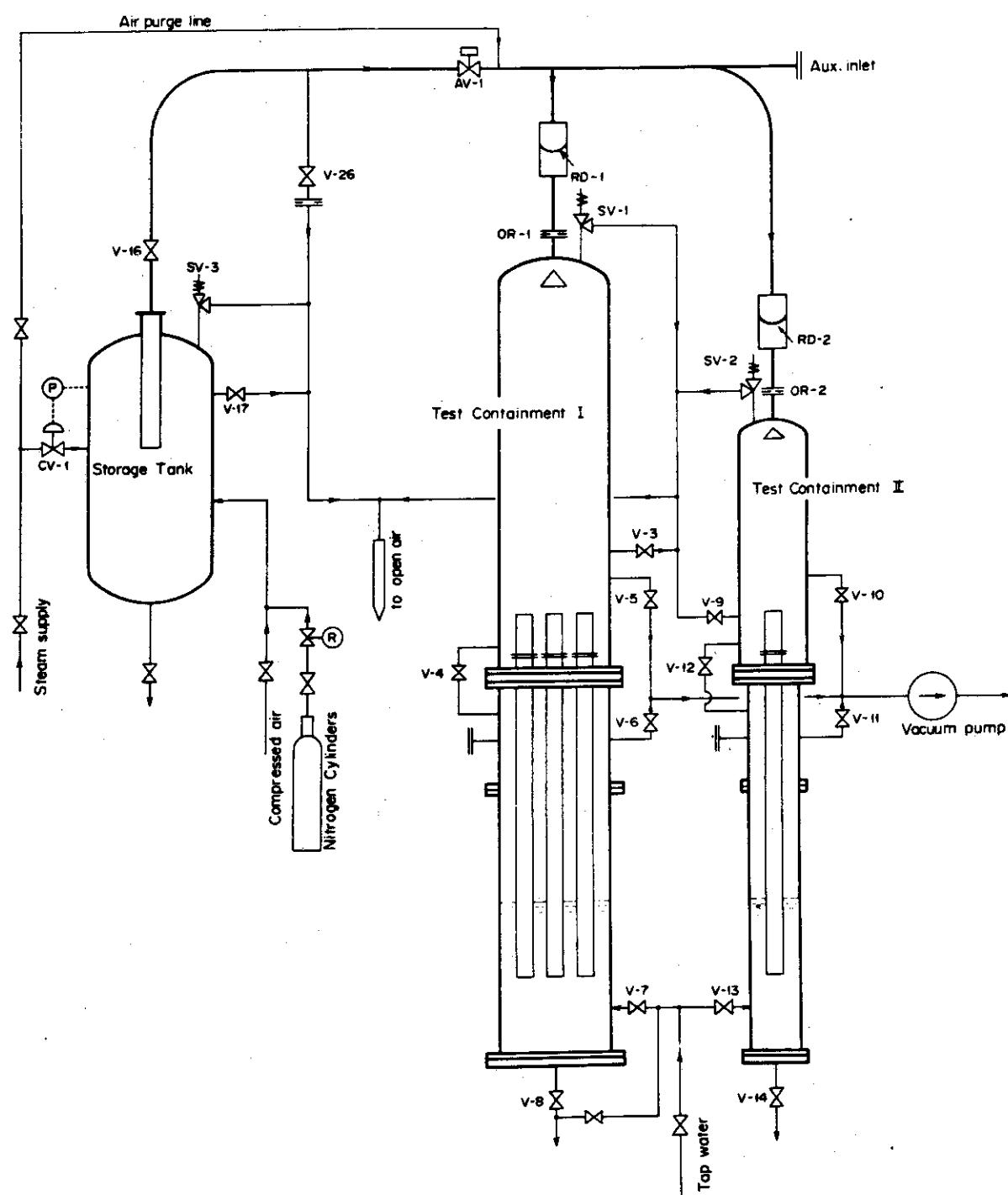


Fig. 2.1 Flow diagram of test facility

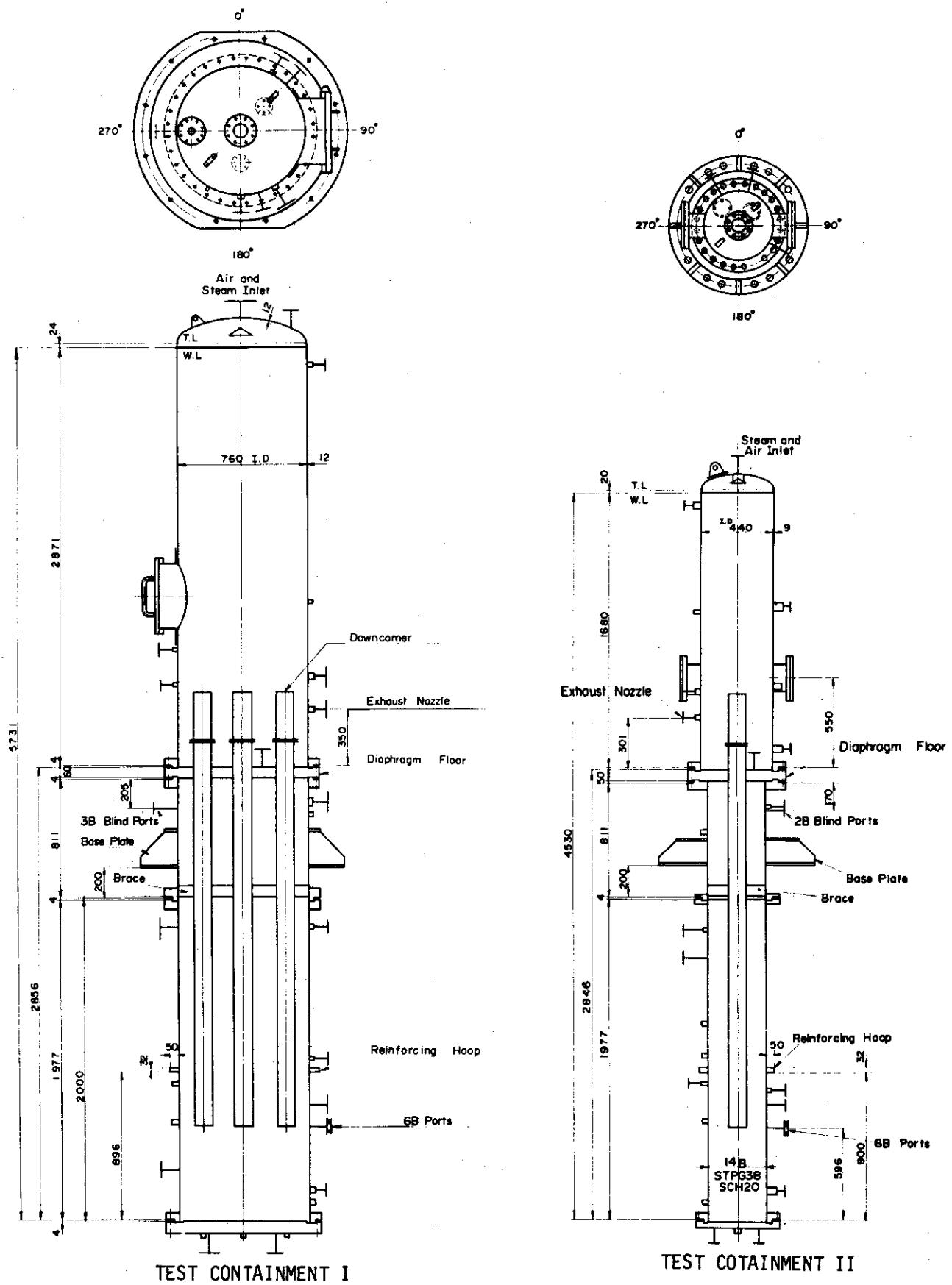


Fig. 2.2 Cross-sectional view of test containments

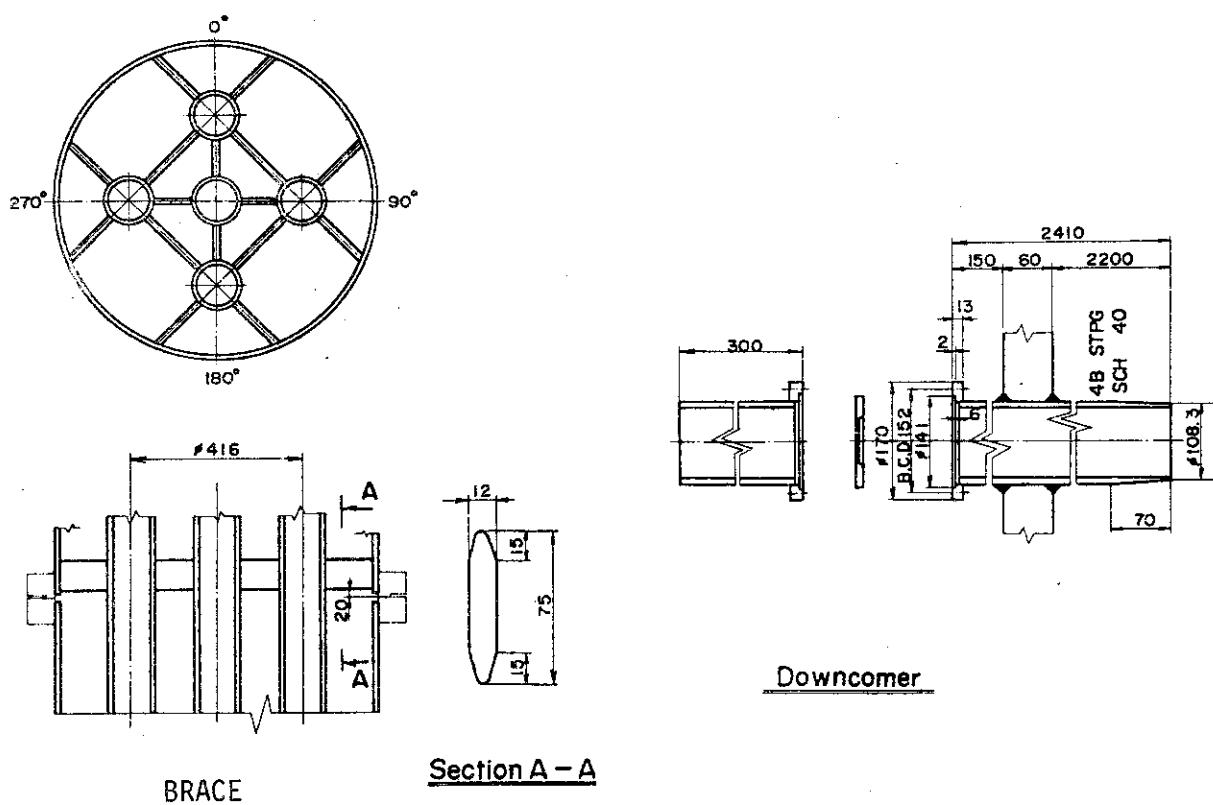


Fig. 2.3 Test containment I detailes

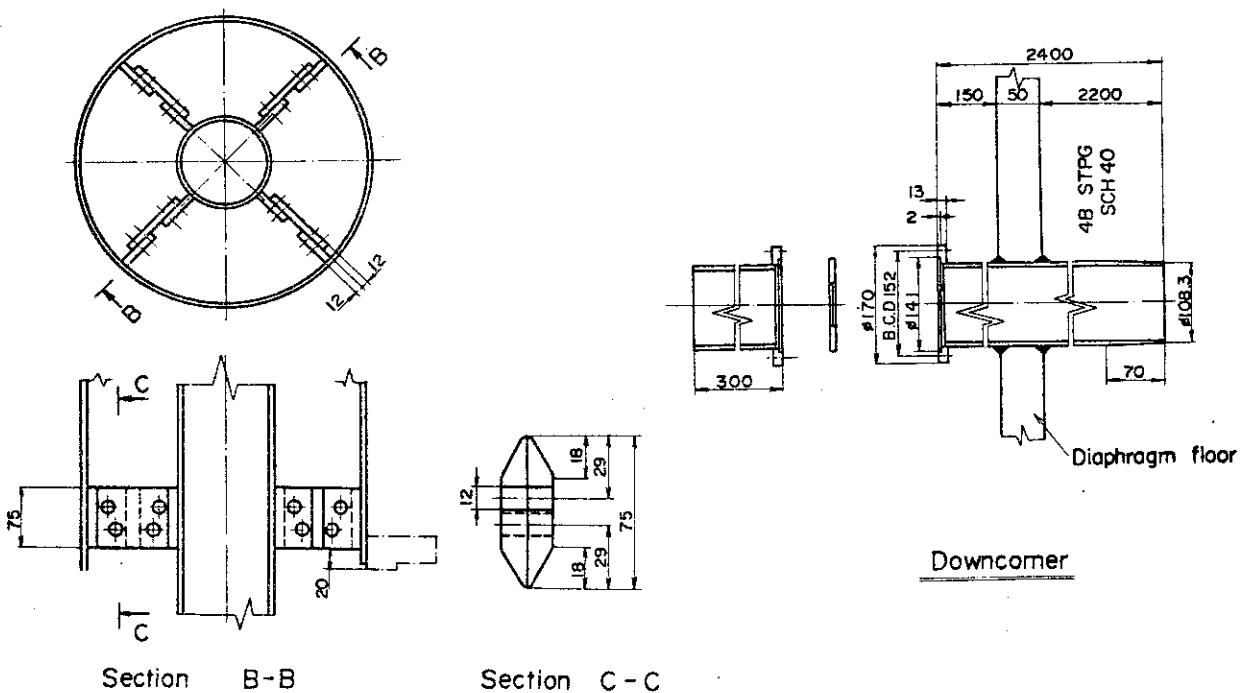


Fig. 2.4 Test containment II detailes

Table 2.1 Comparison table of containment major parameters.

Parameter	Typical 1100 MWe Mark II	JAERI 1/6-scale test facility	
		Test containment I	Test containment II
<u>Volumes</u>			
Drywell (m ³)	5400	1.25	0.25
Wetwell air (m ³)	4100	0.62 - 0.71	0.12 - 0.14
Wetwell water (m ³)	3400	0.48 - 0.58	0.096-0.116
<u>Downcomer</u>			
Number (-)	108	5	1
Diameter (m)	0.59	0.1023	0.1023
Submergence (m)	3.4	0.45 - 0.675	0.45 - 0.675
Clearance, downcomer to pool bottom (m)	3.0	0.50	0.50
<u>Ratios</u>			
Net pool area / vent area (-)	13.4	9.8	9.8
Drywell vol. / vent area (m)	171	30.4	30.4

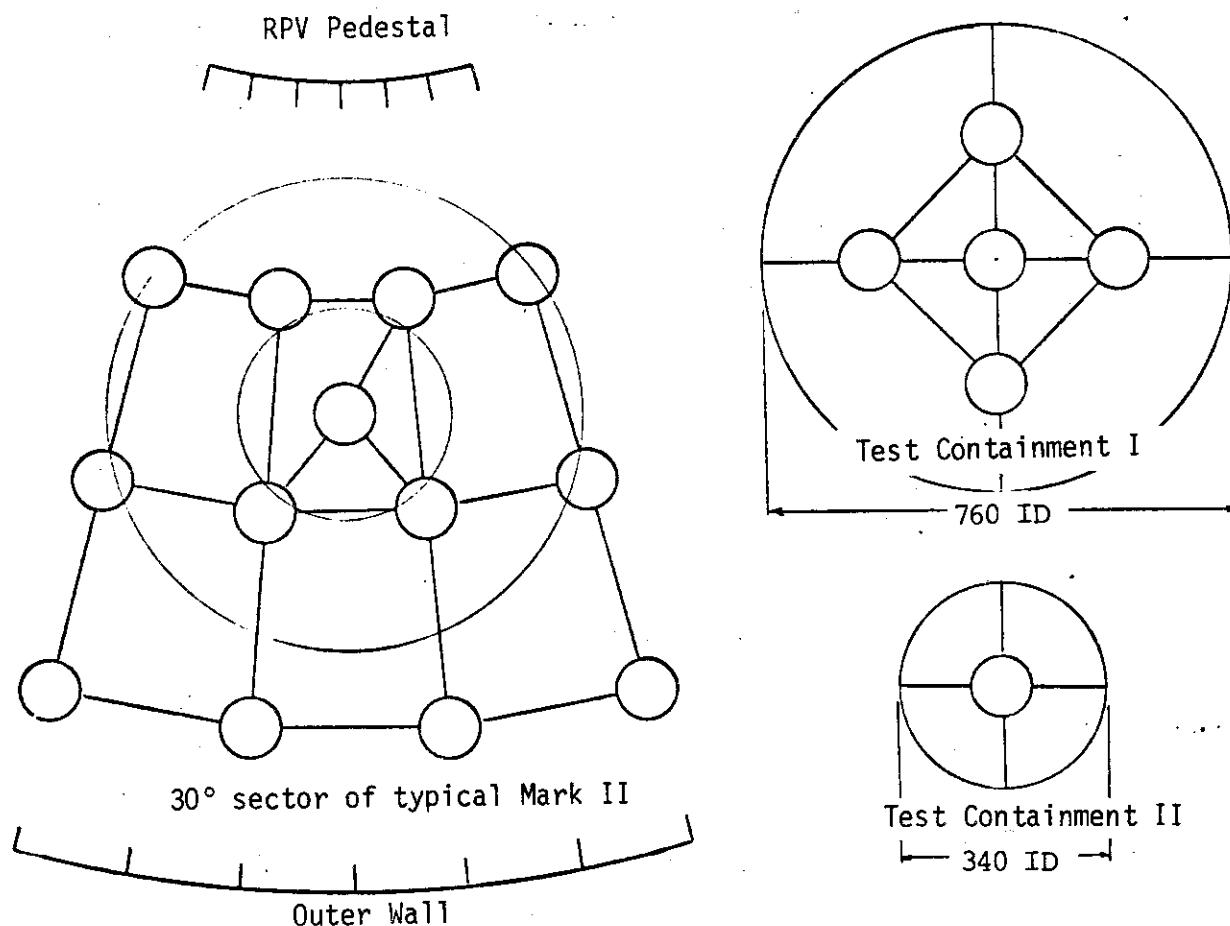


Fig. 2.5 Downcomer arrangement in a typical Mark II containment and 1/6-scale test containments

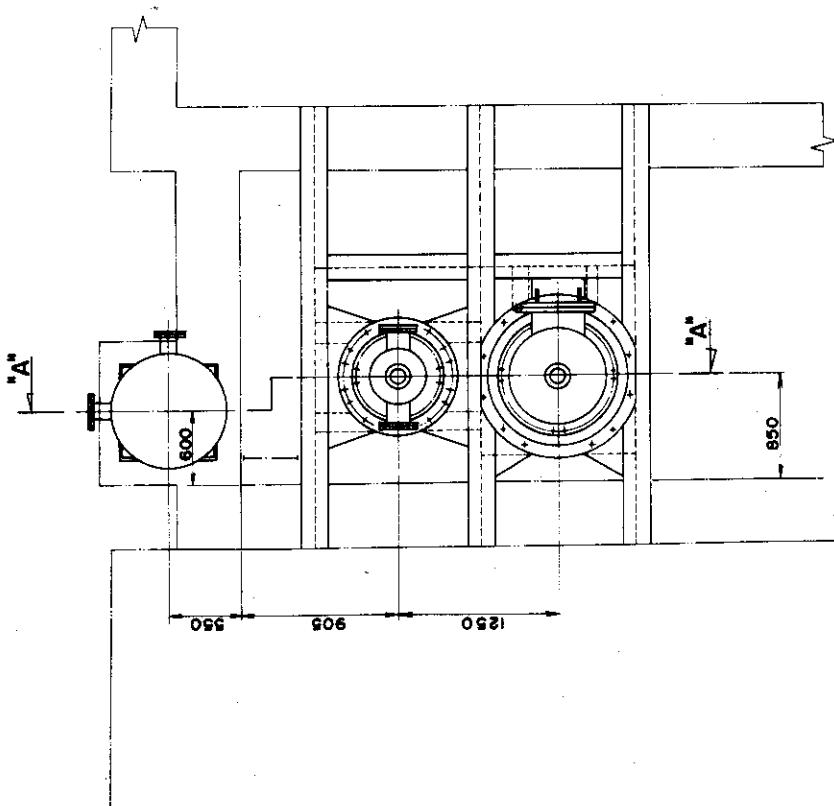
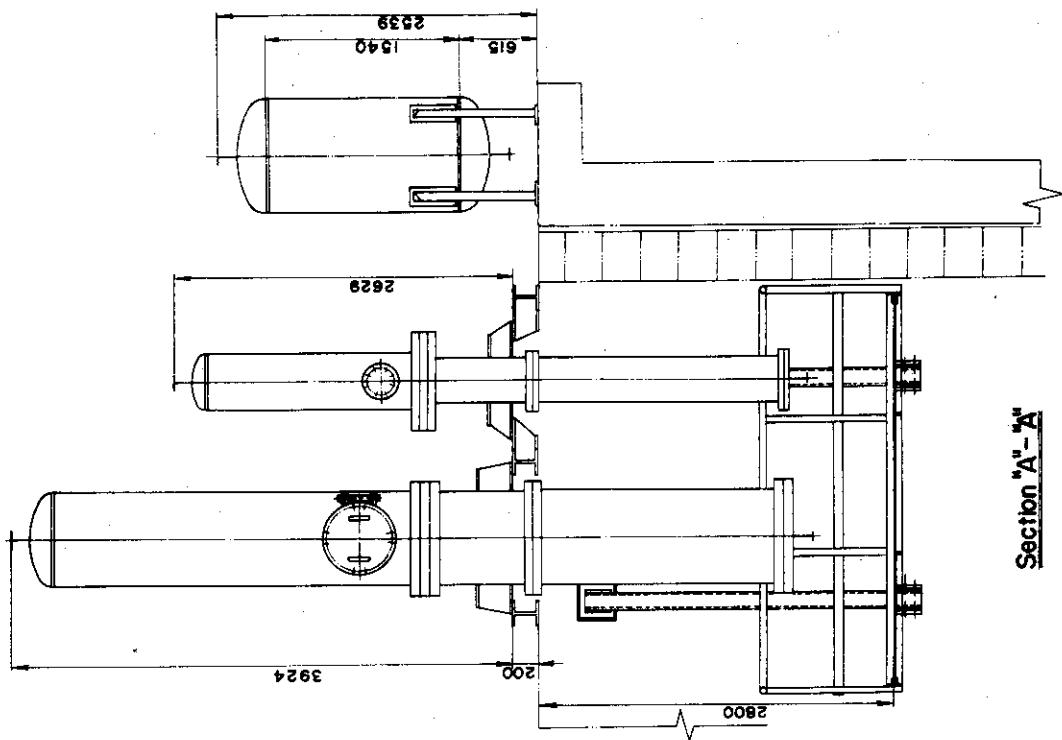


Fig 2.6 Layout of test facility

3. 計測系

3.1 構成

本試験装置の計測チャンネルの一覧表を Table 3.1 に示す。本試験装置では圧力、温度、歪、変位、水位の計測を行い、それぞれの計測器出力をデジタル・データ集録装置により磁気テープに記録し、大型計算機による処理を行った。

3.2 計測点および計測器

模擬格納容器 I, II における圧力、水位の計測点を Figs. 3.1 ~ 3.4 に示す。温度、歪、変位に関しては、本報で報告するプール・スウェル試験では重要でないので計測点位置の表示を省略する。

計測器の型式、仕様については概要を Table 3.1 に示す。

圧力計測系

圧力は歪ゲージ式圧力変換器により計測した。使用した圧力変換器の容量は、プール・スウェル試験のためにはやや過大である。圧力変換器に関しては、測定流体温度の変化による零点移動、感度変化、感度の経時変化等の問題を生じたが、本報に示すプール・スウェル試験結果については測定部の温度変化が少ないためにほぼ問題は無いと考えられる。

同一の変換器により蓄圧タンクの圧力を計測した。

温度計測系

応答速度を高める目的で、接地型熱電対を採用した。蓄圧タンクおよび放出配管内についても計測を行った。

歪・変位計測系

ダウントンカマへの水平荷重の評価を目的として、ダウントンカマ先端部の歪・および支持部の歪の計測を行った。

水位計測系

電気抵抗式水位計（触針型）による計測を行った。電極はポリイミド樹脂被ふく銅線であり、直流電圧が印加されている。

3.3 データ集録装置およびデータ処理

データ集録装置としては、デジタル・データ集録装置 DATAC-2000B（岩崎通信機製）を使用した。マルチプレクサ 100 チャンネルを使用し、サンプリング周波数は 30kHz（1 チャンネルあたり 300Hz）固定とした。

データ集録装置により作成したデータ・テープを原研計算センターの FACOM 230-75 によりオフライン処理を行った。試験結果の作図には COM (Computer Output Microfilm) システムを使用した。

Table 3.1 List of data channels

Ch. No.	Item	Symbol	Meas. in Test Containment-		Measuring Point	Remarks
			I	II		
1	Pressure	P1	X	X	Drywell	See Notes 1,2
2	"	P2	X	X	Wetwell Airspace	See Note 1
3	"	P3		X	Downcomer (Center)	"
4	"	P4	X		Downcomer (270°)	"
5	"	P5	X		Downcomer (90°)	"
6	"	P6	X	X	Pool	"
7	"	P7	X	X	Pool	"
8	"	P8	X	X	Pool	"
9	"	P9	X	X	Pool	"
10	"	P10	X	X	Bottom	"
11	"	P11	X		Bottom	"
12	"	P12	X		Bottom	"
13	"	P13	X	X	Wetwell Airspace	See Notes 1,2
14	"	P15	X	X	Storage Tank	"
15	Water Level	LCON			Wetwell Airspace	See Note 3
16	Temperature	T1	X	X	Drywell	See Note 4
17	"	T2	X	X	Wetwell Airspace	"
18	"	T3	X	X	Downcomer	"
19	"	T4	X	X	Downcomer	"
20	"	T5	X	X	Downcomer/Pool	"
21	"	T6	X	X	Pool	"
22	"	T7	X	X	Pool	"
23	"	T8	X	X	Shell Outside	"
24	"	T9	X	X	Pool	"
25	"	T10	X	X	Bottom	"
26	Strain	E11	X	X	Downcomer (Center)	See Note 5
27	"	E12	X	X	"	"
28	"	E21	X		Downcomer (90°)	"
29	"	E22	X		"	"
30	"	E31	X		Downcomer (270°)	"
31	"	E32	X		"	"
32	Displacement	D11	X	X (D12)	Downcomer (Center)	See Note 6
33	"	D12	X	X (D11)	"	"
34	"	D21	X		Downcomer (90°)	"
35	"	D22	X		"	"
36	"	D31	X		Downcomer (270°)	"
37	"	D32	X		"	"
38	Water Level	LA1	X	X	Pool	See Note 7
39	"	LA2	X	X	"	"
40	"	LA3	X	X	"	"
41	"	LA4	X	X	"	"
42	"	LA5	X	X	"	"
43	"	LA6	X	X	"	"
44	"	LA7	X	X	"	"
45	"	LA8	X	X	"	"
46	"	LA9	X	X	"	"
47	"	LA10	X	X	"	"
48	"	LA11	X	X	"	"
49	"	LA12	X	X	"	"
50	"					

Table 3.1 (Continued)

Ch. No.	Item	Symbol	Meas. in Test Containment-	Measuring Point	Remarks
			I II		
51	Water Level	LA13	X	Pool	See Note 7
52	"	LA14	X	"	"
53	Water Level	LB1	X X	"	See Note 7
54	"	LB2	X X	"	"
55	"	LB3	X X	"	"
56	"	LB4	X X	"	"
57	"	LB5	X X	"	"
58	"	LB6	X X	"	"
59	"	LB7	X X	"	"
60	"	LB8	X X	"	"
61	"	LB9	X X	"	"
62	"	LB10	X X	"	"
63	"	LB11	X X	"	"
64	"	LB12	X X	"	"
65	"	LB13	X X	"	"
66	"	LB14	X	"	"
67	"	LB15	X	"	"
68	Water Level	LC1	X	Wetwell Airspace	See Note 7
69	"	LC2	X	"	"
70	"	LC3	X	"	"
71	"	LC4	X	"	"
72	"	LC5	X	"	"
73	"	LC6	X	"	"
74	Water Level	LVA1	X X	Downcomer (Center)	See Note 7
75	"	LVA2	X X	"	"
76	"	LVA3	X X	"	"
77	"	LVA4	X X	"	"
78	"	LVA5	X X	"	"
79	Water Level	LVB1	X	Downcomer (90°)	See Note 7
80	"	LVB2	X	"	"
81	"	LVB3	X	"	"
82	"	LVB4	X	"	"
83	"	LVB5	X	"	"
84	Water Level	LVC1	X	Downcomer (270°)	See Note 7
85	"	LVC2	X	"	"
86	"	LVC3	X	"	"
87	"	LVC4	X	"	"
88	"	LVC5	X	"	"
89	Control Sig.	S-1	X X	Rupture Disc	
90	"	S-2	X X	Manual Switch	
91	Aux. Ch.				
92	"				
93	"				
94	Temperature	T13	X X	Storage Tank	
95	"	T14	X X	Inside Piping	

- Notes
1. Strain gage type, Shinkoh PR-10S, range: -1 - 10 kg/cm²abs.
 2. Thermally isolated with pressure tube.
 3. Electrostatic type, measurement failed.
 4. 0.5 mm o.d. CA thermocouple, sheathed and grounded.
 5. Ailtech SG-125-65 strain gages.
 6. Variable reluctance type, Shinkoh IDS+5mm.
 7. Conductivity type, DC loaded.

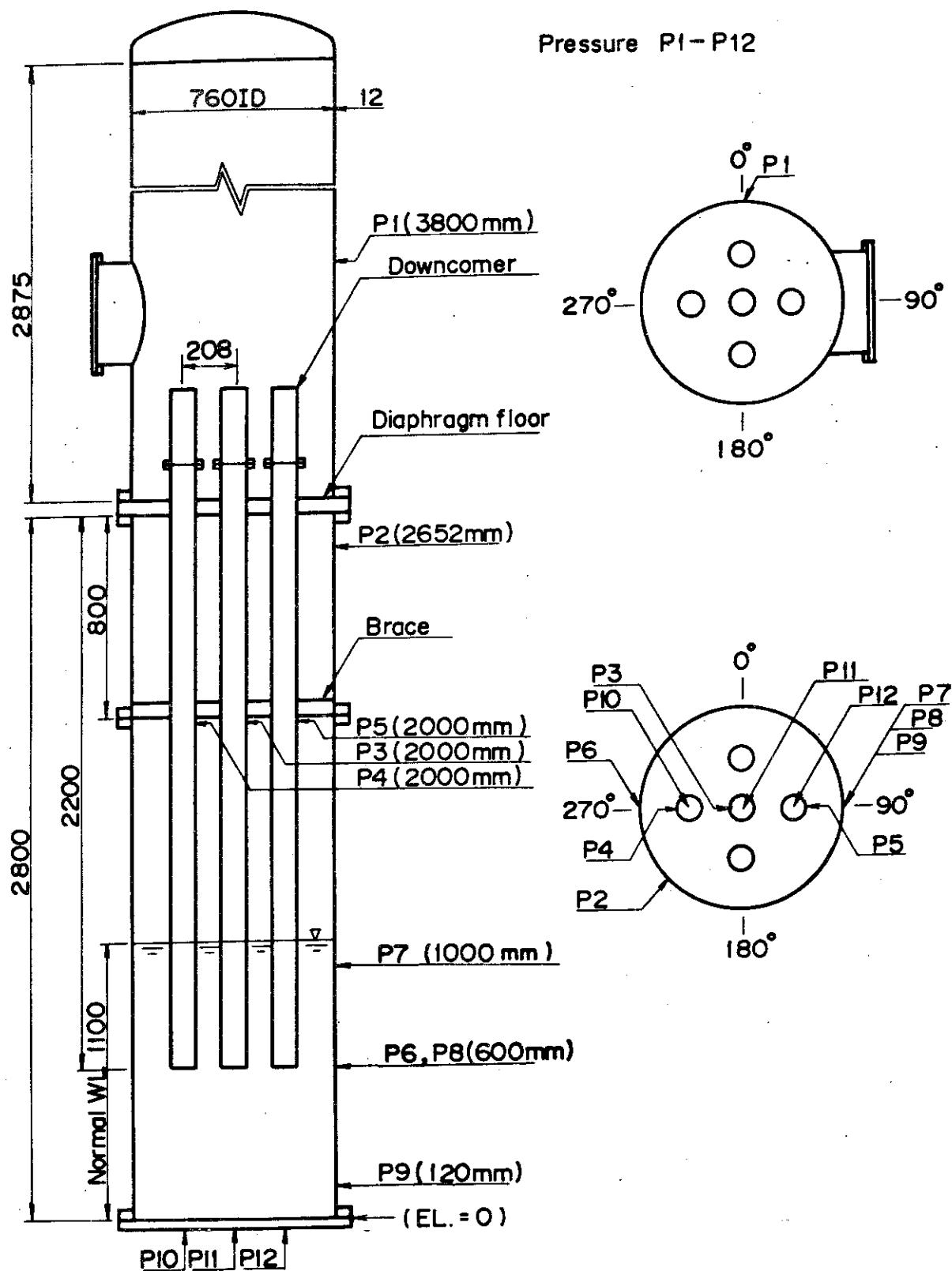


Fig. 3.1 Pressure measuring points in Test Containment I

Pressure P1 - P10

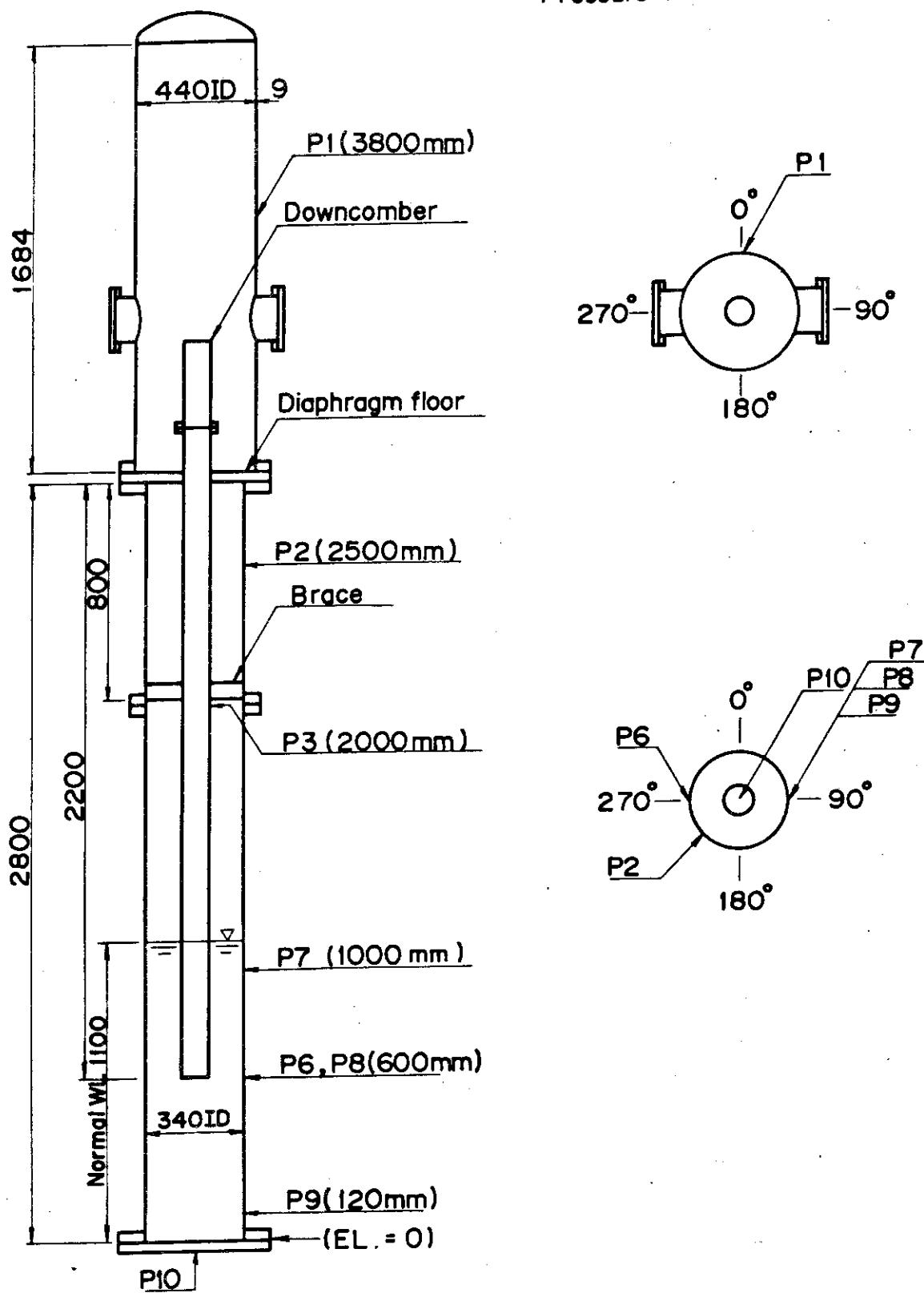


Fig. 3.2 Pressure measuring points in Test Containment II

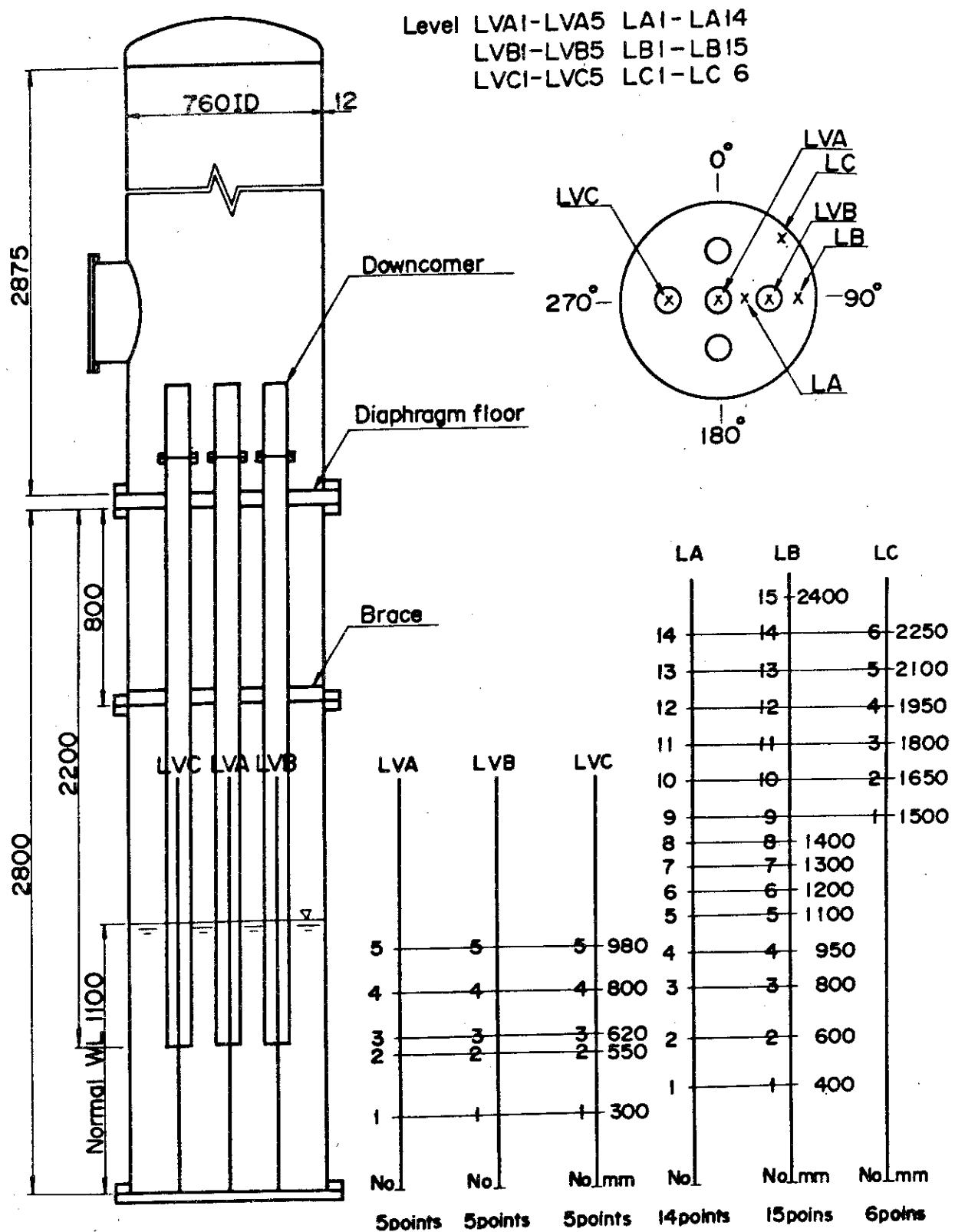


Fig. 3.3 Water level measuring points in Test Containment I

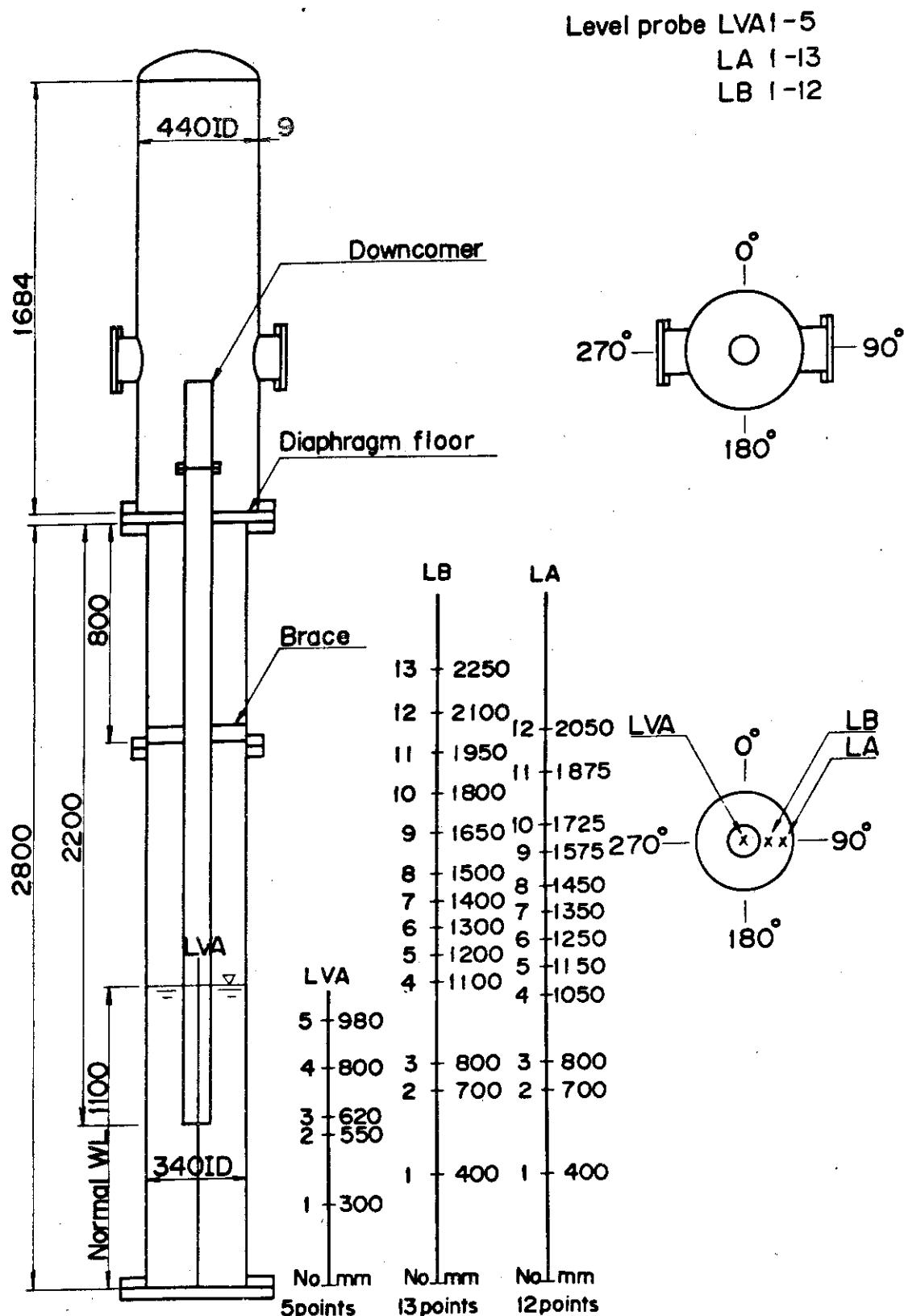


Fig. 3.4 Water level measuring points in Test Containment II

4. 試験条件および試験結果

4.1 試験条件

本報では計9ケースのプール・スウェル試験について報告する。すでに述べたように、本報で報告する試験結果は、昭和51年12月から52年6月にかけて実施した受託試験研究と並行して、あるいは追補として実施した試験の結果である。

本報で報告する試験では、いずれも圧縮空気を模擬格納容器 ドライウェル内に放出することによって、実炉の1次系冷却材放出を模擬している。試験パラメータとしては、放出流量、ダウンカマ本数、ダウンカマ初期浸水深さ、ダウンカマ流動抵抗、格納容器初期圧力などをとった。

4.1.1 プール・スウェル現象のスケーリング

プール・スウェル現象の模型図を Fig. 4.1 に示す。

本試験で使用したような縮小規模の試験部によってプール・スウェル現象の模擬を行うためには、現象のスケーリングに関する考慮が必要である。本試験では、従来の縮小規模試験装置による Mark I, Mark II 格納容器に関するプール・スウェル試験と同様に、GE 社の F. J. Moody⁴⁾によるスケーリング理論に基く実験方法をとった。

Moody の理論は、プール・スウェル現象のやや巨視的な考察に基いて、実炉と縮小規模の試験部において現象の相似性が成立するために必要な関係を導いたものであり、結果を Table 4.1 に引用する。この理論では、現象に対する粘性、熱伝導、表面張力、ベント系内の気体の流動に対する圧縮性の効果等は無視されている。表面張力および粘性の効果が無視されていることから、この理論の適用範囲は、プール・スウェルの末期を除く、いわゆるバルク・スウェルの期間にかぎられる。Table 4.1 中、式(1)から(3)は、水力学上の無次元数であるストロハル数、フルード数、ローク数を実炉と試験部に関して等しくとることと等価である。(ただし作動流体は同一とし、代表速度=液相速度、代表長さ=ダウンカマ浸水深さないし径、とする。)式(4)は、ベント系を通じて圧力抑制プール中に流入するエンタルピ流量に関する関係であり、プール中の気泡のエネルギー・バランスすなわち気泡圧力を支配する。ここで、気泡のエネルギー・バランスに対する(気泡から液相への)熱伝達の影響が無視されていることに注意する必要がある。

Moody の結論によれば、プール・スウェル現象の模擬のためにはベント系のエンタルピ流量を式(4)に従ってスケールする必要があるが、实际上エンタルピ流量を直接制御することは困難であり、かつスケールすべき実炉の条件 자체が確定していない。このため従来の研究では、スケーリングの対象をドライウェルにまで拡張し、ドライウェルの圧力変化が式(1), (3)を満足するよう初期圧力および放出流量を設定し、さらにベント系に加わる差圧が式(1)を満足するときベント系の体積流量が式(2)を満足するようにベント系流動抵抗を調節するという方法がとられている。ここで、このような方法によって式(4)の関係が満たされるためには、ドライウェル内気体の温度が実炉と同等となる必要があるが、実際にはこのような模擬を行うことは困難である。ただし、現実には気泡のエネルギー・バランスに対してプール水への熱伝達の効果が顕著であると予想される

ため、上述のようなベント系体積流量のスケーリングという方法によって現象のスケーリングを行うことはほぼ妥当であると考えられる。本報で報告する試験においても体積流量のスケーリングという考え方をとり、ドライウェルの初期温度および温度変化については特に考慮をはられなかった。

4.1.2 試験条件とその根拠

試験条件の一覧表を Table 4.2 に示す。なお、表中の Runs 105, 109, 112, 113, 151, 152, 154, 156 は受託試験研究として実施したものである。

格納容器初期圧力および差圧

前項で引用した Moody の理論に従い、格納容器初期圧力に関しては実炉の $\frac{1}{6}$ 、すなわち約 $\frac{1}{6}$ 気圧の条件を標準とした。ただし、Run 165は、ウェットウェル気相部を大気に開放し、プール・スウェル現象に対する気相部圧縮の効果を減少させた試験であり、格納容器初期圧力は大気圧に等しい。

本報で報告する試験では、いずれも格納容器 ドライウェルとウェットウェルの初期圧力は等しくとられている。

格納容器温度

格納容器温度の制御は行わなかったため、Table 4.2 に示すように初期温度はかなり広い範囲で変化している。試験開始前の気相部温度とプール水温はほぼ等しい値を示した。

放出流量

放出流量は蓄圧タンク圧力および放出オリフィス径によって制御した。4.1.1 で述べたように、プール・スウェル現象の模擬のためには、ドライウェル圧力変化を適切に模擬することが必要である。

本試験では、プール・スウェル現象の保守的評価を目的として、実炉の安全性評価を目的として計算された格納容器圧力変化の評価値を Moody の理論によりスケールした条件を標準的な試験条件とした。Fig. 4.2, 4.3 は格納容器の設計基準事故 (DBA) である再循環配管両端破断および主蒸気管両端破断事故についての計算例である。⁵⁾ 本例は、典型的な 1100 MWe 級 Mark II 格納容器を対象として、現行の評価モデルを模擬した計算コードによって計算したものである。なお、本試験では、現行の評価モデルではプール・スウェル現象が格納容器圧力変化における影響が考慮されていないこと、および放出流体の相違を考慮し、放出開始からベント・クリアリングまでのドライウェル圧力上昇を模擬することに主眼をおいた。ただし、プール・スウェル現象の模擬のためには、ベント・クリアリング以後の格納容器圧力変化が重要であり、実炉における圧力変化の再評価を含めてこの点に関する検討がなお必要である。

本報で報告する試験に関しては、実炉の再循環配管破断時の評価値 (Fig. 4.2) を式(1), (3) に従ってスケールした値であるドライウェル圧力上昇率 $0.7 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ (実炉における圧力上昇率 $171 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ に相当) を標準値とした。なお、ドライウェル圧力上昇率は、蓄圧タンク・格納容器の初期温度等の影響を受け、若干のばらつきを生ずる。また、Run 162, 164 ではやや小さめのドライウェル圧力上昇率の実現を意図した。

ダウンカマ本数

ダウンカマ本数がプール・スウェル現象におよぼす影響を調べ、これにより実炉における現象

の予測に資することが、本試験の目的の一つであり、このため格納容器 I, II のダウンカマ 1 本あたりの各部容積、プール断面積を等しくとり、相互の比較を容易にした。また Run 161, Run 164 では格納容器 I のダウンカマの一部を入口で閉鎖することによりプール面積とダウンカマ断面積の比を変化させ、現象に対する影響を調べた。

ダウンカマ初期浸水深さ

本試験ではダウンカマ初期浸水深さは 0.55 m (実炉における 3.3 m に相当) を標準値とし、Run 106, 111, 153 では、実炉の変化範囲を考慮して標準値の前後の値をとった。

ベント系流動抵抗

4.1.1 で述べた理由によって、本試験においても従来の研究と同様に、ベント系の気体体積流量を Table 4.1 式(2)に従ってスケールするという方法をとった。ベント系に加わる差圧が式(1), (3)に従ってスケールされていると仮定すると、体積流量のスケーリングのためには、ベント系の寸法を幾何学的にスケールするのみでは不充分であり、流動抵抗をさらに増大させる必要がある。本試験では、プール・スウェル期間の大半ではベント系の流動は非圧縮性流れとして近似できるものと考え、ベント系に Figs. 2.3, 2.4 に示すオリフィスを付加することにより流動抵抗を増大させた。Mark II 格納容器におけるベント系損失係数は約 2.5 (出口損失係数 1.0 を含む) と評価されており、 $1/6$ 規模試験部において体積流量をスケールするためにはベント系損失係数が $2.5 \times 6 = 15.0$ となることが必要である。本試験ではオリフィス径 65.0 mm の場合を標準としており、この場合のベント系損失係数は、(文献⁶⁾による数値の相違、およびオリフィス上流の直管部の長さが短いことを考慮すると) 12 ~ 16 の範囲にあると考えられる。Run 114 では、本試験装置のベント系損失係数の正確な値が不明であることを考慮し、ベント系流動抵抗の感度解析を目的として損失係数をより増大させた条件で試験を行った。この場合のベント系損失係数は約 32 と評価される。Run 165 では初期圧力を大気圧としたためオリフィスによる流動抵抗の付加は行わなかった。この場合のベント系損失係数は約 1.8 ~ 2.0 と評価される。

4.2 試験結果の概要

試験結果を Fig.4.4 以後に示す。以下にこれらの結果に共通する一般的な傾向を記す。

4.2.1 蓄圧タンク圧力・温度変化

本報で報告する試験では、蓄圧タンクを空気および窒素によって加圧し、ラプチャ・ディスクの破断により放出を開始するという方法を取った。Fig. 4.4 は蓄圧タンクの圧力変化の例であるが、試験中の圧力変化は小さく、放出流量はほぼ一定とみなすことができる。蓄圧タンクの温度変化に関しては熱電対の応答速度が充分でなく、有意な変化は検出されなかった。

4.2.2 格納容器圧力変化

ドライ・ウェル

Fig.4.5 に格納容器圧力変化の例を示す。(本例は受託試験結果¹⁾から引用したものであり、格納容器 II による標準的な試験例である。) 図中の破線は、Fig.4.2 に示した典型的な実炉における再循環配管両端破断時のドライ・ウェル圧力変化を Table 4.1 の式(1), (3)によってスケールした値である。

本例では、放出開始後約0.32秒でベント・クリアリングが生じているが、この時点まではドライウェル圧力はほぼ直線的に上昇する。本報で報告する試験における圧力上昇率（クリアリング期間の平均的な値）をTable 4.2中に示す。ここで放出オリフィス径および蓄圧タンク初期圧力が同一であってもドライウェル圧力上昇率にばらつきがあるのは、蓄圧タンク初期温度、格納容器初期圧力・温度、ダウンカマ浸水深さによるドライウェル容積の変化等の影響であると考えられる。

ベント・クリアリングが終了するとドライウェル圧力はほぼ一定となり、プール水面のブレーク・スルーによってプール・スウェルが終了すると、再度上昇を開始する。Fig. 4.5に示すように、ベント・クリアリング以後のドライウェル圧力変化は目標値と一致しない。この原因は、先に述べたような評価モデルの問題と、放出流体の相違によるものである。

ウェットウェル気相部圧力

Fig.4.5の例に示すように、ウェットウェル気相部圧力はベント・クリアリングまではほぼ初期圧力のままであるが、ダウンカマ内の水柱の排除による水面上昇のため若干の圧力上昇がみとめられる。クリアリング以後、プール水面上昇による気相部容積の減少のために、気相部圧力は顕著な上昇を生じ、標準的な試験条件の下ではドライウェル圧力を一時的に上まわる。

プール壁面圧力

例えばFig. 4.7にみられるように、クリアリングの直後、プール壁面・底面の圧力は急速に上昇し、プール内に気泡が形成される結果、ダウンカマ出口レベルの壁面圧力（P₆, P₈）はダウンカマ内圧力に近づく。底面およびその近傍の圧力（P₉—P₁₂）には、クリアリングの直後に過渡的なピークが発生する。プール壁面上の圧力（P₆—P₈）の相互の関係を考察することにより、プール内の気泡の様子を推測することができる。

4.2.3 格納容器温度変化

格納容器各部の温度は外径0.5mmの熱電対により計測したが、試験中の温度変化を計測するには素子の応答速度が不充分であった。従って本報では各部の初期温度を示すにとどめる。

4.2.4 格納容器水位変化

例えばFig. 4.9にみられるように、ダウンカマ内に配置された水位計の出力によって、ドライウェルの圧力上昇とともにダウンカマ内水位の低下が観察できる。ベント・クリアリング後、気泡はダウンカマ出口より下位の検出器まで到達する。

プール内に配置された水位計の出力（例えばFig. 4.8）によってプール内に気泡が形成され成長する様子が観察できる。同時に、プール上方の水位計の出力によってプール水面の上昇が観察できる。プール・スウェルの末期では水位計信号は複雑になり、プール水面付近の状態を判断することが難しくなる。

各試験に関する計測器成績表（Table 4.3）に示すように、本試験で使用した水位計は、絶縁不良による誤信号を発生する場合があった。また液相の到達が的確に検出されるのに対して、気相の検出に関しては若干の時間遅れを生ずる傾向があった。プール内の気泡界面が必ずしも明瞭に検出されない原因としては、気泡表面が不定形であることと共に、水位計検出器の位置およ

び構造にも問題が残されていると考えられる。

4.2.5 ダウンカマの変位および曲げ歪

ダウンカマへの水平荷重の評価を目的として、ダウンカマ先端の変位および支持部の歪の計測を行ったが、プール・スウェル試験に関してはいずれも出力が微小であったため、本報では結果の表示を省略する。典型的な試験条件において、ダウンカマ先端の変化は 0.1mm 以下、歪は 10^{-5} 以下であった。

4.3 各ランの試験結果

Run 106 から Run 114 までは模擬格納容器Ⅱ（ダウンカマ 1 本）、Run 153 から Run 165 までは模擬格納容器Ⅰ（ダウンカマ 5 本）による試験である。Table 4.2 に試験条件を、Table 4.3 に各ランにおける計測器（圧力および水位のみ）の状態を示す。

Run 106 の試験条件および試験結果

Run 106 は、ダウンカマ初期浸水深さが標準値より大きい場合であり、他の条件はほぼ標準的である。

試験結果を Figs. 4.6 ~ 4.9 に示す。

Run 111 の試験条件および試験結果

Run 111 は、ダウンカマ初期浸水深さが標準値より小さい場合であり、Run 106 および基準ケースである Run 105¹⁾との比較によって初期浸水深さの効果を調べることを目的としている。

試験結果を Figs. 4.10 ~ 4.13 に示す。

Run 114 の試験条件および試験結果

4.1.2 で述べたように Run 114 ではベント系流動抵抗を増大させており、プール・スウェル現象の模擬におけるベント系流動抵抗のスケーリングの精度の影響を調べることを目的としている。文献⁶⁾によれば、本ランにおけるベント系損失係数は約 3.2 と評価され、これは標準的な条件の約 2 倍である。ドライウェル圧力上昇率およびダウンカマ初期浸水深さについては標準的な条件をとった。

試験結果を Figs. 4.14 ~ 4.17 に示す。ダウンカマ内圧力を計測する圧力変換器はダウンカマ内の流れのため温度ドリフトを生じやすく、必ずしも信頼性が高くないため、ベント系圧力損失の評価のためには、ドライウェル圧力とプール内の気泡圧力（P₆, P₈）の差を見る方がより確実である。Run 114 の場合 P₆ と P₂ の差は 0.6 秒付近で約 0.07 kg/cm² の最大値をとるが、この値は Runs 105, 106, 111 における 0.05 ~ 0.06 kg/cm² に対して特に大きな値ではない。¹⁾ 同様にプール水位変化に関しても Run 105¹⁾ に比して顕著な相違は認められない。従って本例の結果によれば、ベント系流動抵抗のスケーリングの精度は、試験結果に重大な影響は与えないものと考えられる。

Run 153 の試験条件および試験結果

Run 153 は、ダウンカマ初期浸水深さを標準値より大きくとった場合であり、格納容器Ⅱによる Run 106 と対応するが、ドライウェル圧力上昇率がやや大きい。

試験結果を Figs. 4.18 ~ 4.22 に示す。

Run 160 の試験条件および試験結果

ドライウェル圧力上昇率がやや小さい以外は標準的な条件による試験である。

試験結果を Figs. 423~427 に示す。

Run 161 の試験条件および試験結果

Run 161では、やや極端な条件として、5本のダウンカマのうち中央の1本を除く4本を閉鎖しており、プール断面積とダウンカマ流路断面積の比を変化させたことによる効果を調べることを目的としている。

試験結果を Figs. 428~431 に示す。ダウンカマを閉鎖した結果プール面積とダウンカマ断面積の比は約 49.0 という大きな値となった。同様に、ダウンカマ 1 本あたりのドライウェル容積も標準値（約 0.25 m^3 ）の 5 倍となり、Figs. 428 に示すようにドライウェル圧力はベント・クリアリングの後も上昇を続け、他のランとは異った傾向を示す。また、ダウンカマ 1 本あたりのプール面積を増大させた結果、Fig. 430 に示すようにプール水位上昇速度が他のランより著しく低く、この結果 Fig. 428 に示すようにウェットウェル気相部の圧力上昇も少い。プール水位には 4.4.5 で述べるように顕著な不均一がみとめられる。

Run 162 の試験条件および試験結果

Run 162 は、ドライウェル圧力上昇率が小さい以外は Run 160 と同様な条件による試験であり、Run 160 との比較によりドライウェル圧力上昇率（放出流量）による効果を調べることを目的としている。

試験結果を Figs. 432~436 に示す。

Run 164 の試験条件および試験結果

Run 164 では、5本のダウンカマのうち中央の1本を閉鎖し、Run 161 と同様にプールとダウンカマ流路の断面積比を変化させている。本ランにおける断面積比は約 12.3 であり、Table 2.1 に示すようにこれは実炉のプール全面に関する平均的な値とほぼ等しい。ドライウェル圧力上昇率は Run 162 とほぼ同等である。

試験結果を Figs. 437~440 に示す。

Run 165 の試験条件および試験結果

Run 165 はやや特殊な例であり、ウェットウェル気相部を両側面に設けられた 2 個のノズル（3B）により大気に開放し、プール・スウェルに対するウェットウェル気相部圧縮の効果を緩和したいわゆる open tank test である。本ランでは格納容器初期圧力が大気圧であるため、Moody の理論を適用することはできない。従って、Table 4.2 に示すようにドライウェル圧力上昇率を他のランと同様な値にとることによって、格納容器各部の圧力の変化量を Table 4.1 式(1), (3) の関係によってスケールすることを意図した。

4.1.2 で述べたように、格納容器初期圧力が大気圧であり、流体密度が実炉相当であるために、ベント系流動抵抗を増加させるためのオリフィスは使用しなかった。この結果、本ランにおけるベント系損失係数は 1.8~2.0 であったと評価される。しかしながら、Fig. 441 に示すようにプール・スウェル期間中のドライウェル圧力は実炉の評価値（Fig. 4.2）の約 $\frac{1}{2}$ であるために、本ランでのベント系流動抵抗はベント系体積流量のスケーリングのためにはやや過小であったと考えられる。

ウェットウェル気相部が大気に開放されているため、Figs. 4.41, 4.42 に示すようにドライウェルをはじめとする格納容器各部の圧力の変化の傾向は他のランとは顕著な相違を示す。なお、Fig.4.41 に示すようにウェットウェル気相部の圧力に若干の変化がみられるのは、大気に通ずるノズルの断面積が不充分であったことによるものである。

本ランでは、ドライウェル圧力上昇率が他のランに比べて小さく、かつウェットウェル気相部の圧力上昇を完全に除去できなかったため、Figs. 4.43 に示すプール水位変化において気相部開放による効果は必ずしも顕著でないが、気相部圧力上昇が少ないためにプール水面の上昇が長時間接続することが明らかである。

4.4 試験結果の検討

本報で報告する試験は、受託試験の結果を補足する目的で実施されたものが多く、現象に関する詳細な検討を行うためには、本報中の試験結果のみでは充分でない。従ってここでは本報中の試験データから直接導かれる議論のみにとどめ、実験結果の総合的検討および解析は別報にゆずる。

4.4.1 ダウンカマ内水位変化

ペント・クリアリング

水位計出力から構成したダウンカマ内水位の時間変化を Figs. 4.46~4.47 に示す。格納容器 I, II のいずれによる試験に関しても、ダウンカマ出口から 20mm 上位に設置された水位計 (LVA 3, LVB 3, LVC 3) は、出口から 50mm 下位に設置された水位計 (LVA 2, LVB 2, LVC 2) よりも、気相の到達を遅れて検出する傾向がある（例えば、Fig. 4.9）が、これは水位計の設置方法の不備によるものである。また、例えば Run 106 (Fig. 4.9) において、放出開始後約 0.48 秒に水位計 LVA 3-LVA 5 が液相の到達を検出しており、Run 111 および Run 114 にも同様の結果が見られるが、これはダウンカマ内の気流により水位計の電極上に液膜が形成されたためであると推測される。なお、格納容器 II による試験ではこのような誤動作はみとめられなかった。

4.2.2 で述べたように、クリアリングの直後、プール内の圧力の急上昇が生ずる。水位計出力から判定したクリアリングの時刻は、プール壁面圧力から推定した時刻より最大 20 msec ほどの遅れがあった。Figs. 4.57~4.65 に水位計出力から求めたダウンカマ内水位変化と、圧力変化から推定したクリアリングの時刻 (△印) の比較を示す。このような遅れの原因としては、前述のようにダウンカマ出口付近の水位計測に問題があることと、水位計の応答遅れと考えられる。

ダウンカマ内の水位変化について簡単なモデルによる計算を行った。ドライウェル圧力はクリアリングまで直線的に上昇すると仮定し、また従来の解析モデルと同様に水位変化は一次元的であると仮定したが、ダウンカマ内の水柱の排除にともなうダウンカマ外の液相の加速の効果、およびプール水位の上昇にともなうウェットウェル気相部圧力上昇の効果を近似的に考慮した。

Figs. 4.57~4.65 に試験結果と計算結果の比較を示す。

ダウンカマへの水の再流入

プール・スウェル現象の末期では、重力およびウェットウェル気相部の圧力上昇のために、プ

ール水の上昇運動は減速され、ついには下降(fall back)を開始する。このためにプール内の圧力は上昇し、条件によってはダウンカマ内に水が逆流する。

格納容器Ⅱによる試験では、4.3.1で述べた電極上の液膜のためにダウンカマ出口付近の水位変化は読み取りにくいが、LVA 2 の出力信号によってプール・スウェル末期では少くとも気泡のダウンカマ下方への貫入が小さいことがみとめられる(Figs.4.9, 4.13, 4.17)。格納容器Ⅰによる試験に関しても同様な傾向がみとめられ、Runs 153, 162, 164, 165に関しては、少くともダウンカマ出口から20mm上位まで水位が過渡的に再上昇している。特に、Runs 162, 165では、再流入時に中央のダウンカマ内の水位は出口から200mm上位にまで達し、周辺のダウンカマより水位変化の振幅が大きいことが注目される(Figs.4.35, 4.36, 4.44, 4.45)。

4.4.2 プール水位変化

プール水位および水面速度の時間変化

Figs.4.48~4.56に、プール水位および水面の上昇速度の時間変化を示す。水位および水面速度の値は、格納容器内構造物への荷重の予測のために重要であるが、ドライウェル圧力変化、ダウンカマ初期浸水深さ、ダウンカマ本数等、種々のパラメータの影響を受け、本報中のデータのみではこれらの効果を分離して議論することは困難である。また、水面速度は水位計出力から求めた水位変化の数値微分によって求めた値であり、±0.3m/sec程度の誤差を含む。

プール水面の加速はペント・クリアリング以後に著しいが、クリアリングの過程においてもダウンカマ内の水柱の排除による水位上昇がみとめられる。

プール・スウェルの初期では水面はほぼ平坦であるが、スウェル末期にはかなりの不均一を生ずる。Figs.4.48~4.50に示すように、格納容器Ⅱによって行われたRuns 106, 111, 114では、プール外周部の水位計LA 1-12は中央部の水位計LB 1-13より遅れて水面の到達を検知しており、最高水位も中央部の方が高く計測されている。Figs.4.51~4.56に示す格納容器Ⅰによる試験では、(中央のダウンカマ1本のみを動作させたRun 161以外は)水位の不均一は顕著でないが、Run 165以外の試験については最高水位の不均一がみとめられた。

ウェットウェル気相部状態変化

Mark II格納容器におけるプール・スウェル現象では、プール水位上昇によってウェットウェル気相部が圧縮され、これによる圧力上昇が水位上昇を抑制する効果を持つことが知られている。ここで、GE社のプール・スウェル現象評価モデル²⁾では、ウェットウェル気相部の状態変化に関して断熱変化が仮定されているのに対して、GE社の4T試験結果³⁾および本試験装置による試験結果に関しては断熱変化からのずれが見出されている。

Figs.4.57~4.65に、ウェットウェル気相部についてポリトロープ変化を仮定し、気相部圧力の計測値(P2)から水位を計算した結果と試験結果の比較を示す。図に示すように、水位の不均一が生ずるプール・スウェル末期を除けばポリトロープ変化による近似はかなり良好に成立し、ポリトロープ指数としては1.15から1.25の値が適当であった。ちなみに、GE社による4T試験(実規模1本ダウンカマ試験)においては、Phase I(ダウンカマ径24インチ)でポリトロープ指数1.27、Phase II(ダウンカマ径20インチ)で1.20という結果が得られている³⁾。このような断熱変化からのずれの原因としては、第1にプール壁面および液面への熱損失が考えられる。

プール水面のブレークスルー

プール・スウェルの末期では気泡が水面近くまで上昇し、水面のブレーク・スルーによって気泡とウェットウェル気相部の間に流通を生じ、これによっていわゆるバルク・スウェルが終止する。従って、ブレーク・スルーがどの時点でどのような機構によって発生するかを知ることは、プール・スウェルの予測のために重要である。

ブレーク・スルーの機構は格納容器の諸元に依存し、たとえば、Mark III格納容器に関する模擬試験では、プール水がフロス状2相流となって吹き上げられるという形式のブレーク・スルー²⁾が観察されているのに対して、Mark II格納容器ではウェットウェル気相部の容積が比較的小さいために気相部の圧力上昇が著しく、このためにフロス状のブレーク・スルーは発生しない²⁾³⁾と考えられている。

本報の試験結果においては、水位計の計測点数ならびに性能の不充分からブレーク・スルーの機構について結論を得るにいたらなかったが、プール内の気泡の挙動の概要を知ることができた。Figs. 457～465 に、水位計出力から読み取った気泡上端の位置の変化を示す。時間の経過とともに気泡先端が上昇し、プール水面に接近する傾向が観察されるが、プール・スウェル末期では水位計出力が複雑になり、かつ一次元性が失われるため、界面の位置を推定することが困難になる。

前項でも述べたように、一般にプール・スウェルの末期では水位に不均一を生じ、格納容器II(1本ダウンカマ)による試験ではプール中央部の方が外周部より高い水位を示し、気泡上端のレベルに関してもRuns 106, 114 では中央部の方が高くなる傾向を示している。これに対して、格納容器I(5本ダウンカマ)による試験のうちRuns 153, 160, 162 では外周部(LB 1-15)の方が、中央部(LA 1-14)よりやや高い水位を示す傾向が認められる。また、中央のダウンカマ1本のみを動作させたRun 161, 逆に中央のダウンカマのみを閉鎖したRun 164 では中央の水位の方が高く、かつ気泡上端のレベルも中央部の方が高いという傾向が認められる。

このような水面の不均一と、気泡界面と水面との区別がつきにくいために、ブレーク・スルーの発生の時点を判断することは困難であるが、Runs 106, 114, 153, 160, 162 に関しては、4.4.4で述べたウェットウェル気相部圧力による計算値と水位計出力から読み取った水位とがほぼ一致することから、少くともウェットウェル気相部が極大値を取る時点まではブレーク・スルーが発生していないと判断される。

次に、格納容器圧力の挙動によってブレーク・スルーの時期を推定する。Figs. 466～468 は、Runs 111, 114, 106 について、ウェットウェル内の差圧を示すものである。Runs 111, 114, 106 はそれぞれダウンカマ初期浸水深さ 0.45, 0.55, 0.675m の条件による試験である。図に示すように、ペント・クリアリングの直後、プール内に気泡が形成されてP 6, P 8 が上昇し、気泡圧力(P 6, P 8)とウェットウェル気相部圧力(P 2)との差によって気泡上の水塊は上方に加速される。P 7 が上昇しP 6 と一致するのは、P 7 の位置(ダウンカマ出口レベルから400mm 上方)まで気泡が到達したことを示している。(Figs. 457～467 中の△印は、このような方法によって気泡の到達時刻を読み取った値である。) 水面上昇による気相部の圧力上昇の結果、気泡上の水塊の上昇は停滞し、さらには下降を開始する。ここで、Run 111 の結果

(Fig. 4.66) では、0.70秒以後気泡圧力とウェットウェル気相部圧力の差 ($P_8 - P_2$) がほぼ一定に保たれ、プール内にはほぼ定常な空気流が形成されていること、すなわちブレーク・スルーが完了していることを示唆している。一方、ダウンカマ初期浸水深さの最も大きい Run 106 (Fig. 4.68) では、差圧 $P_6 - P_2$ は約 0.68 秒で極小値を取った後、約 0.88 秒で極大値を取る。このような P_2 の再減少は、プール水面の下降による体積膨張の結果であり、Run 106 では少くとも約 0.90 秒まではブレーク・フルーが不完全であることを示している。Run 114 (Fig. 4.67) は、Run 111 および Run 106 の中間的な傾向を示し、約 0.80 秒以後はブレーク・スルーが不完全であると判断される。すなわち、ダウンカマ初期浸水深さが大きいほどブレーク・スルーの開始は遅くなる。同様な傾向は格納容器 I による Run 153 と Run 160 の比較においても明らかである。

4.4.3. 各パラメータの効果

ダウンカマ本数の効果

格納容器 I と II の結果を直接対比するためには、本報中の試験結果のみでは不充分である。また両者による試験結果に見出された定性的な相違については、4.4.1, 4.4.2 において述べた。

格納容器 I による Run 161 と Run 164 は、ダウンカマの 1 部を閉鎖することによりプール断面積とダウンカマ流路断面積の比を変化させ、これによる効果を調べることを目的としている。

まず Run 164 では、中央のダウンカマ 1 本のみを閉鎖しており、ダウンカマ初期浸水深さ、ドライウェル加圧率については Run 162 とほぼ同等である。Figs. 4.32~4.40, 4.55, 4.56 に示すように、Run 164 と Run 162 の圧力変化およびプール水位変化には顕著な相異は無く、Run 162 の方が最高水位が高いことと、Run 164 の方がベント系圧力損失 (P_1 と P_6 の差) が大きいことのみが有意な差異として認められる。プール/ダウンカマ断面積比は Run 162 で 9.8、Run 164 で 12.3 であるが、これらの試験結果によれば、この程度の変化はベント系圧力損失に若干の差異をもたらすのみでプール・スウェルに対する影響は少いと考えられる。

Run 161 は中央のダウンカマ 1 本のみを残して他を閉鎖し、プール/ダウンカマ断面積比を約 490 とした例であり、Fig. 4.28 に示すようにベント系圧力損失が特に大きく、この結果 Fig. 4.53 に示すようにプール上位上昇速度が著しく小さく、かつプール中央部の水位が高くなり水位の不均一が著しい。

ドライウェル圧力上昇率の効果

Table 4.2 に示すように Run 160 のドライウェル圧力上昇率は約 $0.65 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ 、Run 162 は約 $0.49 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ であり他の条件はほぼ等しい。Fig. 4.47 に示すように当然ながら Run 160 の方がクリアリングが早く発生し、クリアリング以後のドライウェル圧力も高い。プール水面上昇速度は Run 160 で最高約 5.0 m/sec 、Run 162 で約 3.2 m/sec に達した。これらの試験結果によれば、プール水の挙動はドライウェル圧力変化に対してかなり敏感であると判断される。

ダウンカマ初期浸水深さの効果

Fig. 4.46, 4.47 に示すように、ダウンカマ初期浸水深さを増大させるとクリアリングの発生は遅くなる。

プール水位変化への影響に関しては、4.4.2 で述べたように、ダウンカマ初期浸水深さを増大させるとブレーク・スルーの発生が遅れる傾向が認められた。

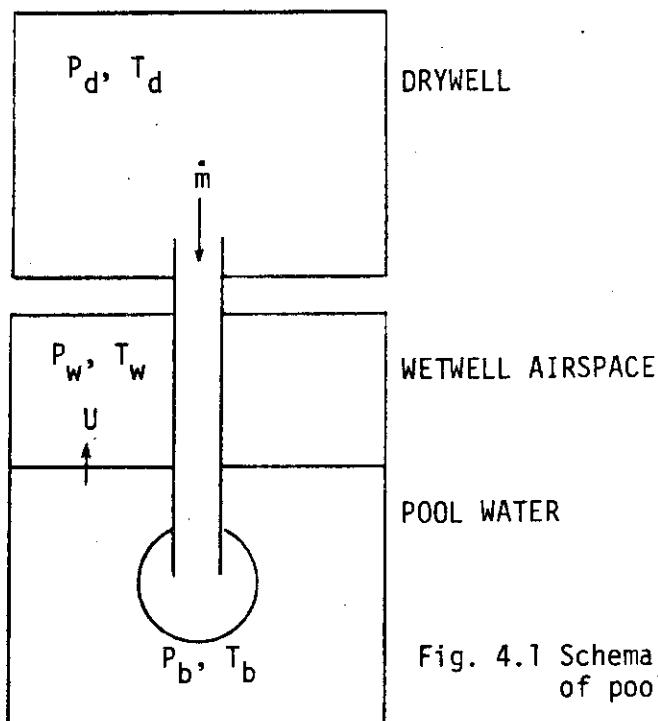


Fig. 4.1 Schematic representation of pool swell

Table 4.1 Relationships derived by Moody's scaling analysis
(From Ref. 2)

$$\frac{P_{\text{scaled}}}{P_{\text{full-scale}}} = \frac{L_{\text{scaled}}}{L_{\text{full-scale}}} \quad (1)$$

$$\frac{U_{\text{scaled}}}{U_{\text{full-scale}}} = \left(\frac{L_{\text{scaled}}}{L_{\text{full-scale}}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$\frac{t_{\text{scaled}}}{t_{\text{full-scale}}} = \left(\frac{L_{\text{scaled}}}{L_{\text{full-scale}}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\frac{\dot{m} h_{\text{scaled}}}{\dot{m} h_{\text{full-scale}}} = \left(\frac{L_{\text{scaled}}}{L_{\text{full-scale}}} \right)^{7/2} \quad (4)$$

where

 P : pressure U : water velocity L : length \dot{m} : mass rate of air into the bubble t : time h : stagnation enthalpy of the vent

air flow

Table 4.2 Summary of test conditions

Run No.	Test Containment	DISCH. CONDITIONS		INITIAL CONDITIONS			DOWNCOMER CONDITIONS			Initial D.W1 Pressurization Rate(kg/cm ² /sec)	Date of Test
		Tank (kg/cm ² abs)	Press. (kg/cm ² abs)	Orifice Dia.(mm)	D.W1 Press. (kg/cm ² abs)	Pool Temp. (°C)	Number (-)	Subm. (m)	Orifice Dia.(mm)		
105*	II						1				
106	II	10.4	10.5	0.175	8		1	0.675	65.0	0.63	Jan. 27
109*	II						1				
111	II	10.5	10.5	0.173	17		1	0.450	65.0	0.55	Apr. 28
112*	II						1				
113*	II						1				
114	II	10.5	10.5	0.173	25		1	0.550	55.0	0.70	June 7
151*	I						5				
152*	I						5				
153	I	10.5	25.0	0.173			5	0.675	65.0	0.72	Feb. 7
154*	I						5				
156*	I						5				
160	I	10.4	22.5	0.173	31		5	0.550	65.0	0.65	Aug. 4
161	I	10.5	25.0	0.171	28		1	0.550	65.0	0.72	Aug. 12
162	I	10.5	20.0	0.172	26		5	0.550	65.0	0.49	Aug. 17
164	I	10.5	20.0	0.172	27		4	0.550	65.0	0.50	Aug. 29
165	I	6.3	27.5	1.06/open	28		5	0.550	-	0.6	Aug. 29

* Runs performed for the Japanese BWR owners' group.

Table 4.3 Status of instrumentation

Run 106

Channels with low reliability:

P3

LA9 - 12, LB8 Insulation failure, low sensitivity.

Run 111

Failed channel:

P6

Channels with low reliability:

LA12, LB8 Insulation failure, low sensitivity.

Run 114

Channels with low reliability:

LA9, LA12, LB8 Insulation failure, low sensitivity.

Run 153

Failed channels:

P3, P12, LVA3

Channels with low reliability:

LC5 Insulation failure, low sensitivity.

Runs 160 and 161

Failed channels:

P3, P10, LB14, LC1 - 6

Channels with low reliability:

LA8, LB12, LVC3 - 5 Insulation failure, low sensitivity.

Runs 162, 164 and 165

Failed channels:

P3, P6, P10, LB14, LC1 - 6

Channels with low reliability:

LA8, LB12, LVC3 - 5 Insulation failure, low sensitivity.

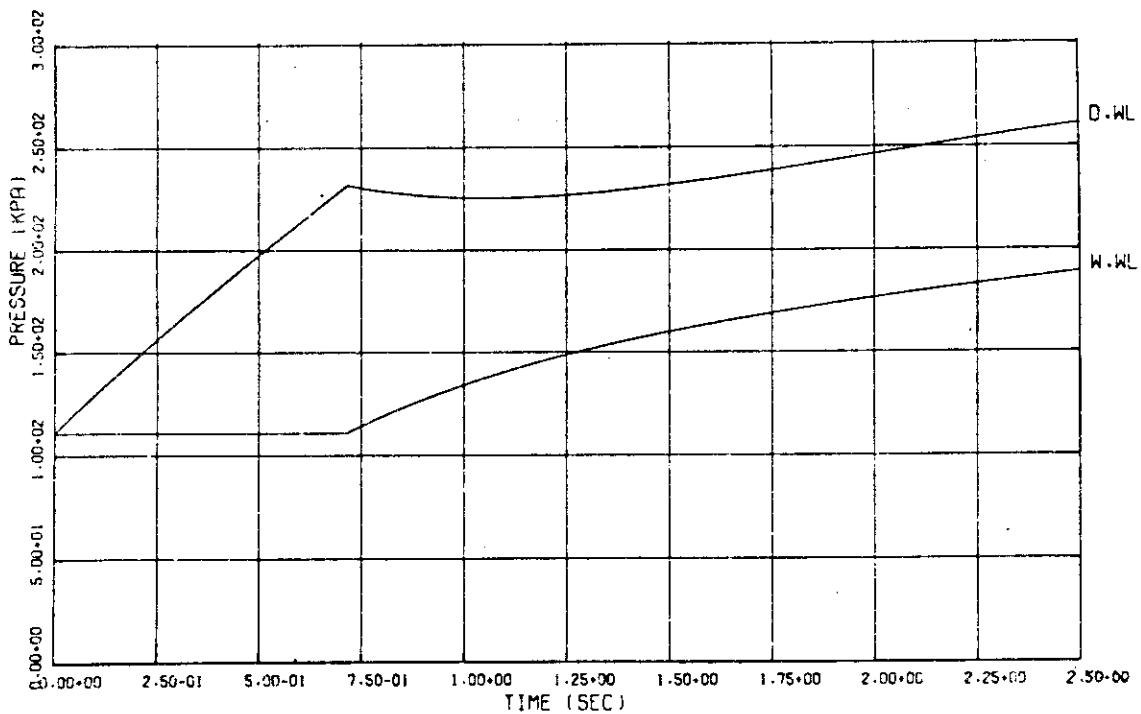


Fig. 4.2 Pressure response of typical Mark II containment to double ended break of recirculation line. (From Ref. 5)

$$102 \text{ kPa} = 1.0 \text{ kg/cm}^2$$

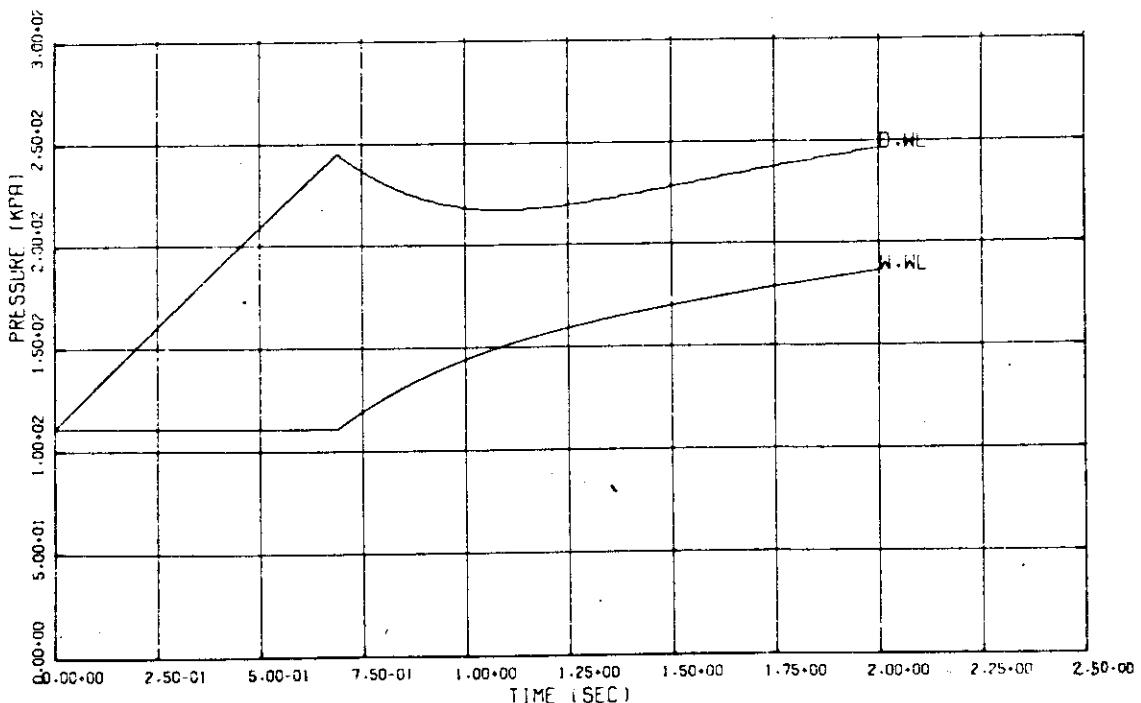


Fig. 4.3 Pressure response of typical Mark II containment to double-ended break of main steam line. (From Ref. 5)

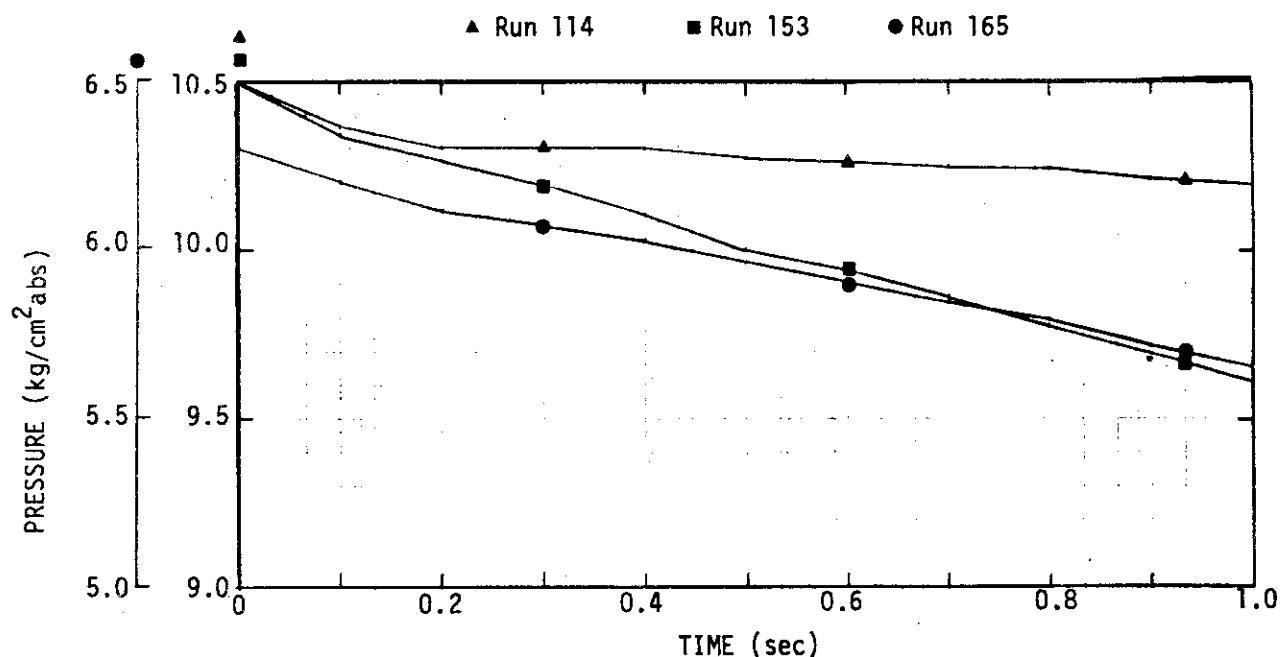


Fig. 4.4 Typical pressure transients in storage tank

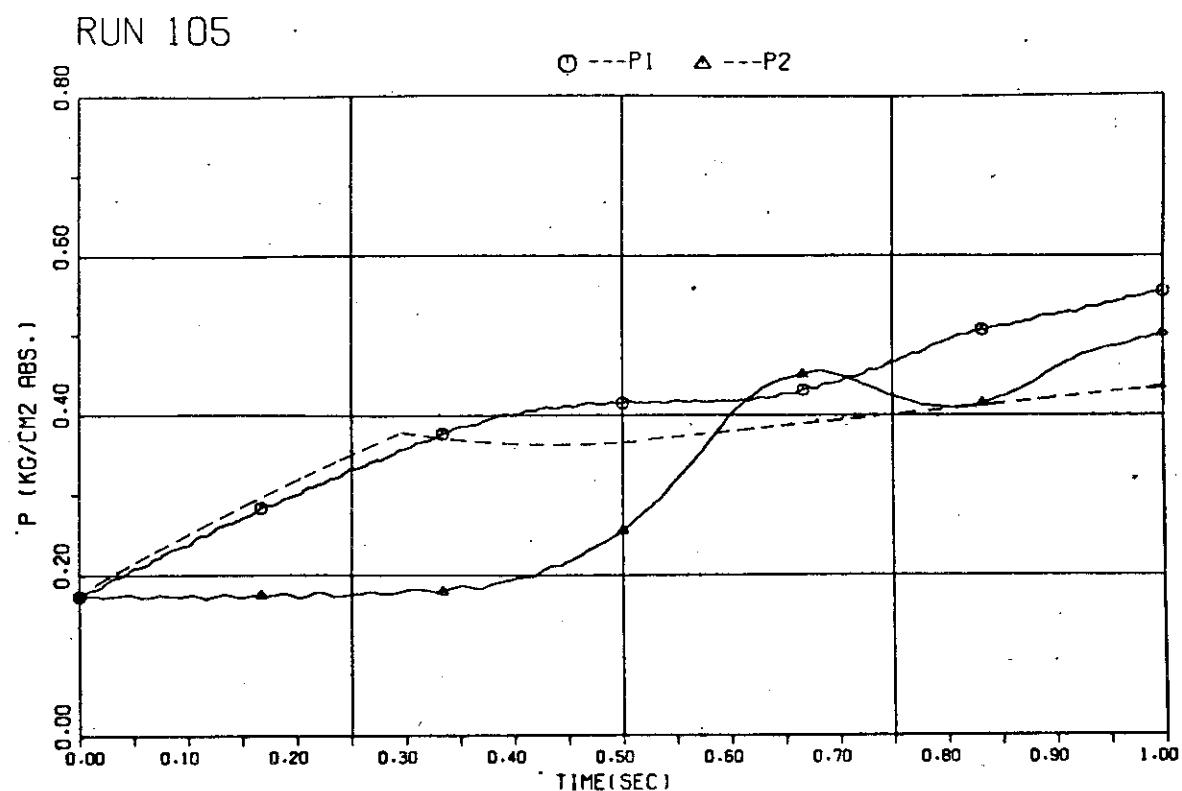


Fig. 4.5 Typical containment pressure transients compared with target drywell pressure transient (dashed line).

(From Ref. 1)

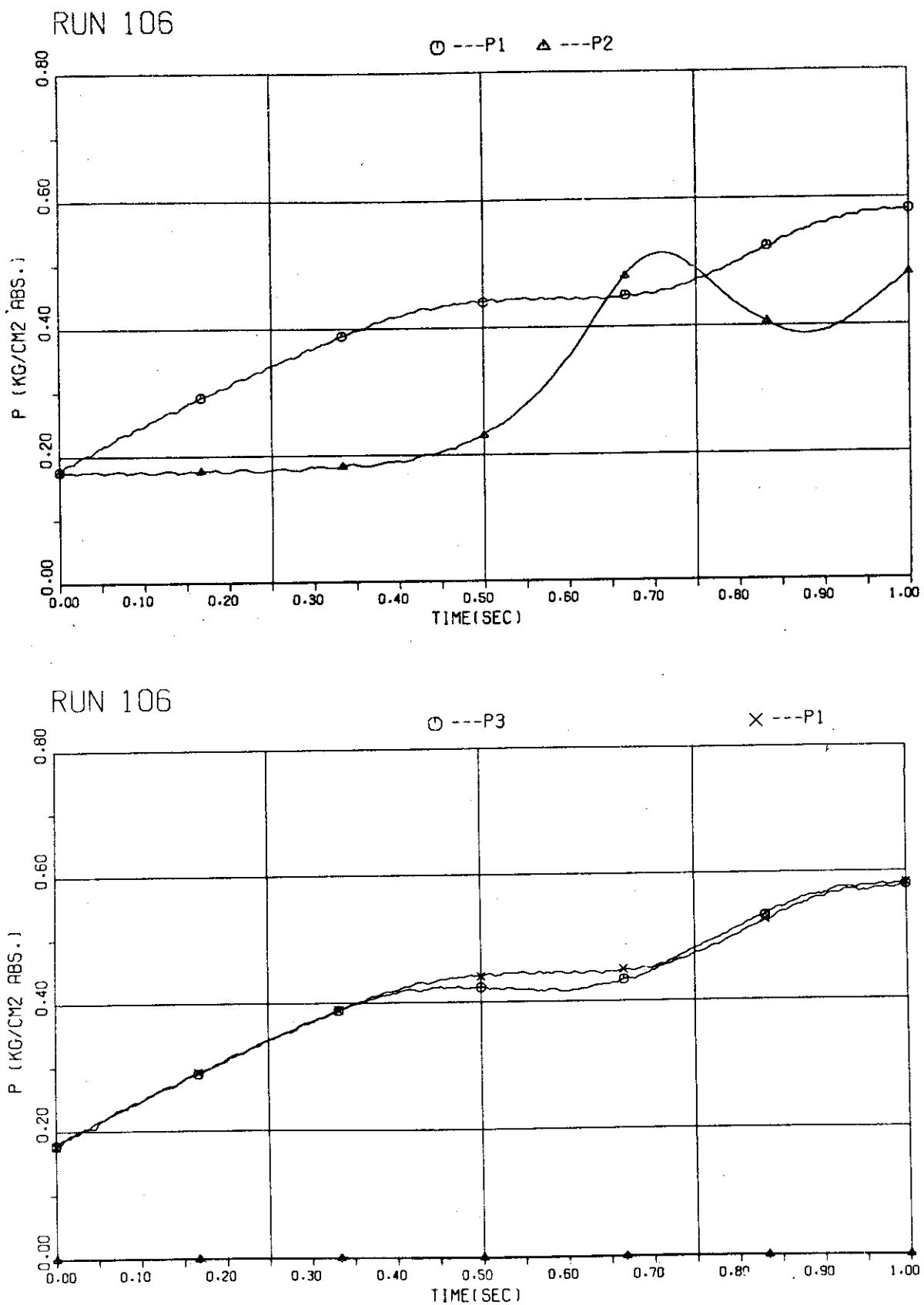


Fig. 4.6 Containment pressure transients, Run 106

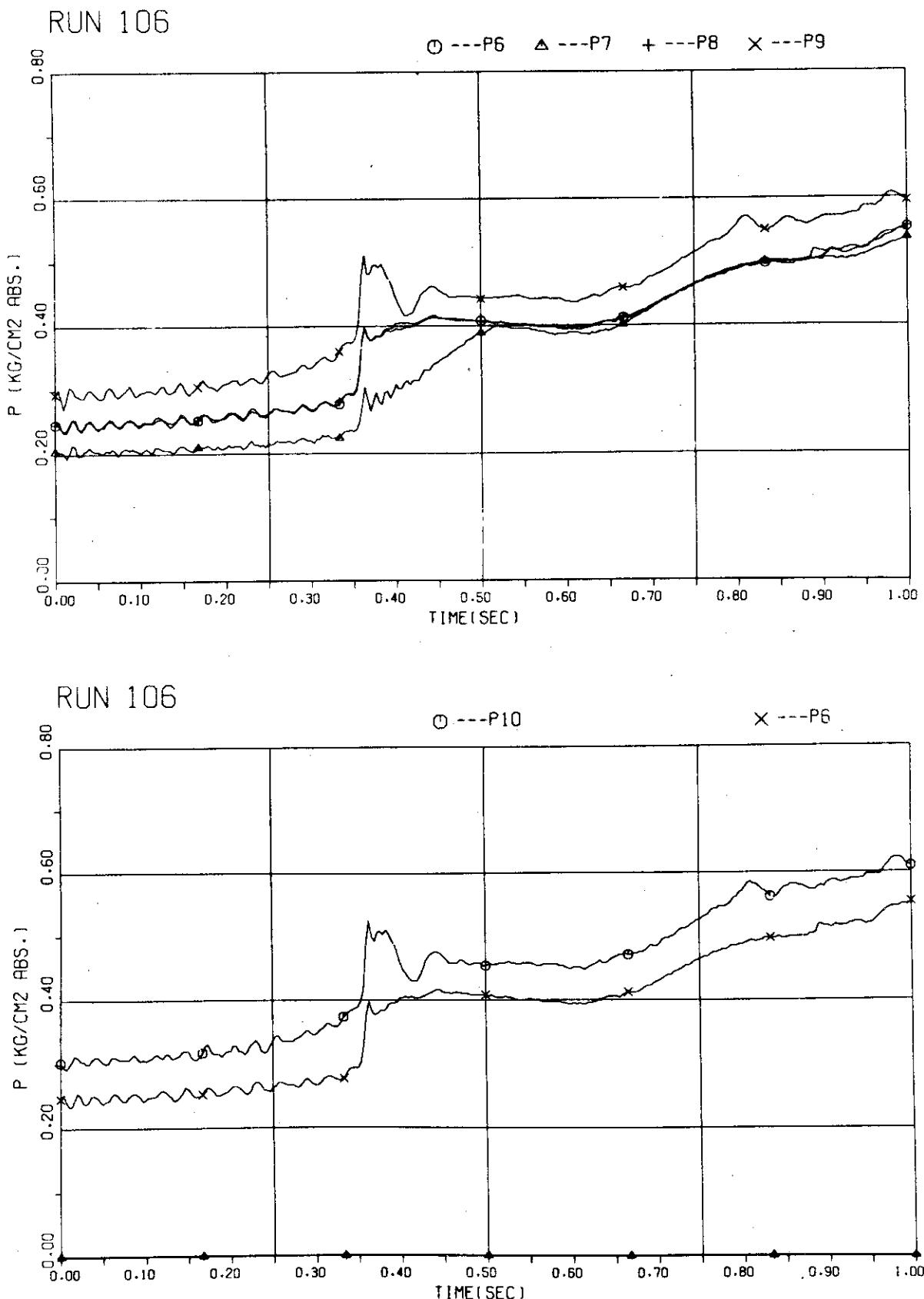
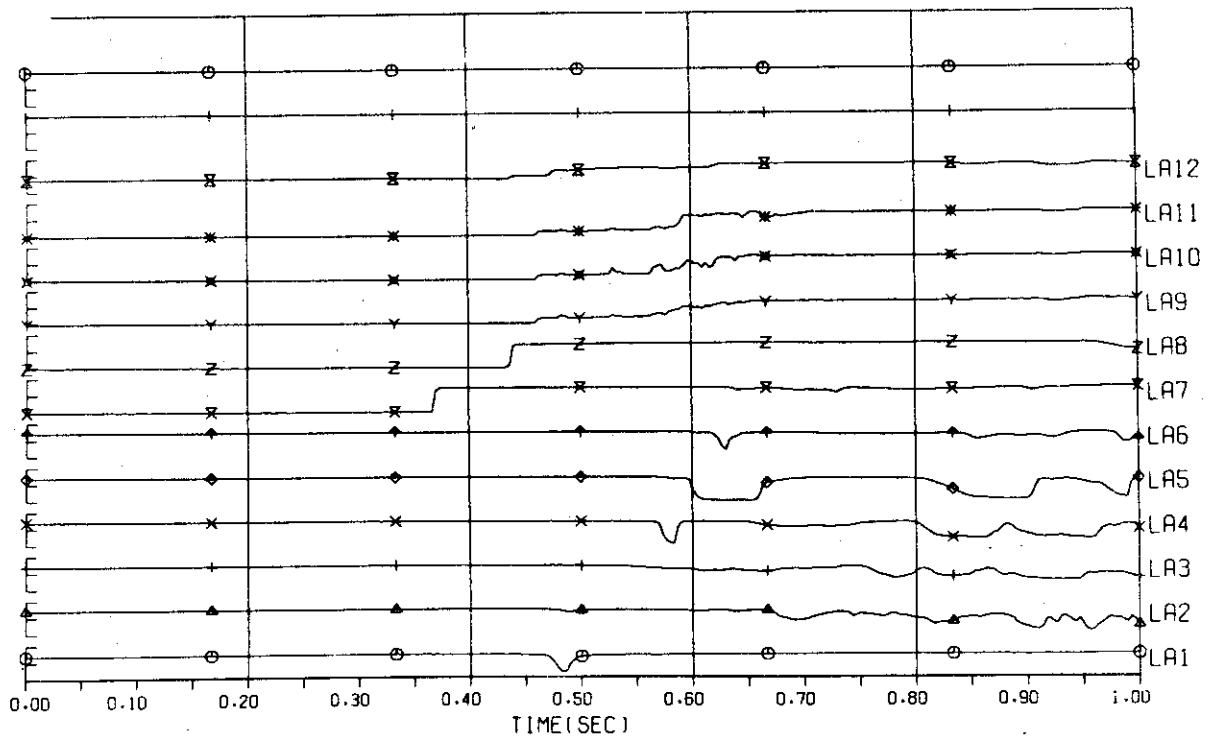


Fig. 4.7 Containment pressure transients, Run 106

RUN 106

LEVEL SIGNAL



RUN 106

LEVEL SIGNAL

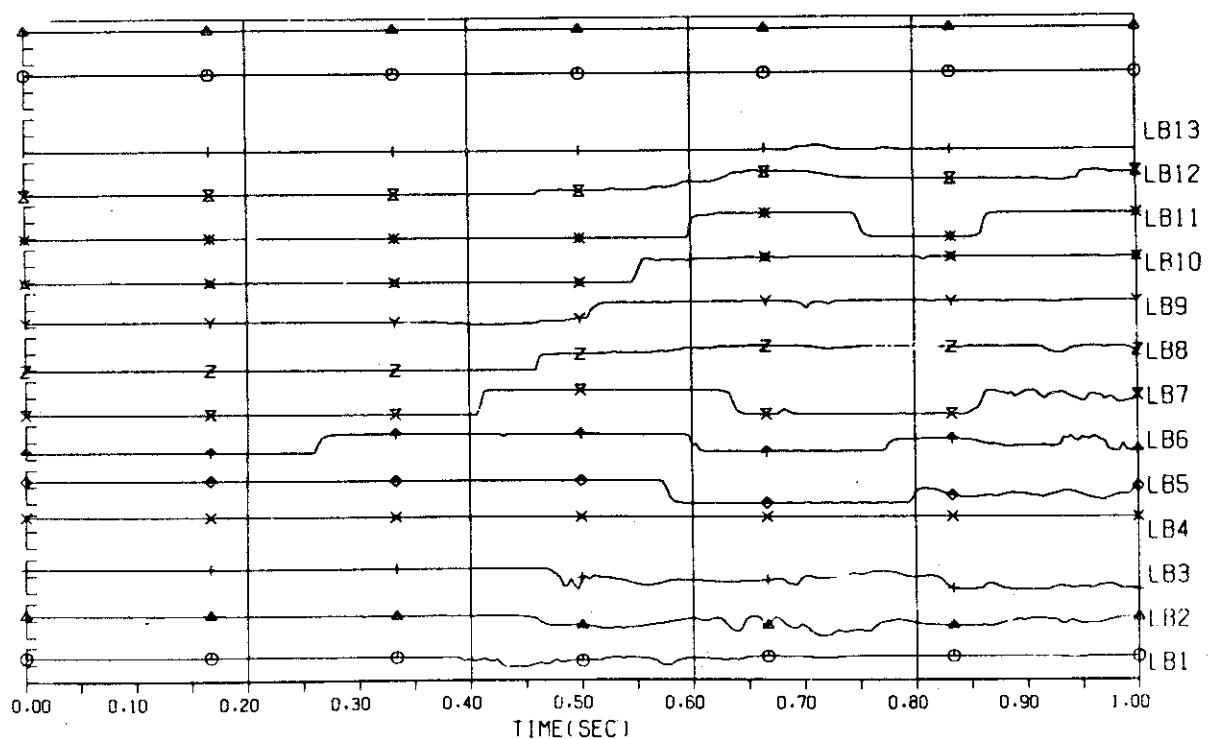


Fig. 4.8 Water level signals vs. time, Run 106

RUN 106

LEVEL SIGNAL

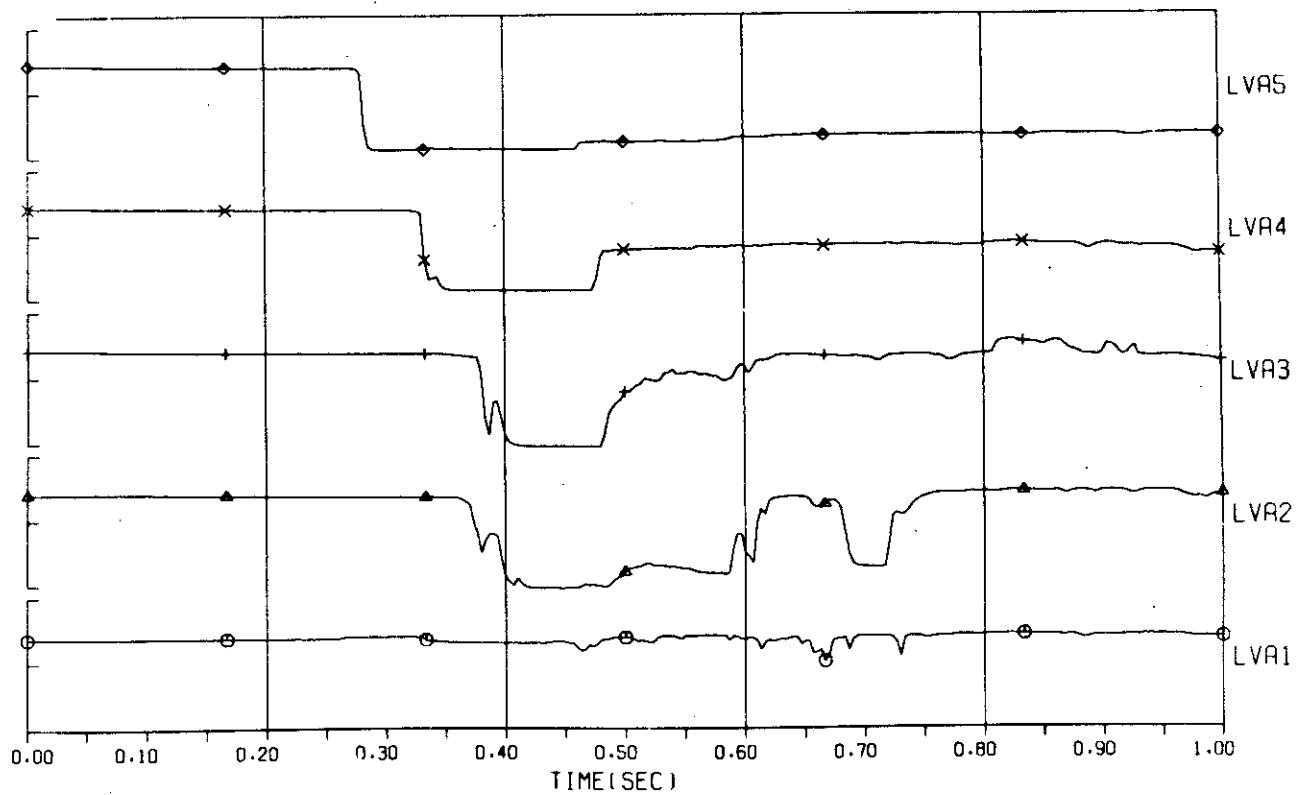


Fig. 4.9 Water level signals vs. time, Run 106

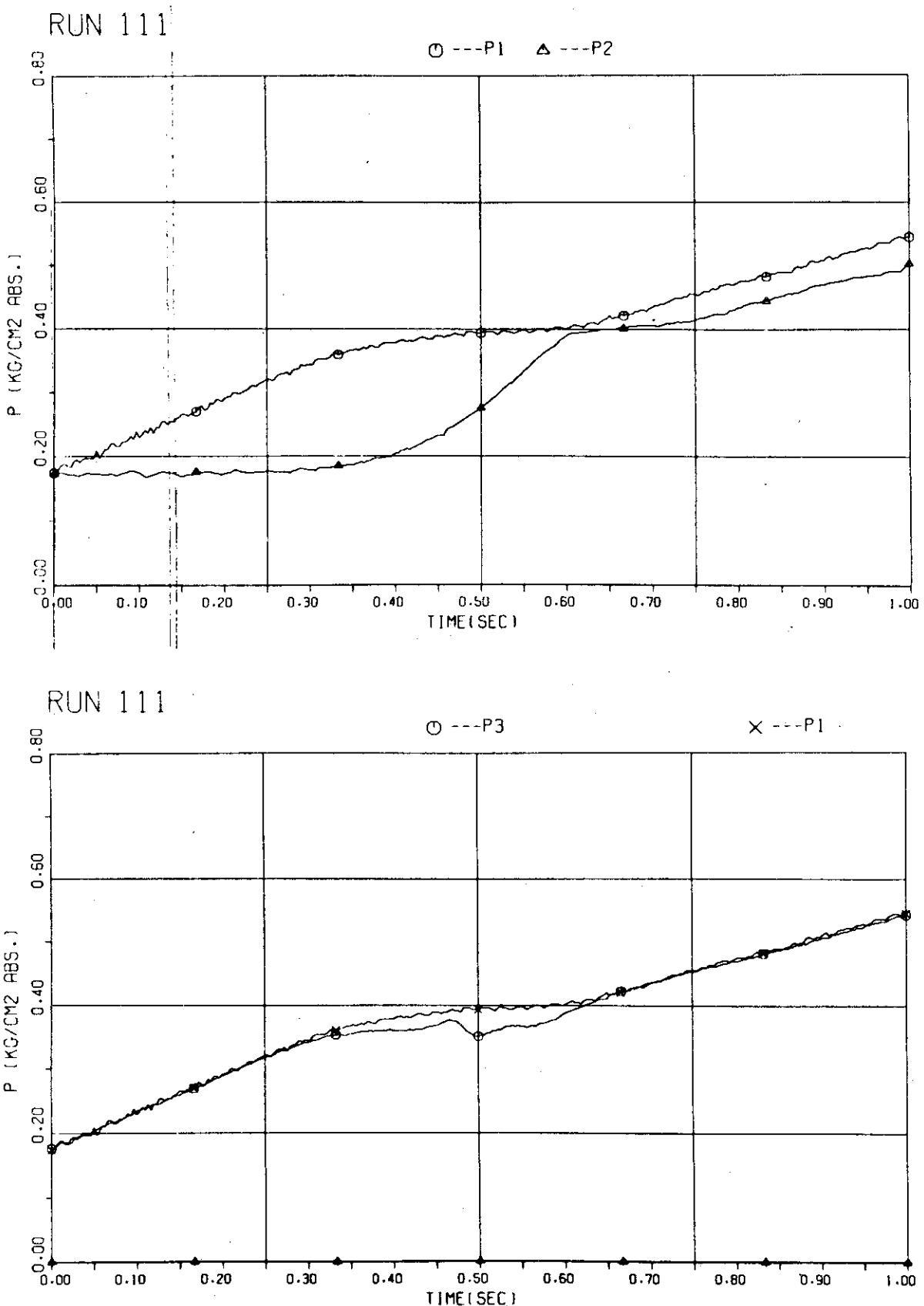
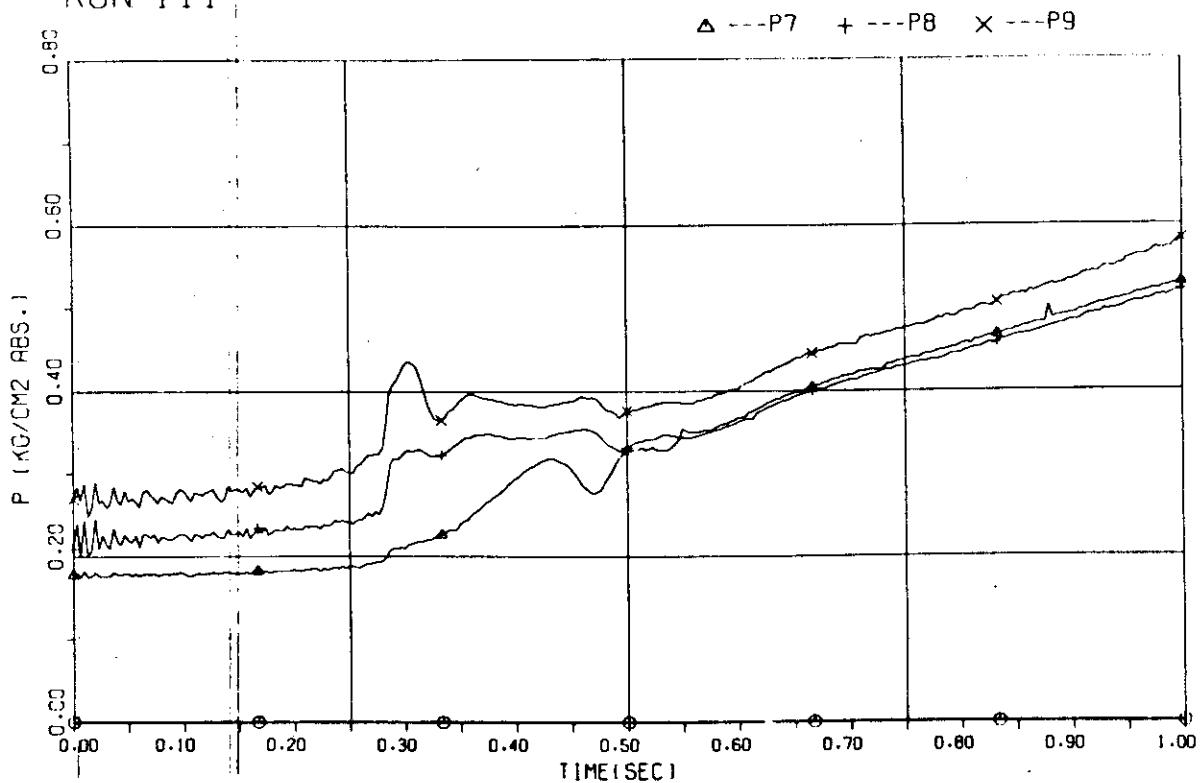


Fig. 4.10 Containment pressure transients, Run 111

RUN 111



RUN 111

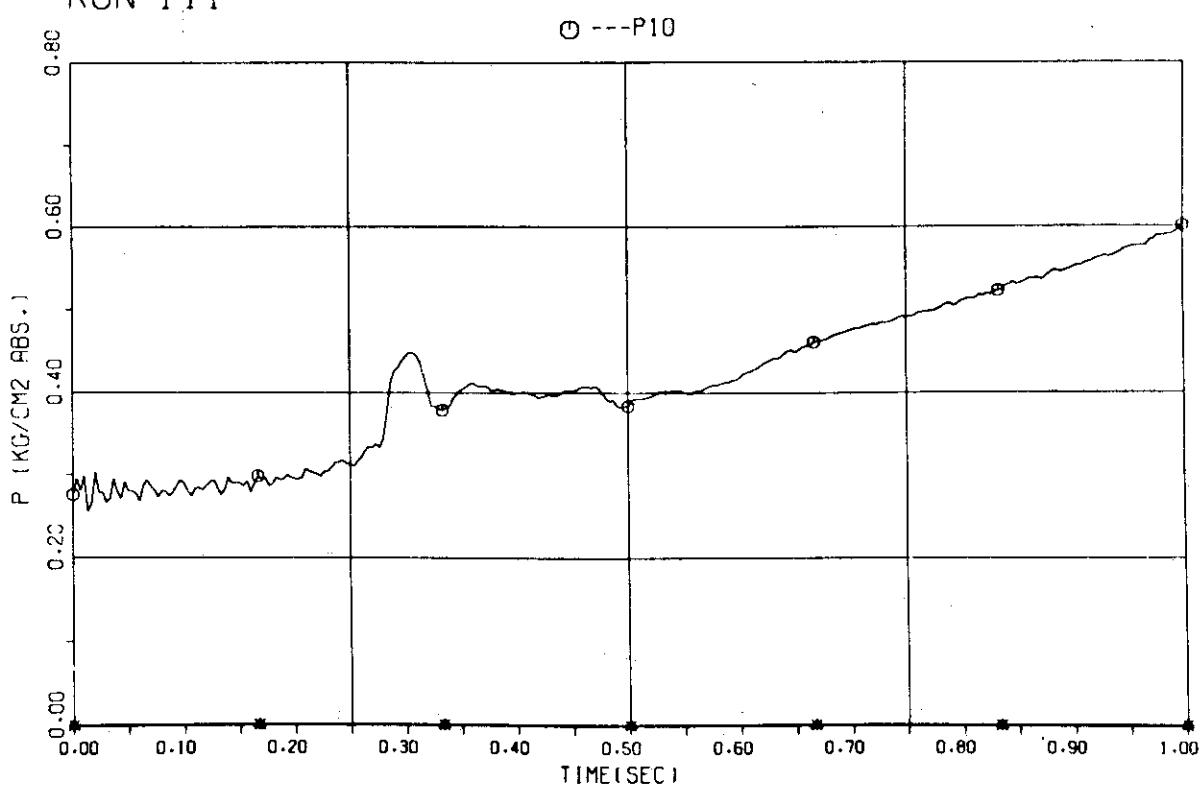
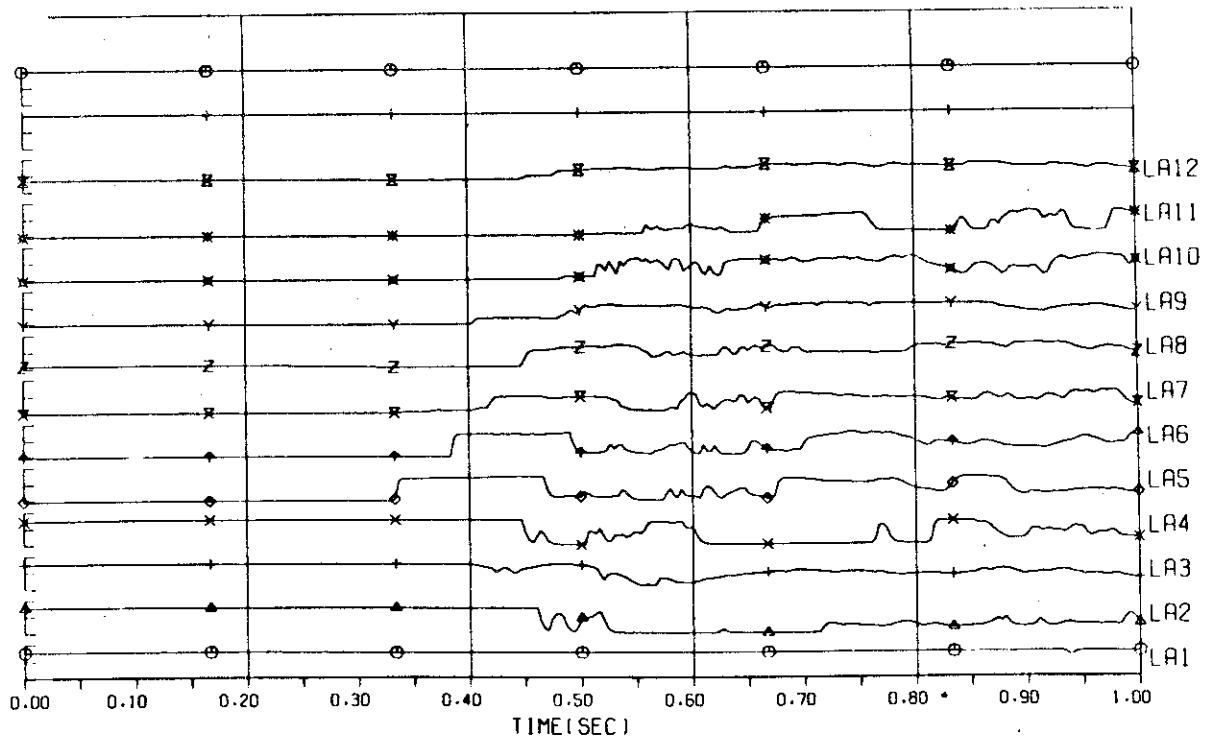


Fig. 4.11 Containment pressure transients, Run 111

RUN 111

LEVEL SIGNAL



RUN 111

LEVEL SIGNAL

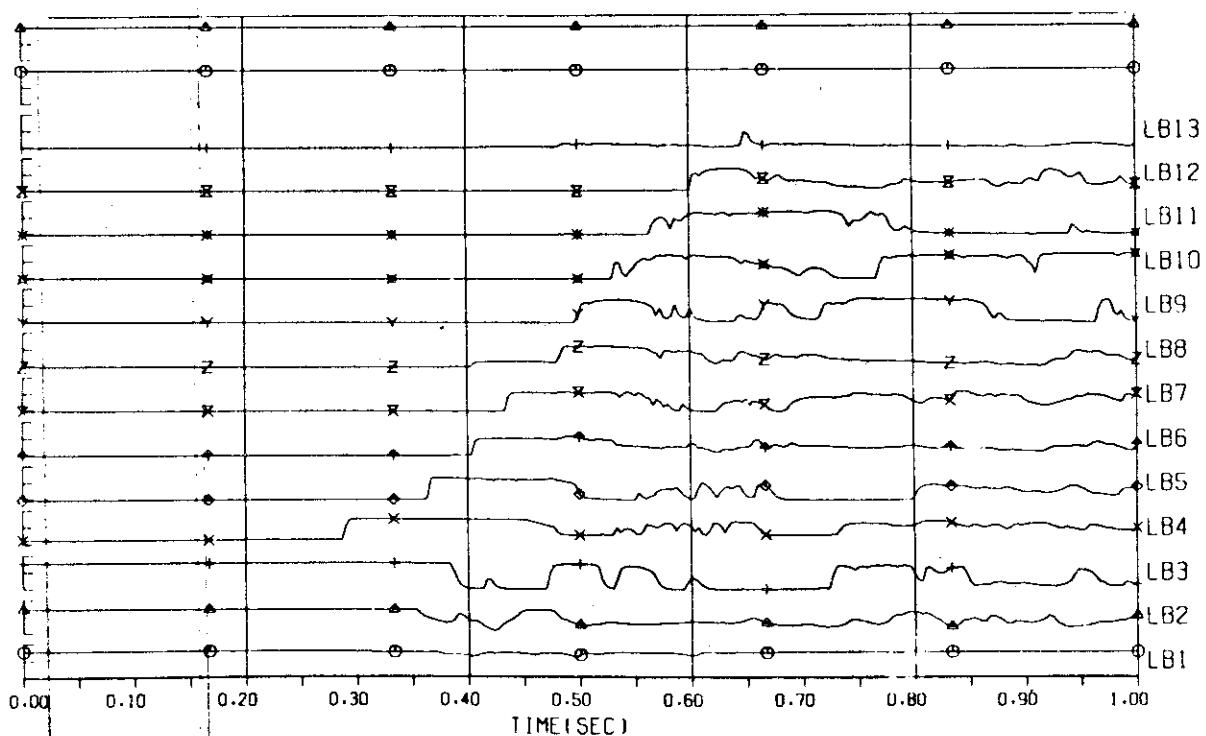


Fig. 4.12 Water level signals vs. time, Run 111

RUN 111

LEVEL SIGNAL

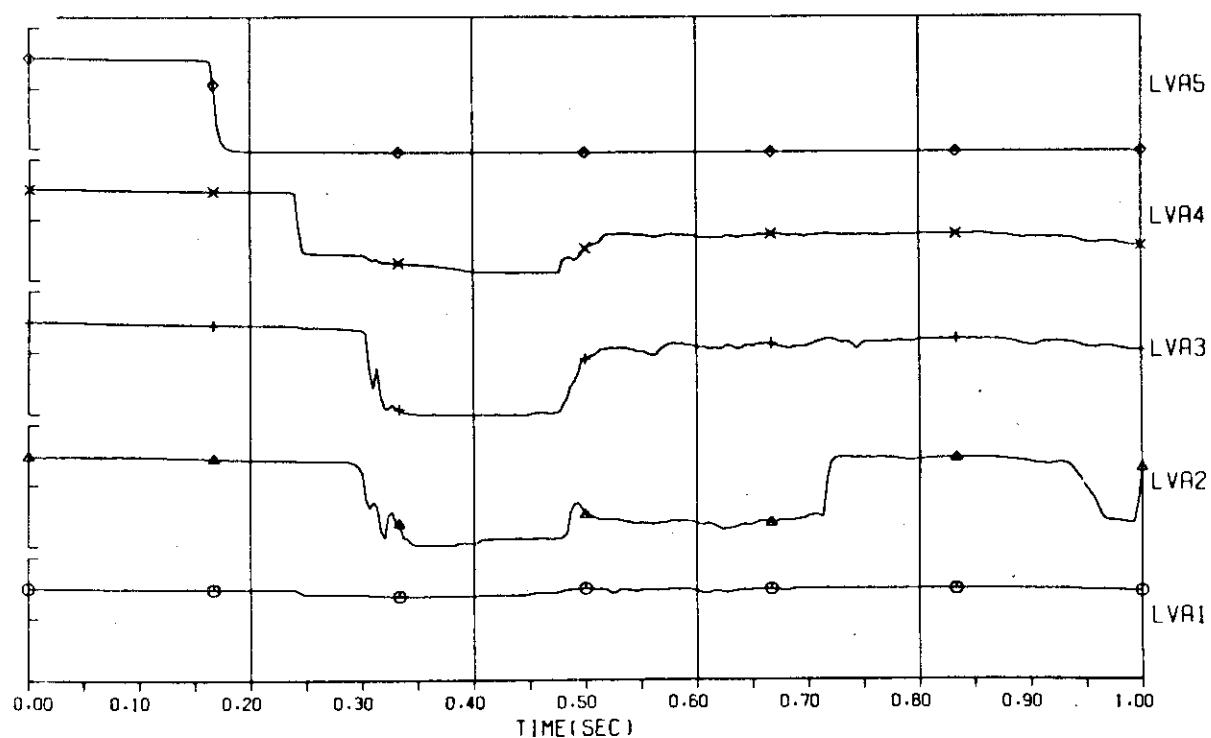


Fig. 4.13 Water level signals vs. time, Run 111

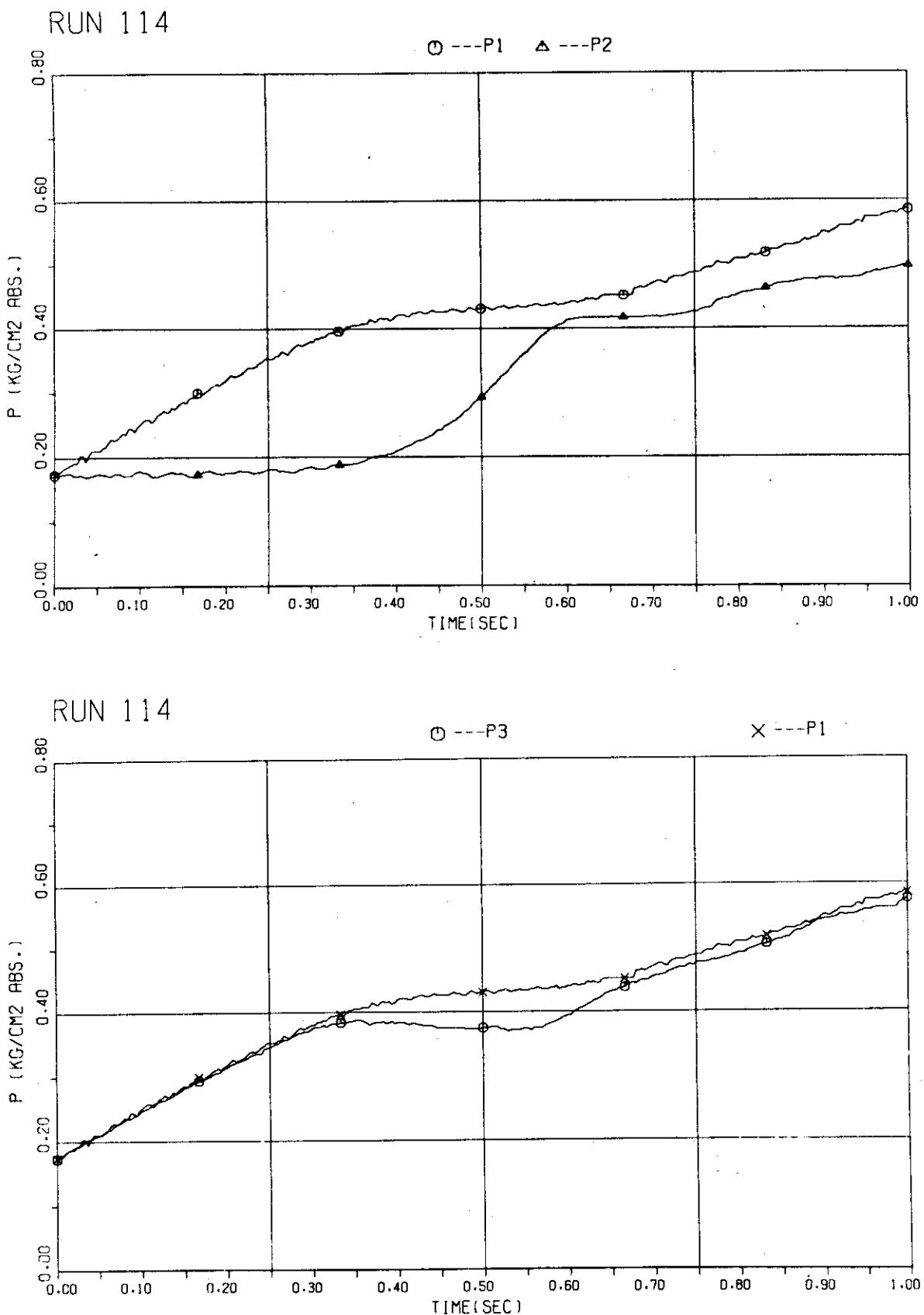


Fig. 4.14 Containment pressure transients, Run 114

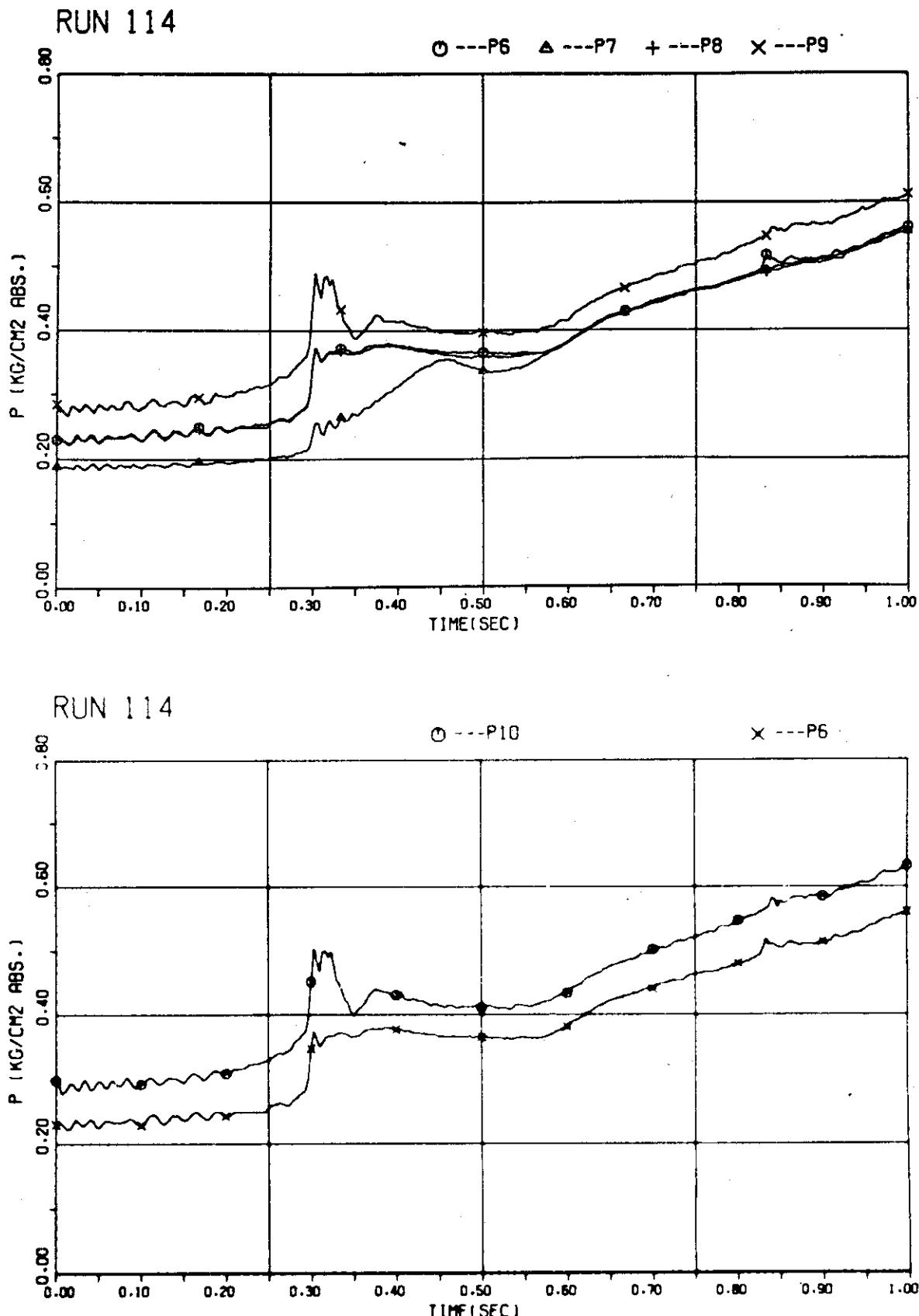
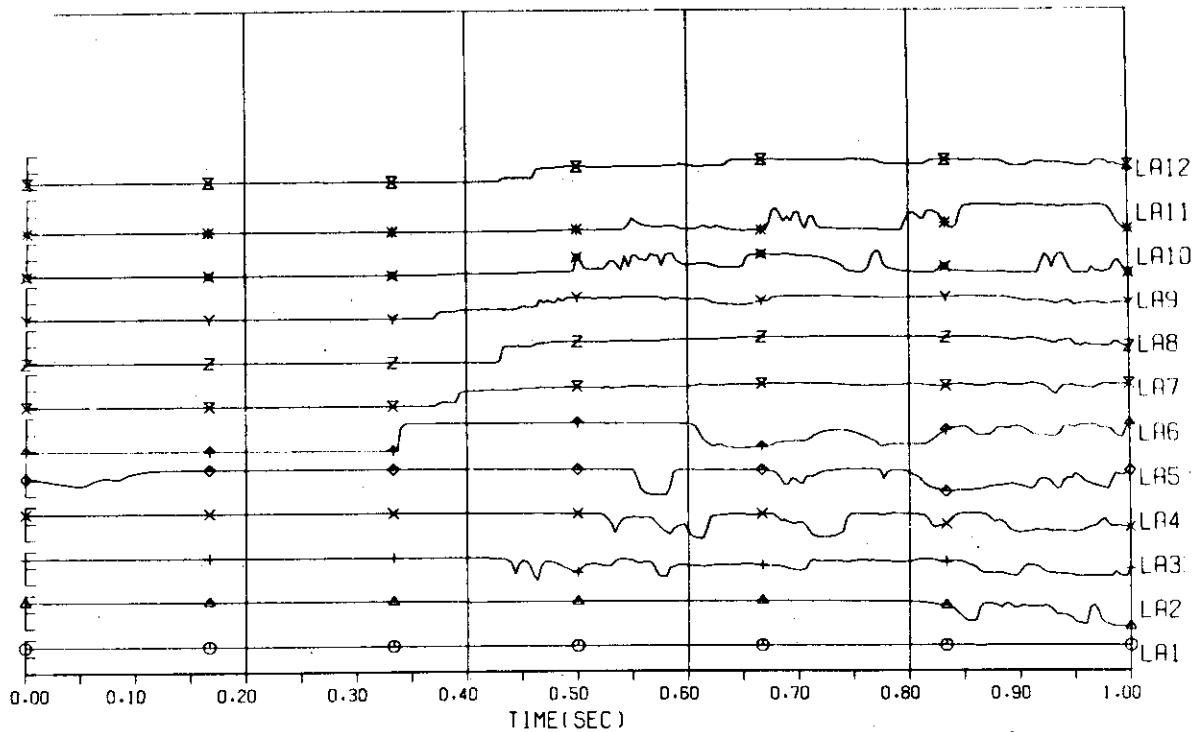


Fig. 4.15 Containment pressure transients, Run 114

RUN 114

LEVEL SIGNAL



RUN 114

LEVEL SIGNAL

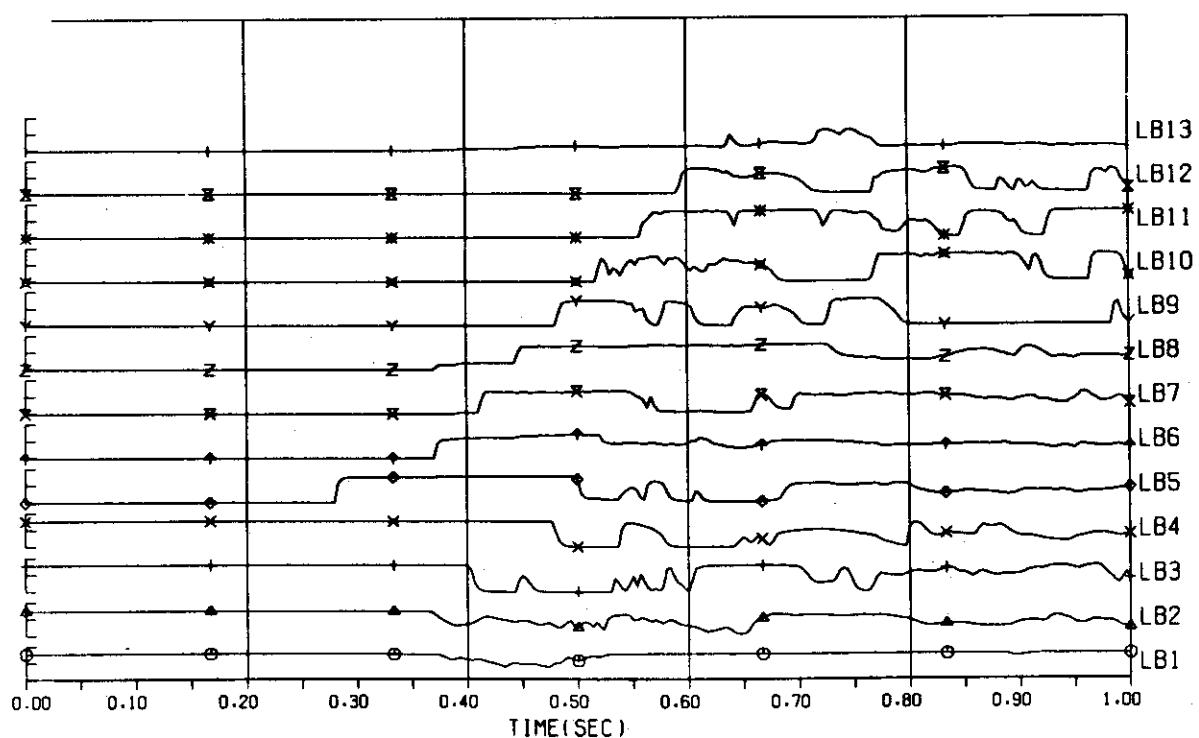


Fig. 4.16 Water level signals vs. time, Run 114

RUN 114

LEVEL SIGNAL

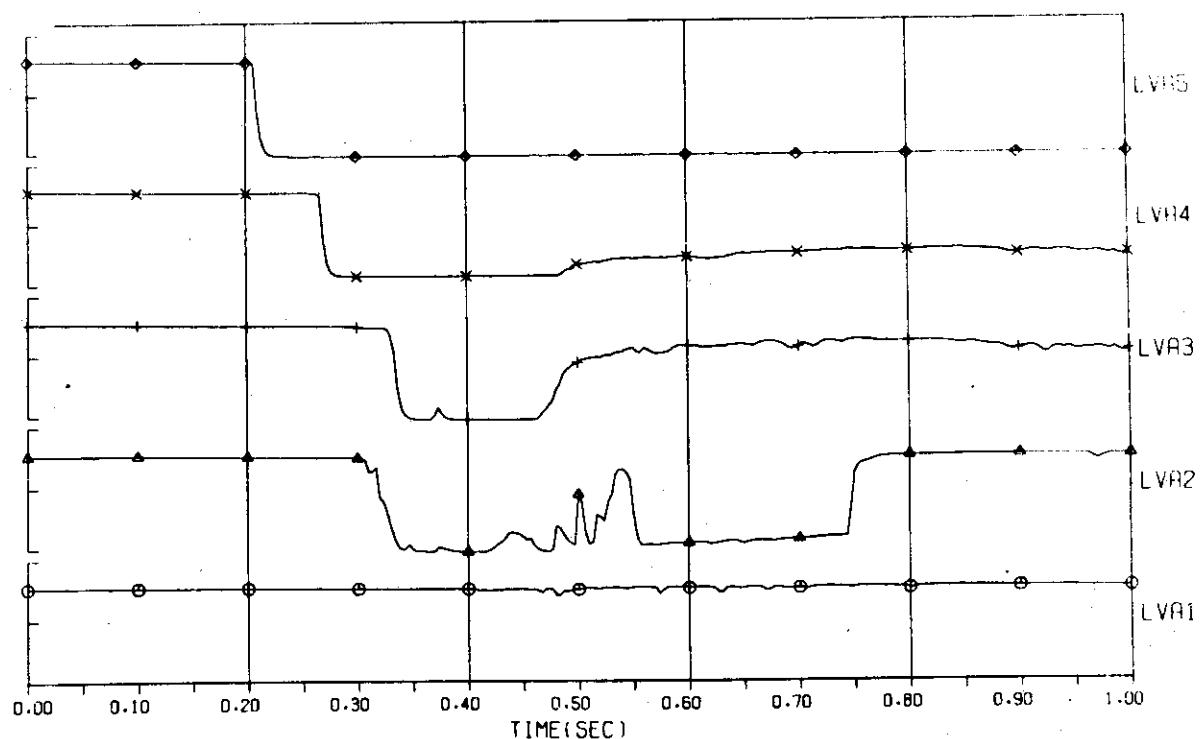
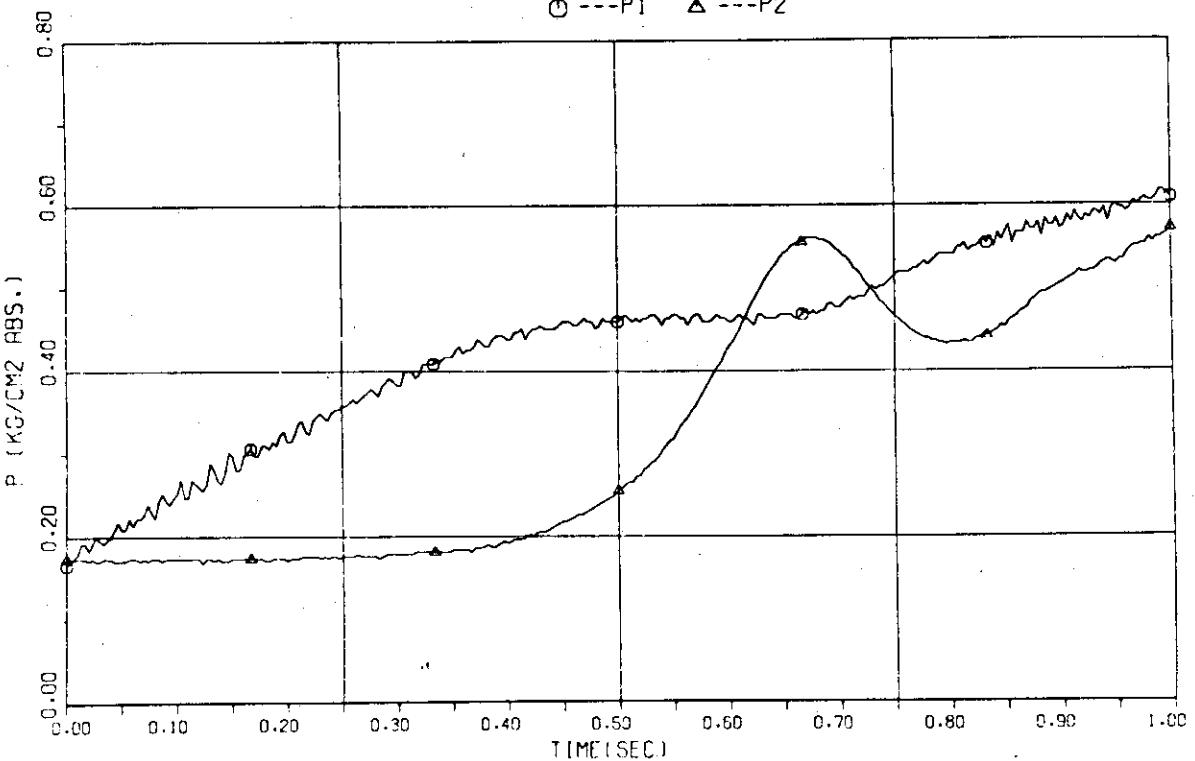


Fig. 4.17 Water level signals vs. time, Run 114

RUN 153

○ --- P1 △ --- P2



RUN 153

○ --- P3 △ --- P4 + --- P5 × --- P1

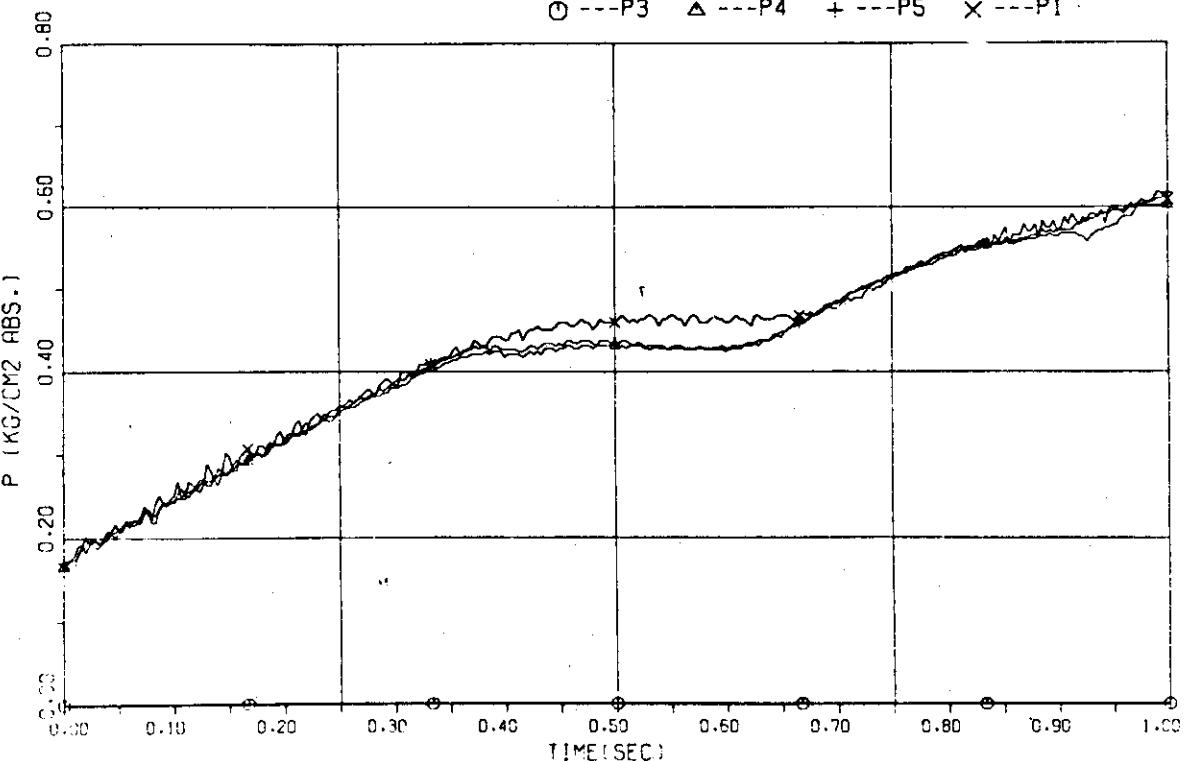


Fig. 4.18 Containment pressure transients, Run 153

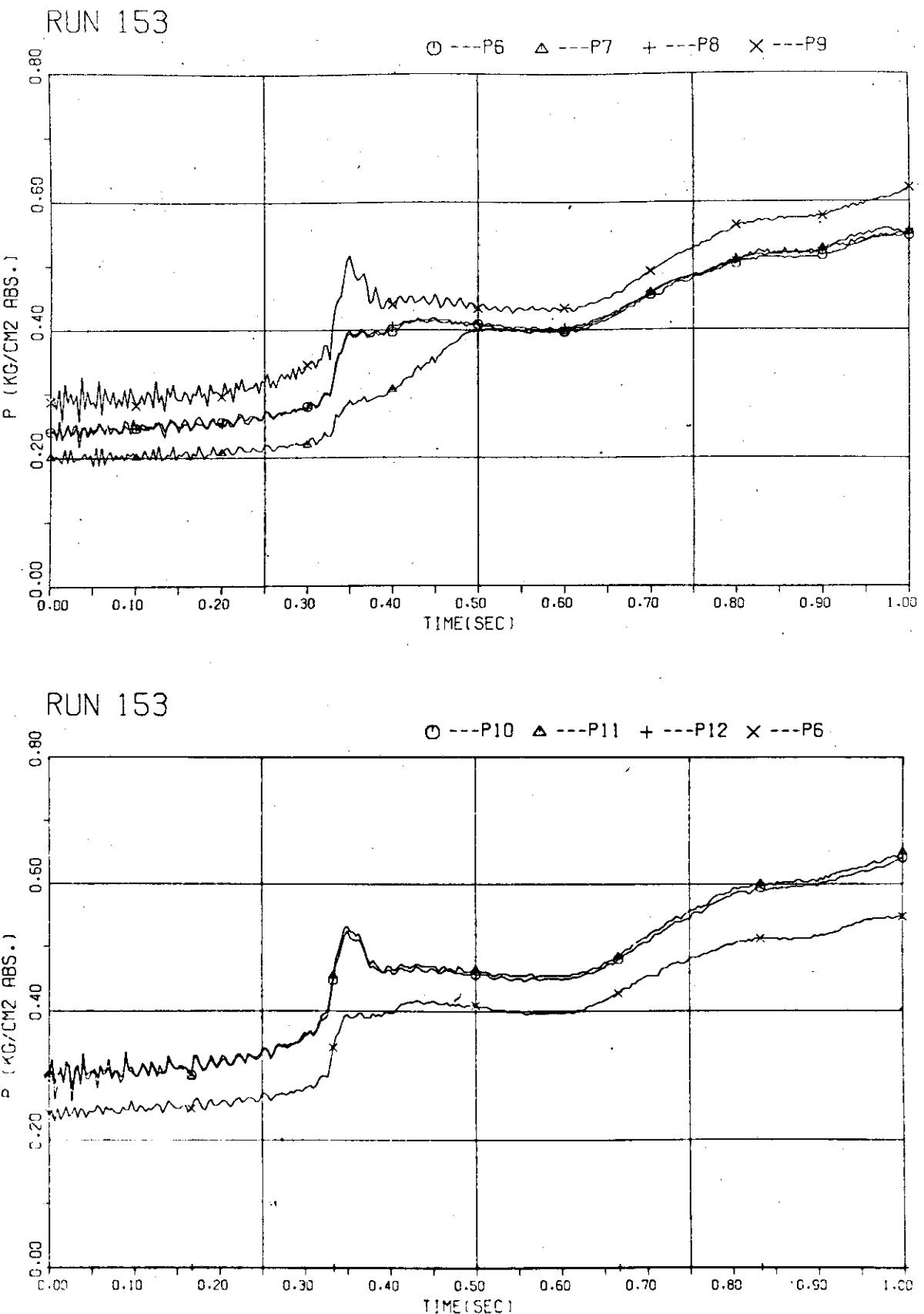
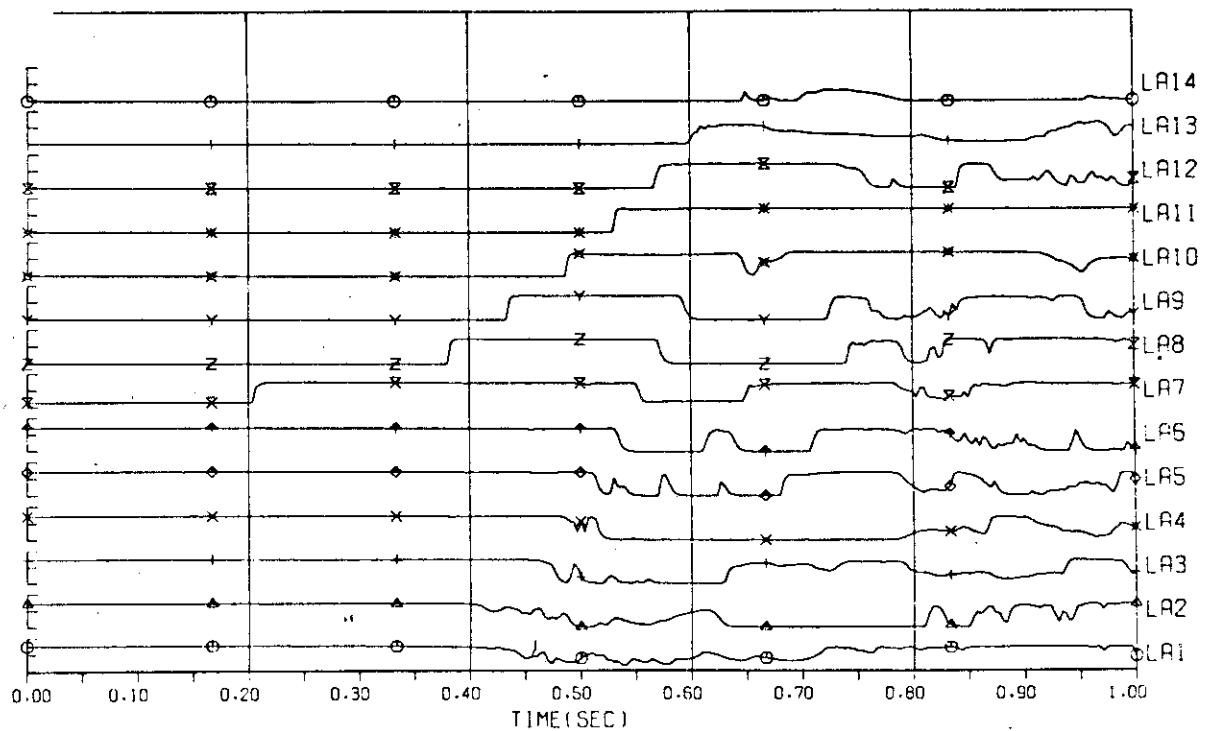


Fig. 4.19 Containment pressure transients, Run 153

RUN 153

LEVEL SIGNAL



RUN 153

LEVEL SIGNAL

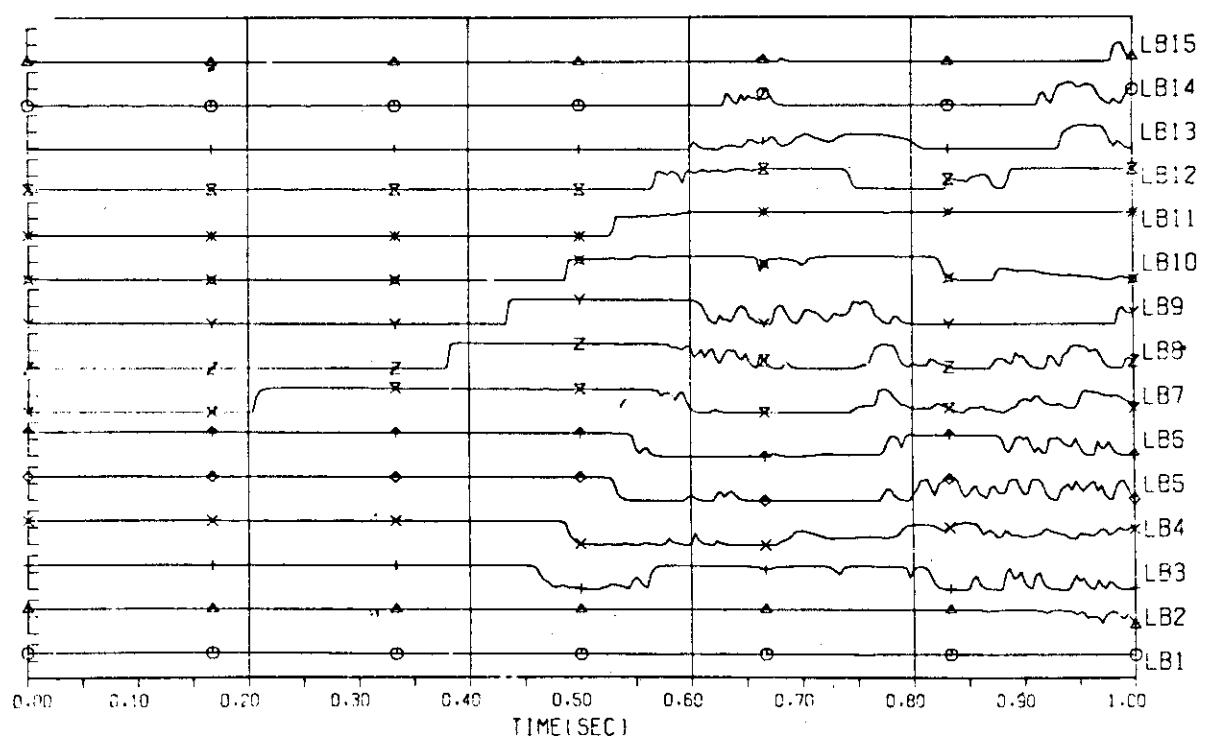
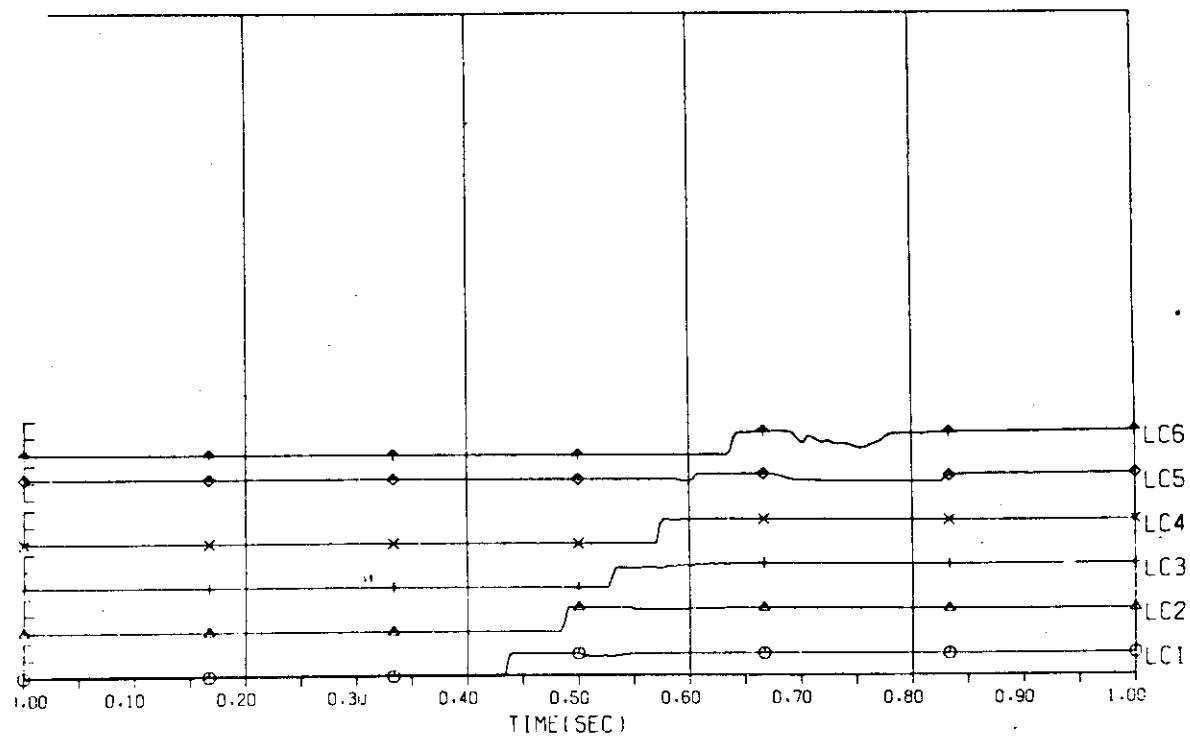


Fig. 4.20 Water Level signals vs. time, Run 153

RUN 153

LEVEL SIGNAL



RUN 153

LEVEL SIGNAL

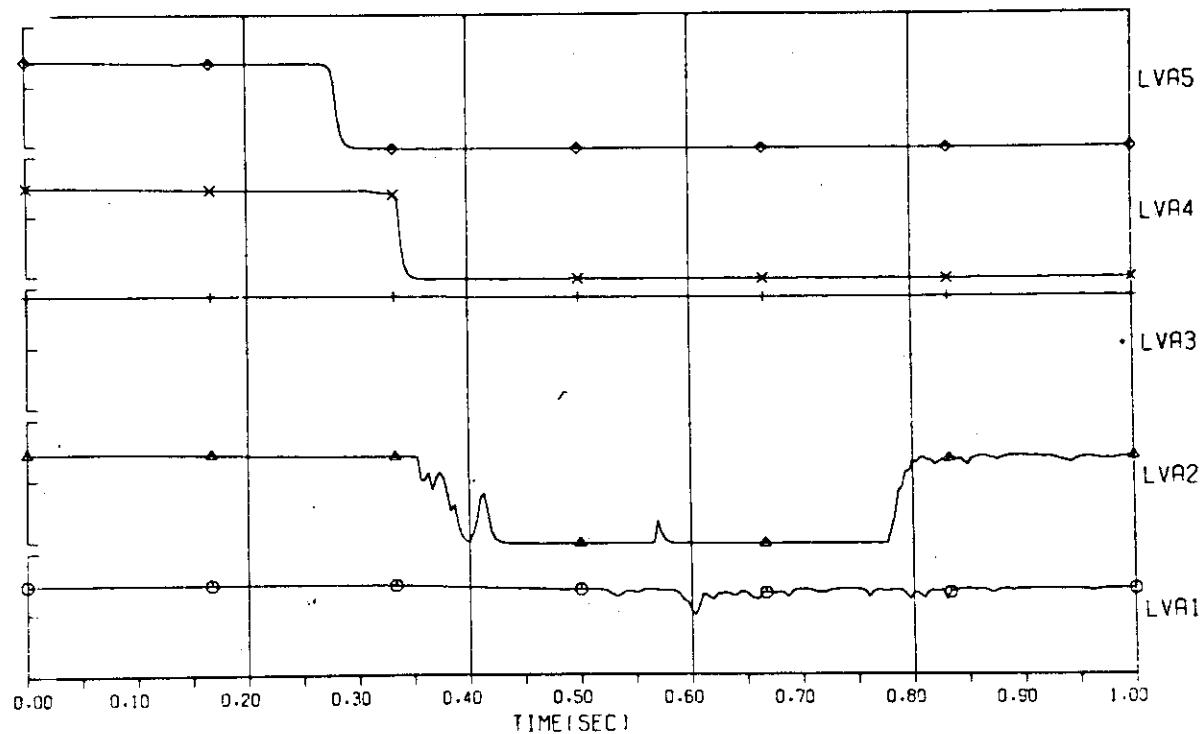
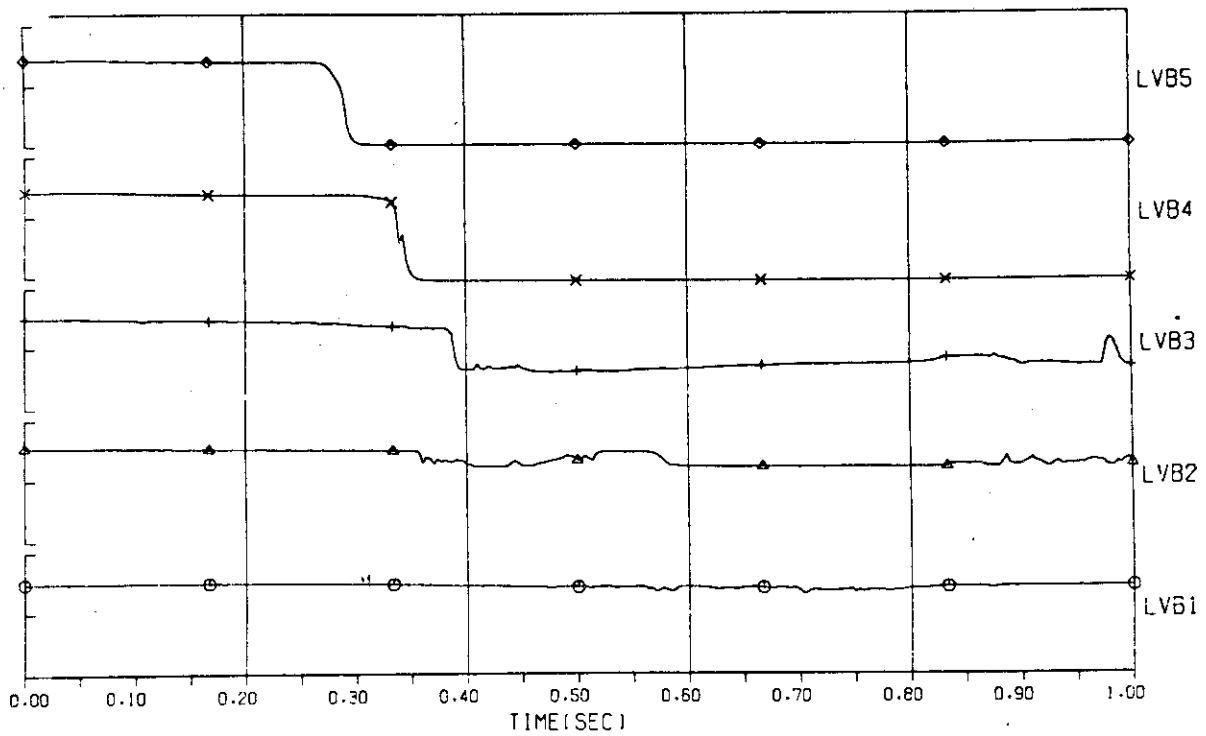


Fig. 4.21 Water level signals vs. time, Run 153

RUN 153

LEVEL SIGNAL



RUN 153

LEVEL SIGNAL

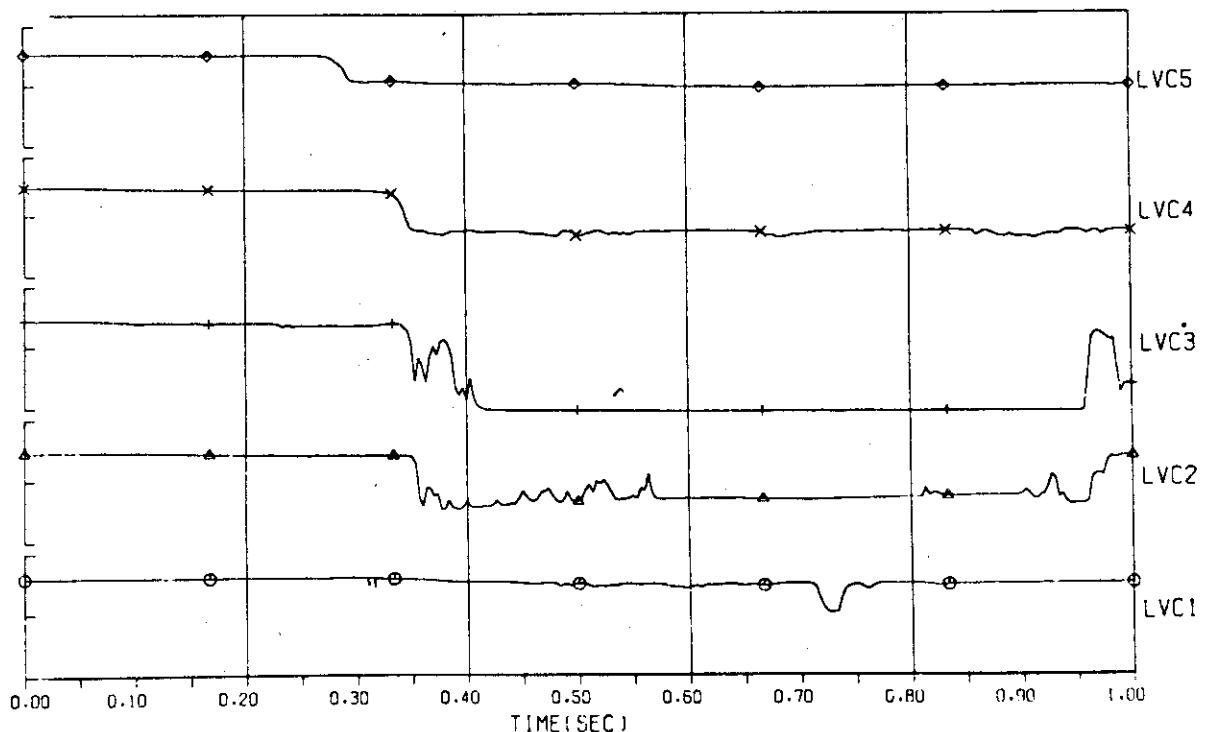
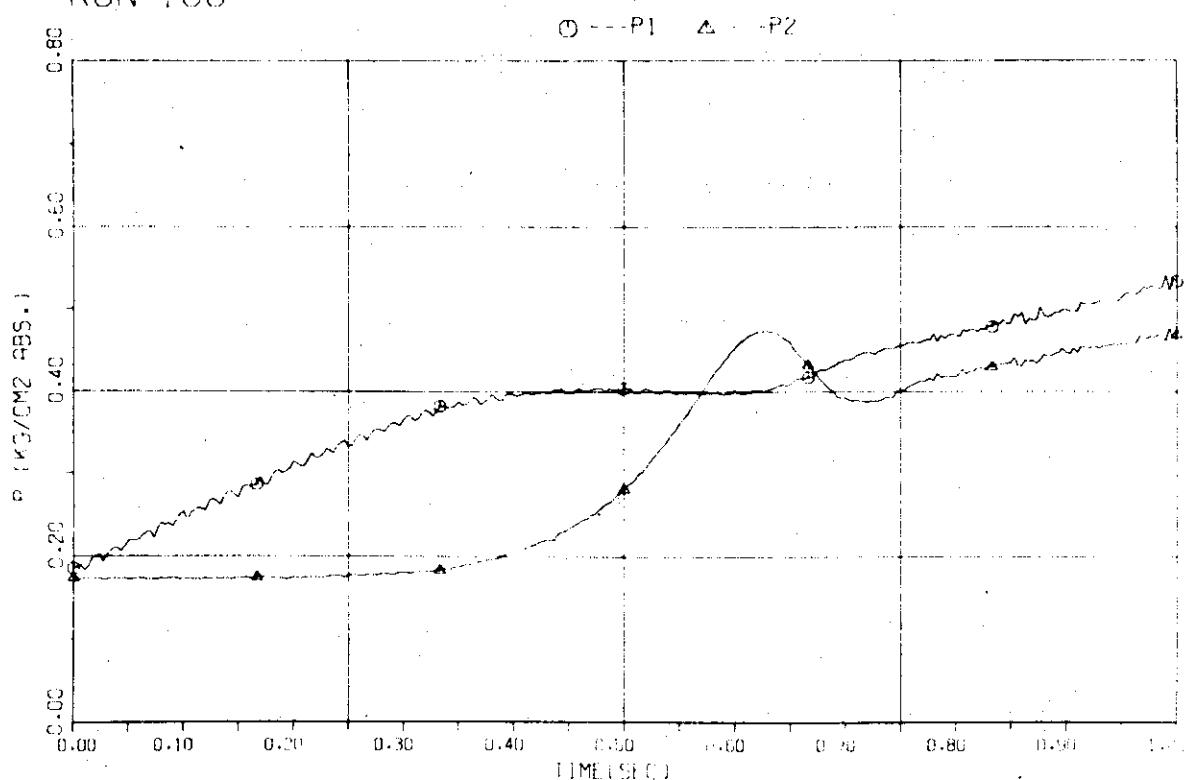


Fig. 4.22 Water level signals vs. time, Run 153

RUN 160



RUN 160

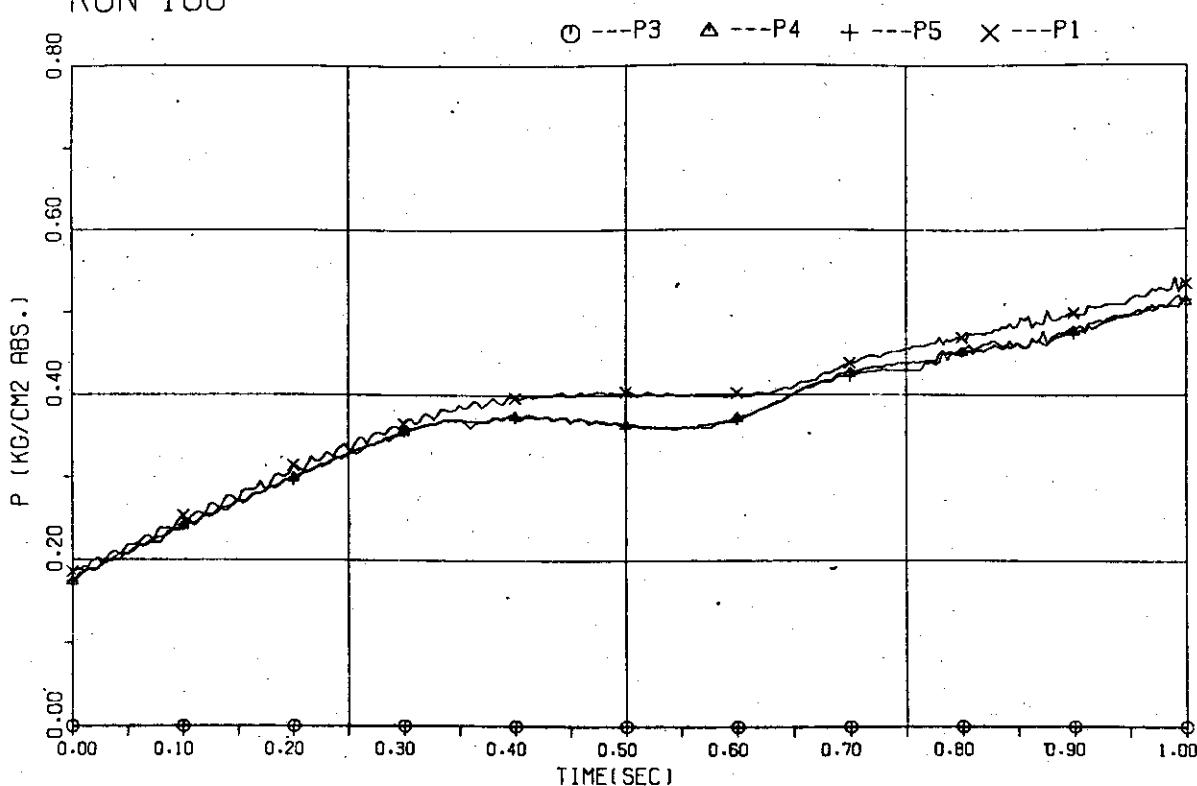


Fig. 4.23 Containment pressure transients, Run 160

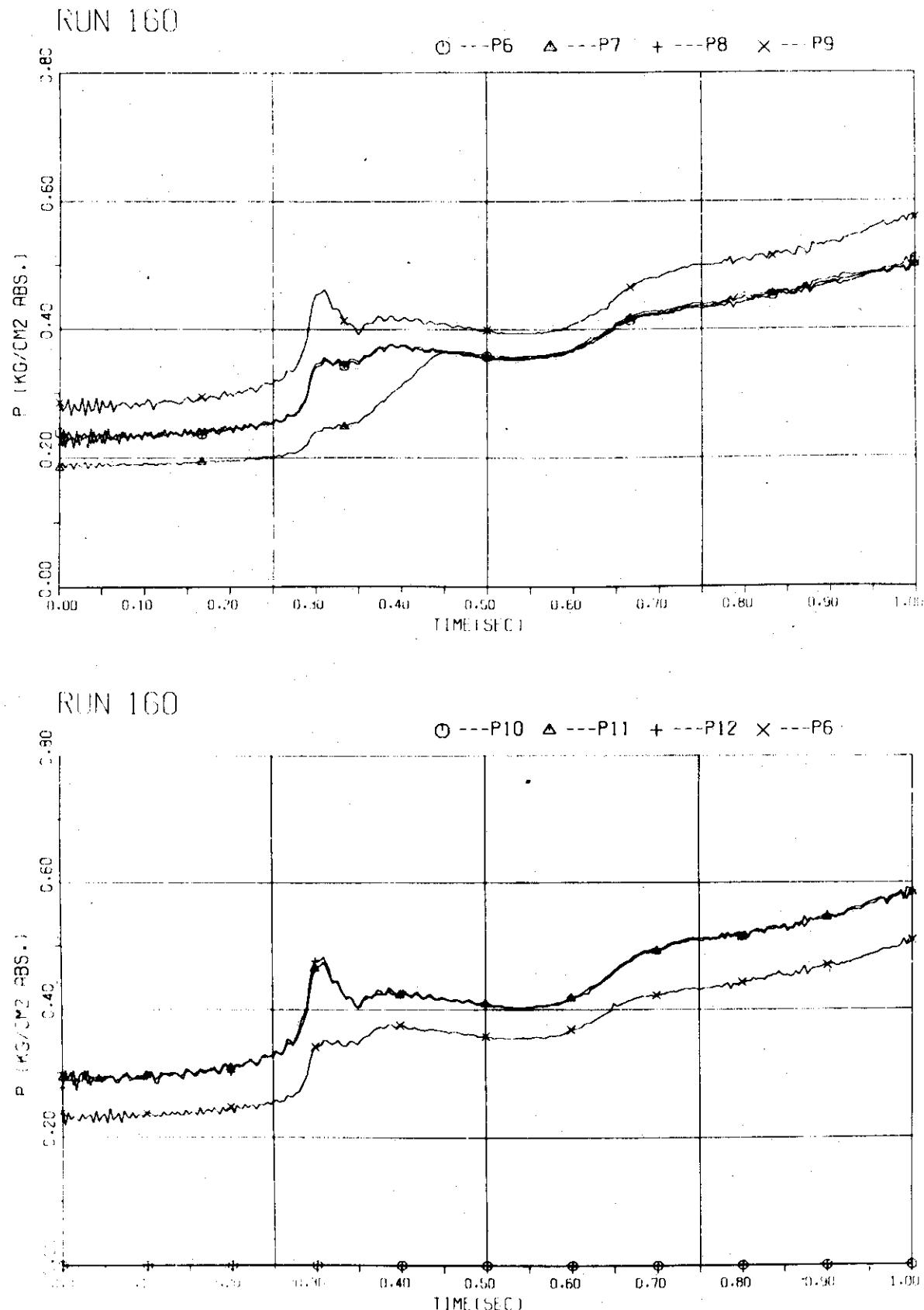
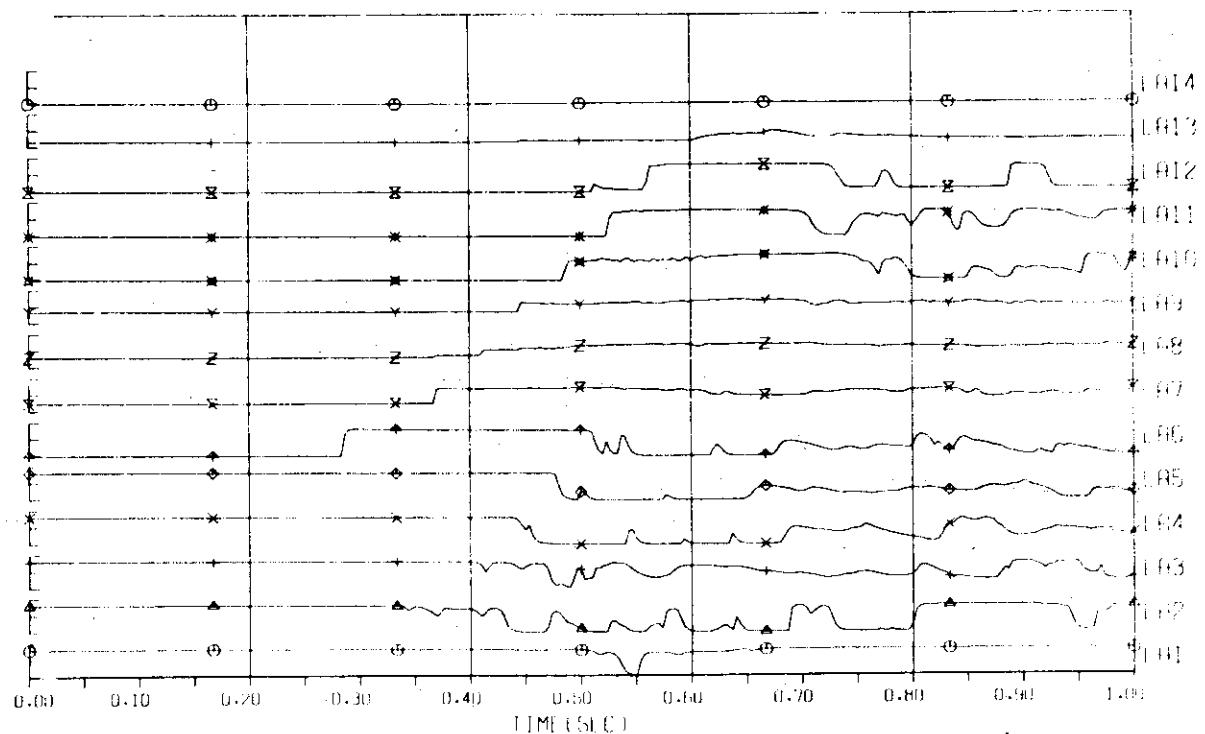


Fig. 4.24 Containment pressure transients, Run 160

RUN 160

LEVEL SIGNAL



RUN 160

LEVEL SIGNAL

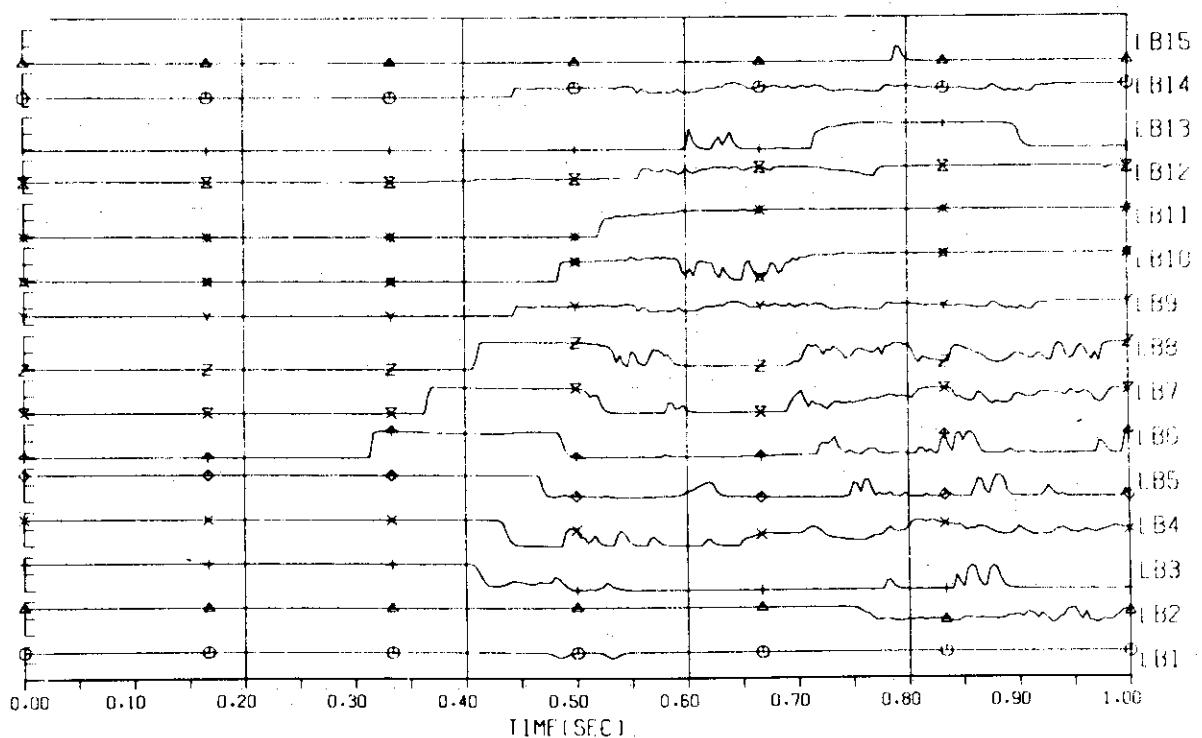
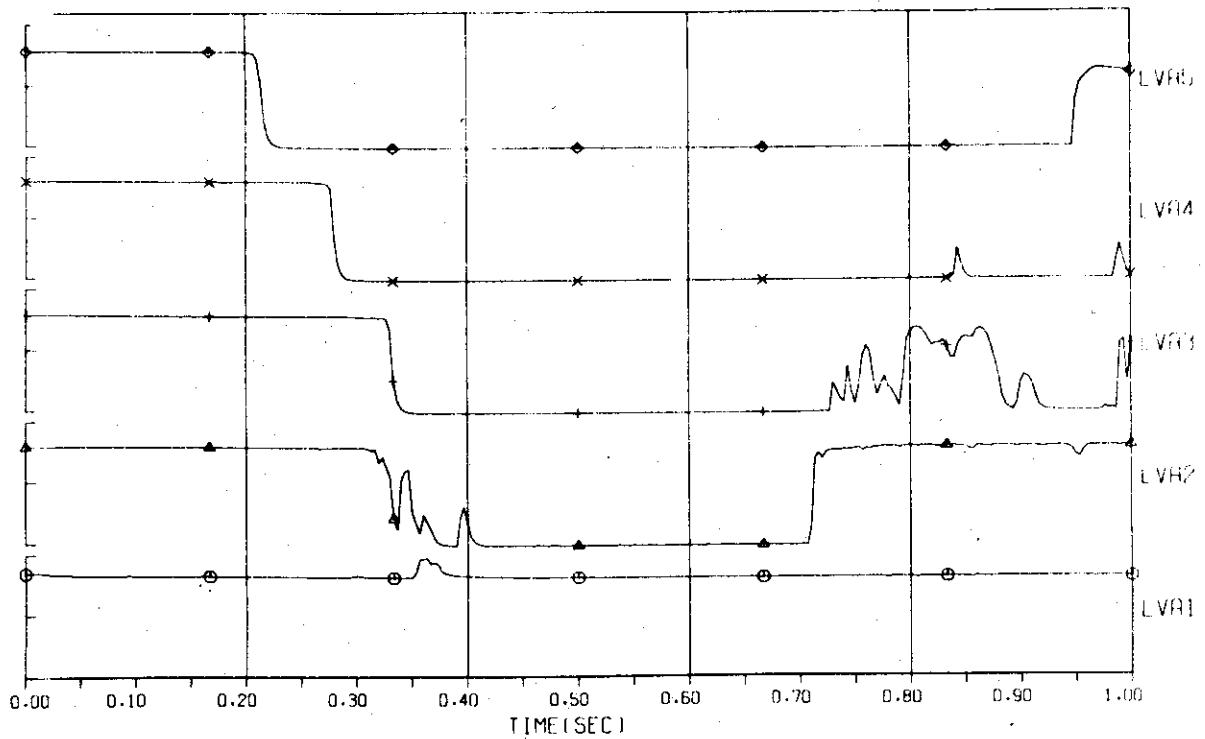


Fig. 4.25 Water level signals vs. time, Run 160

RUN 160

LEVEL SIGNAL



RUN 160

LEVEL SIGNAL

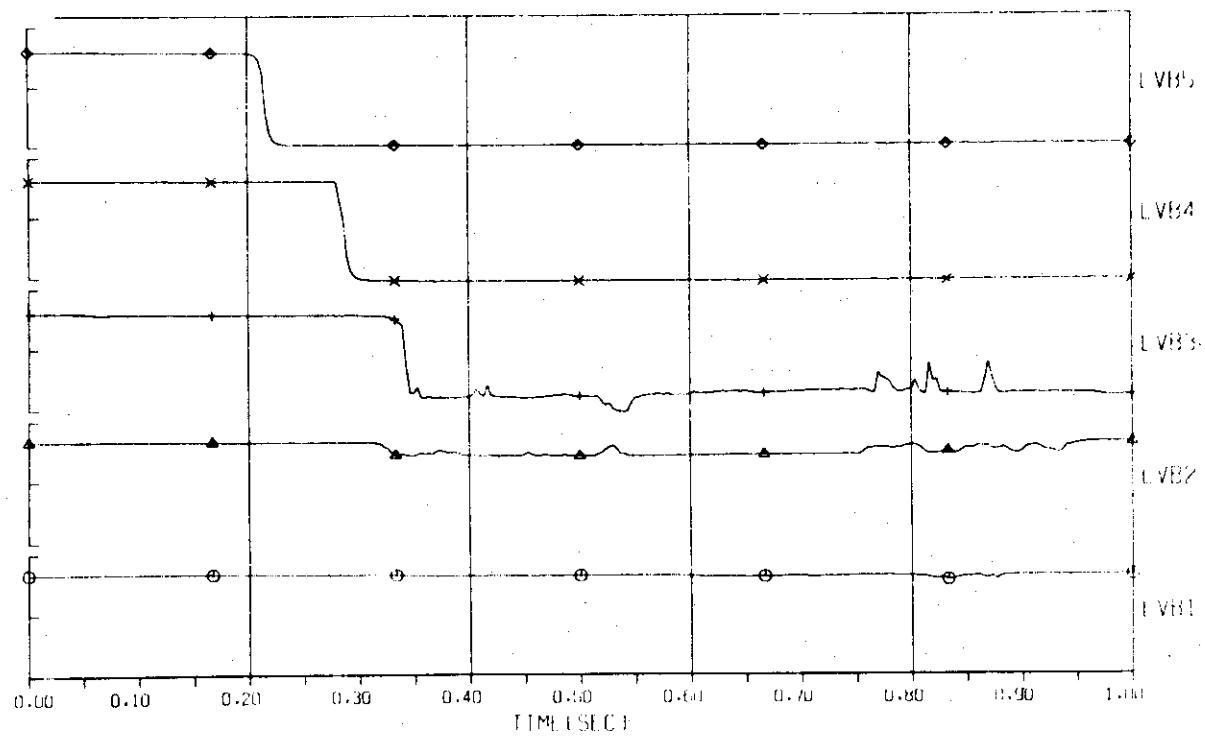


Fig. 4.26 Water level signals vs. time, Run 160

RUN 160

LEVEL SIGNAL

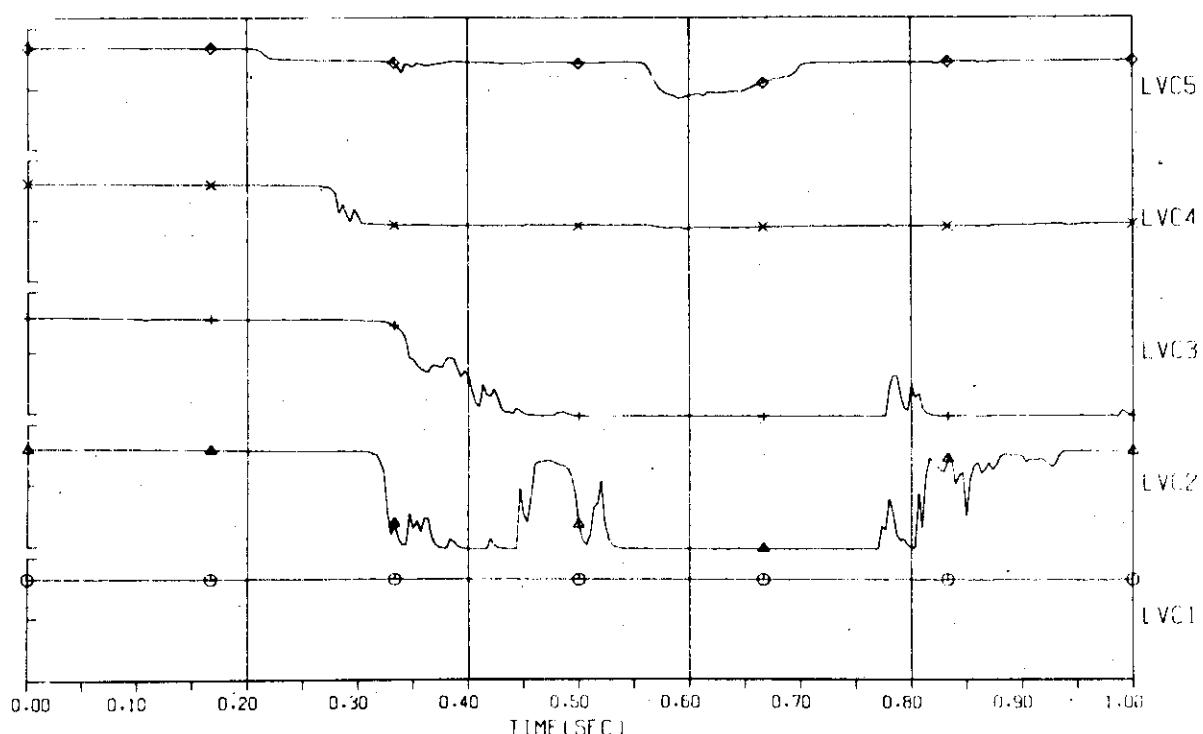


Fig. 4.27 Water level signals vs. time, Run 160

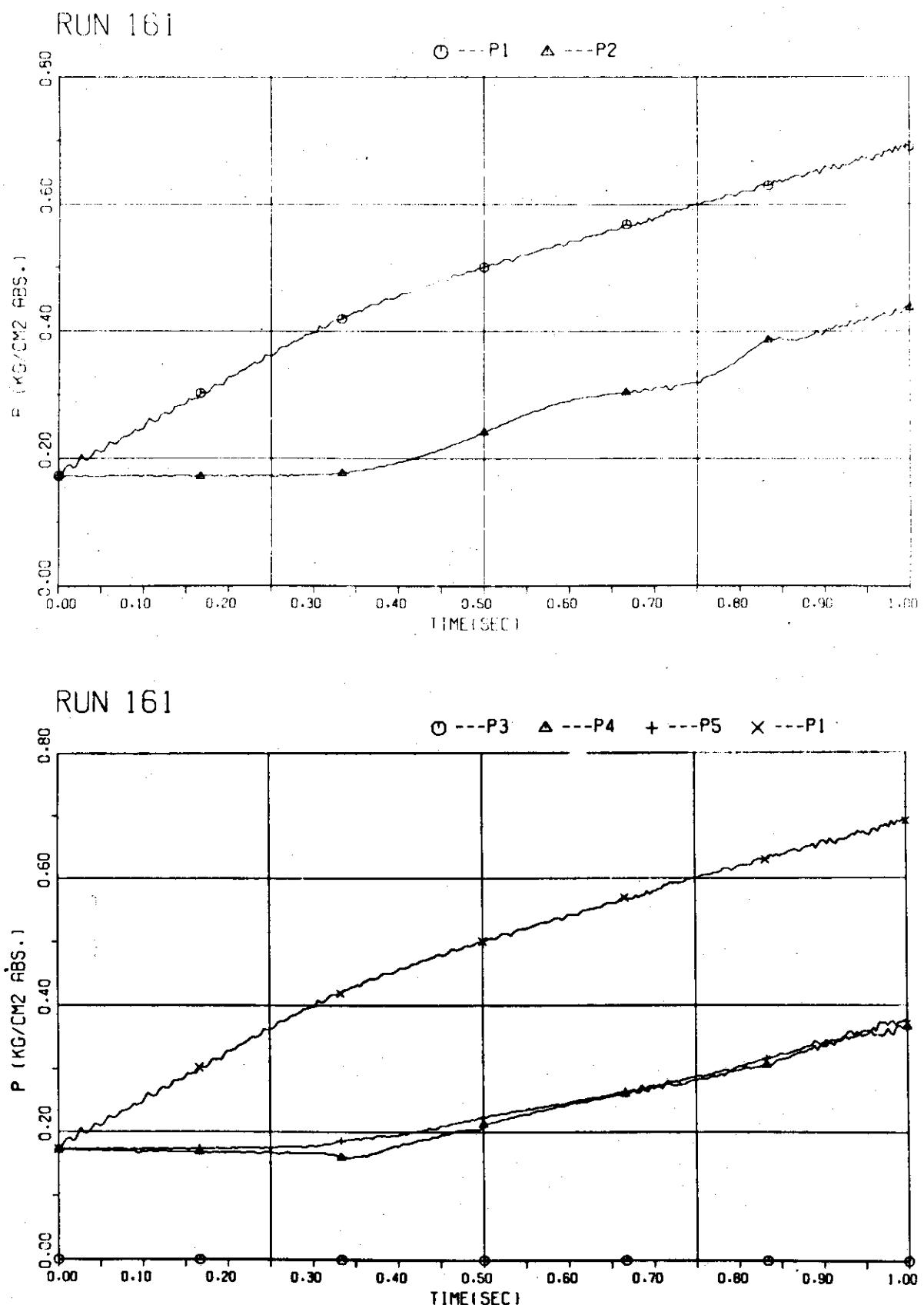


Fig. 4.28 Containment pressure transients, Run 161

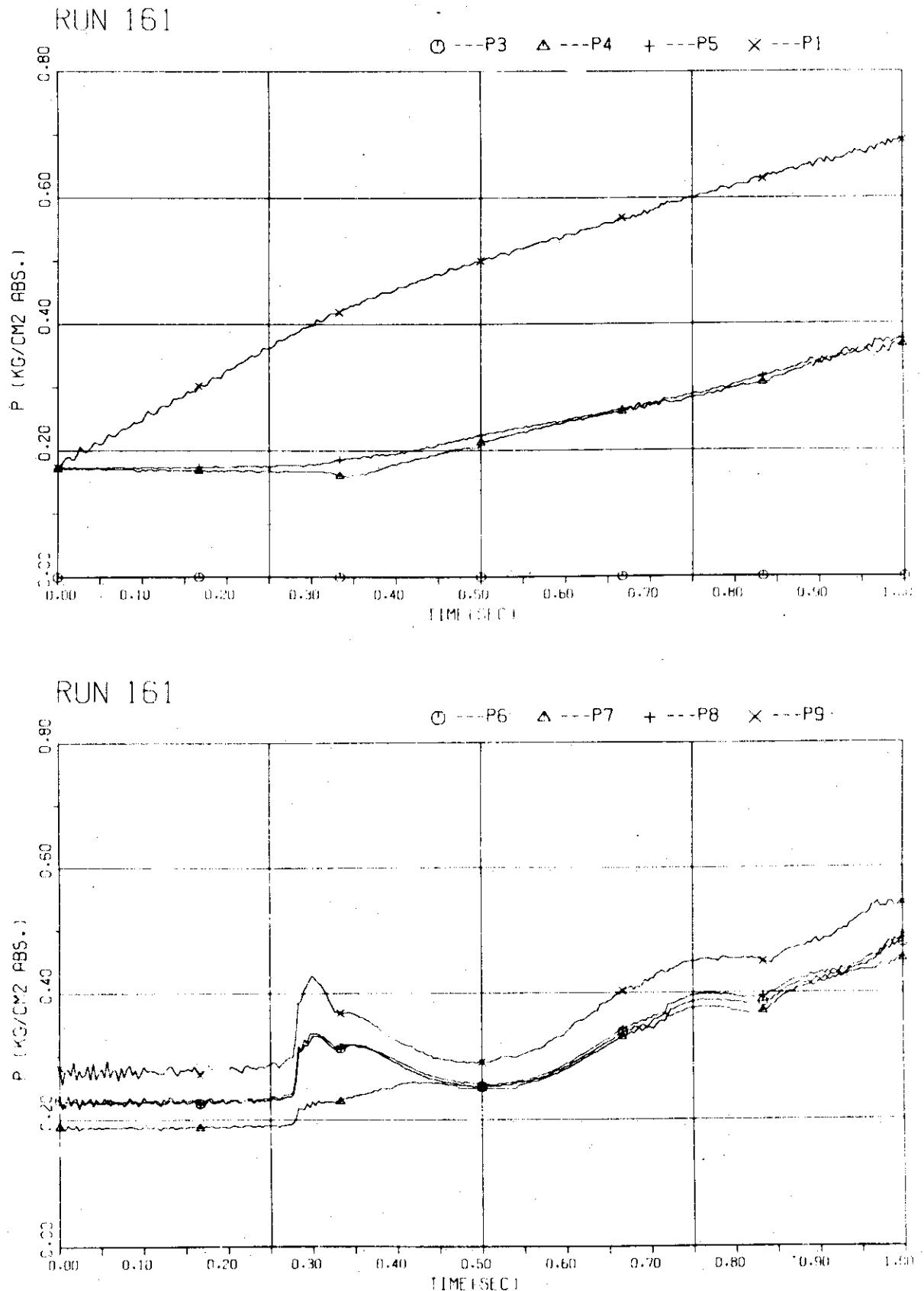
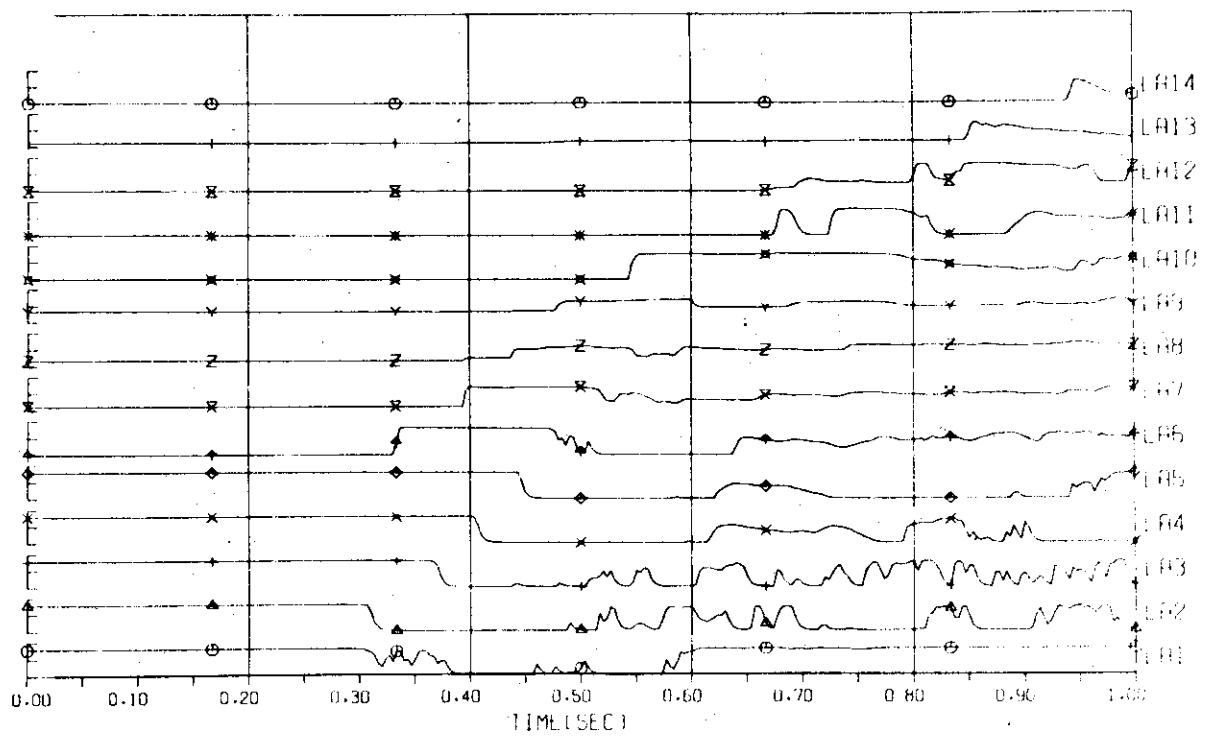


Fig. 4.29 Containment pressure transients, Run 161

RUN 161

LEVEL SIGNAL



RUN 161

LEVEL SIGNAL

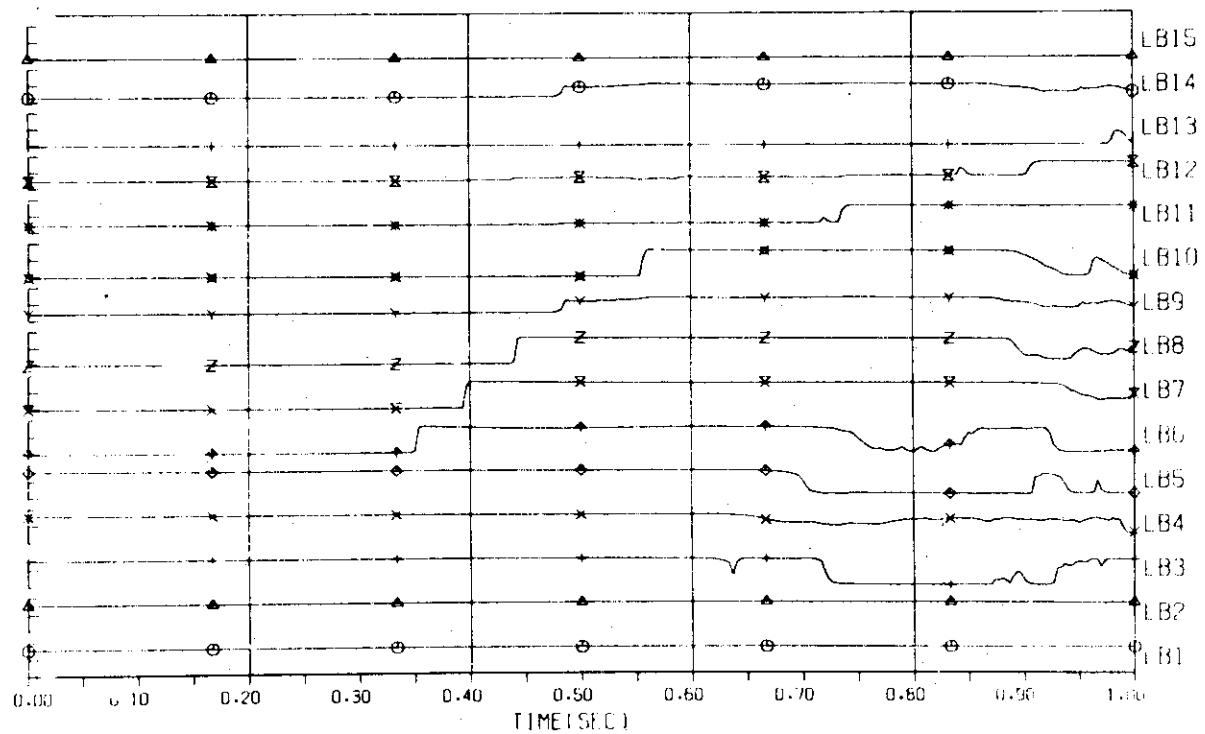


Fig. 4.30 Water level signals vs. time, Run 161

RUN 161

LEVEL SIGNAL

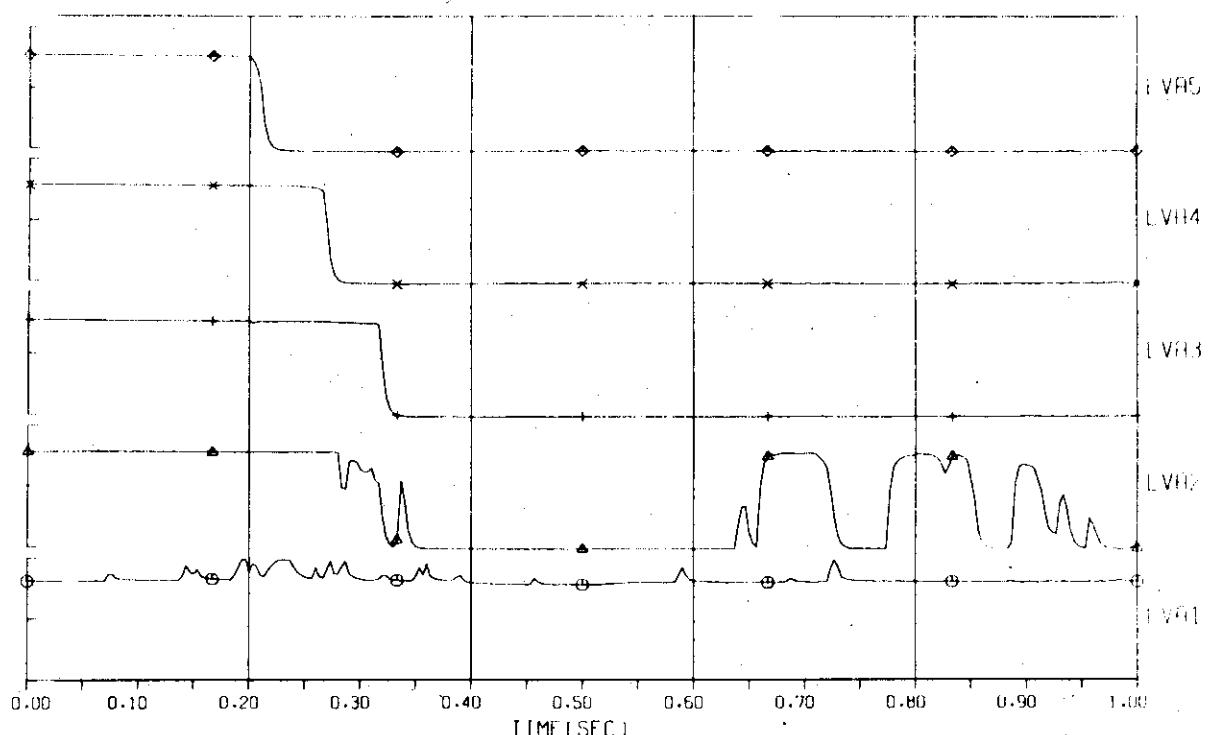
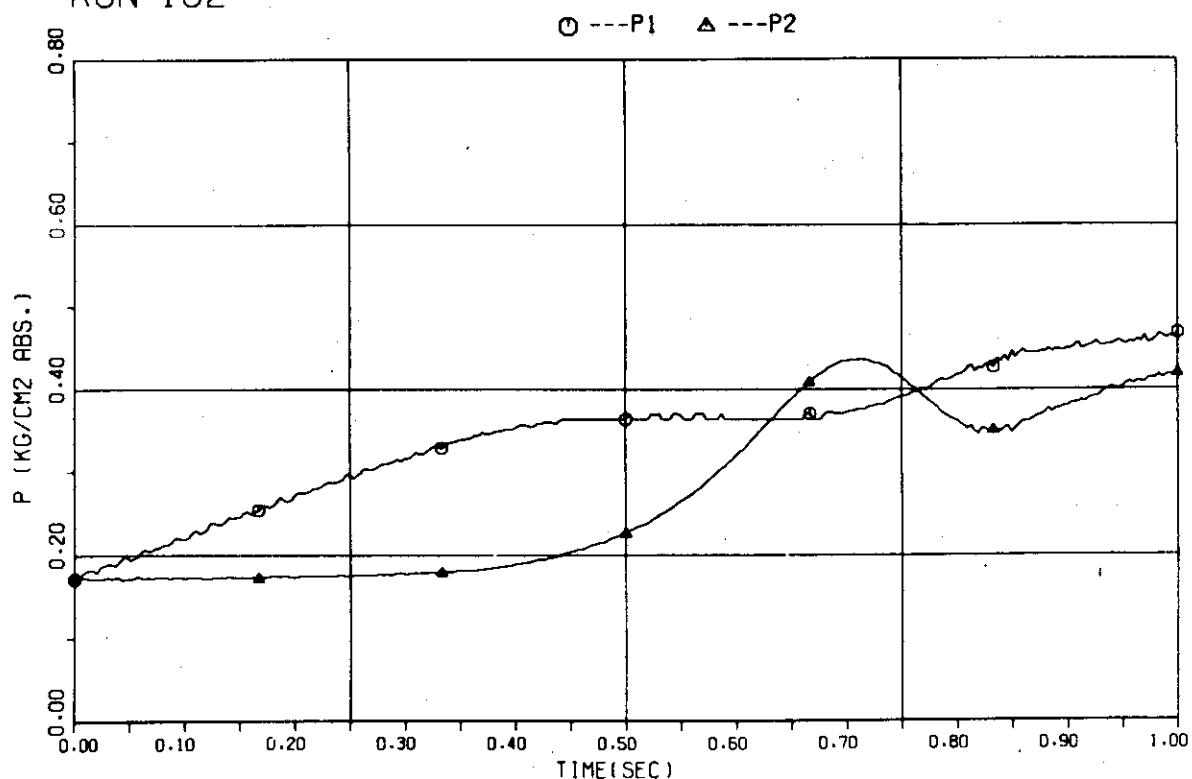


Fig. 4.31 Water level signals vs. time, Run 161

RUN 162



RUN 162

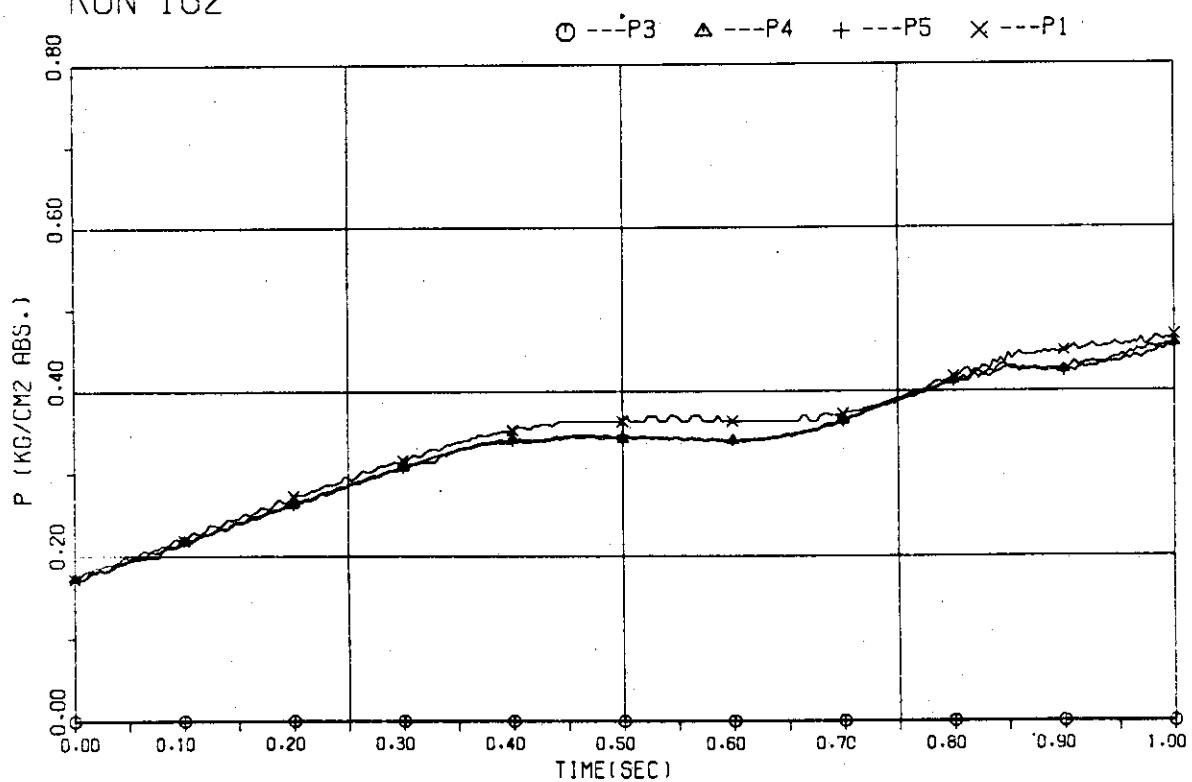
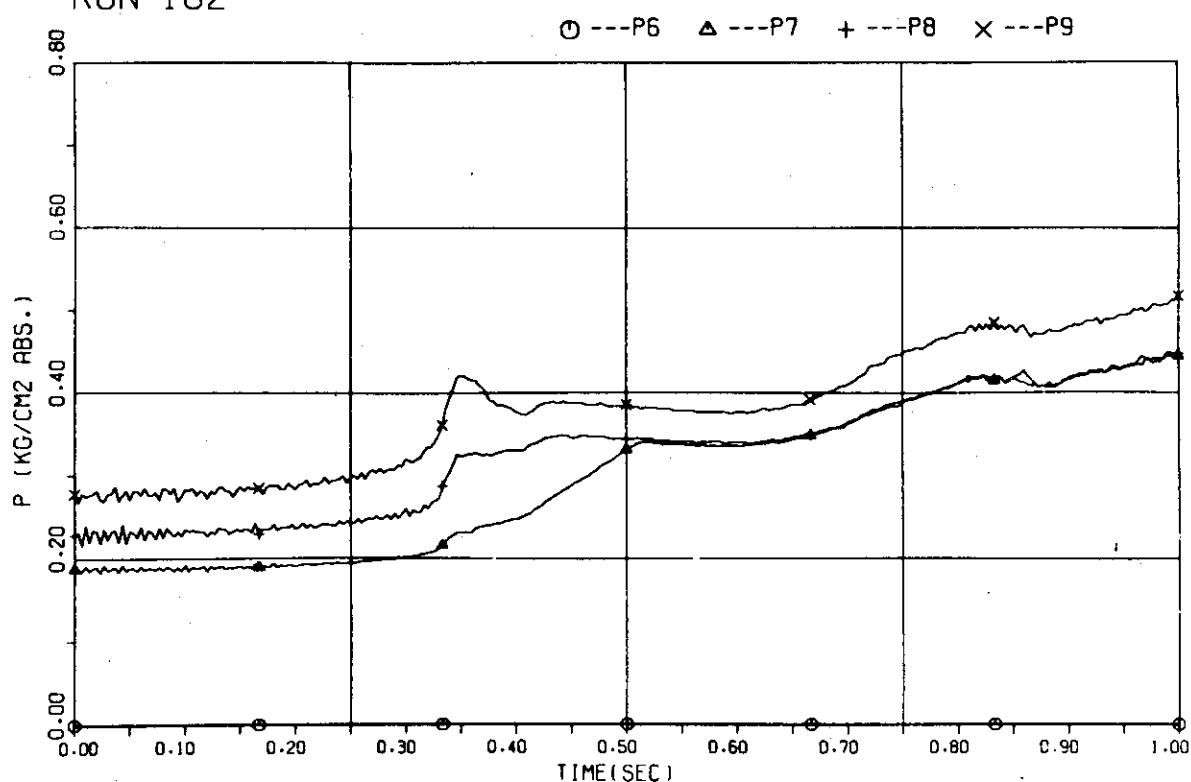


Fig. 4.32 Containment pressure transients, Run 162

RUN 162



RUN 162

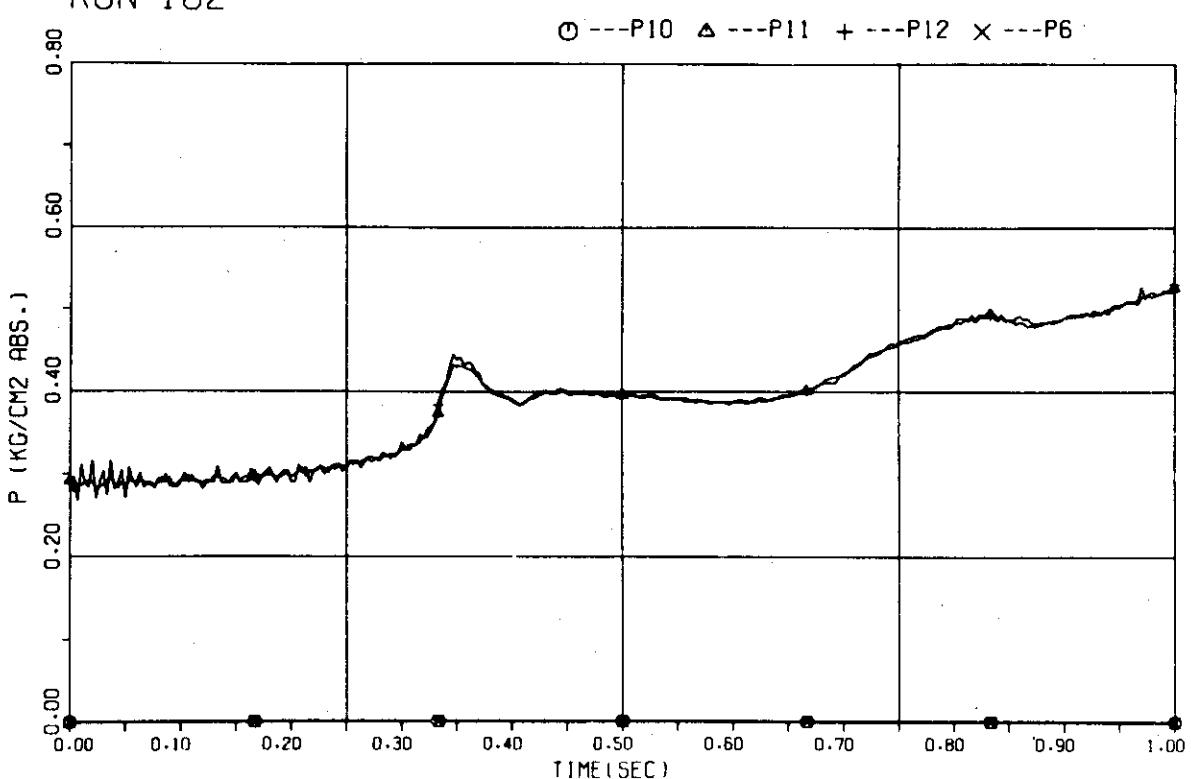
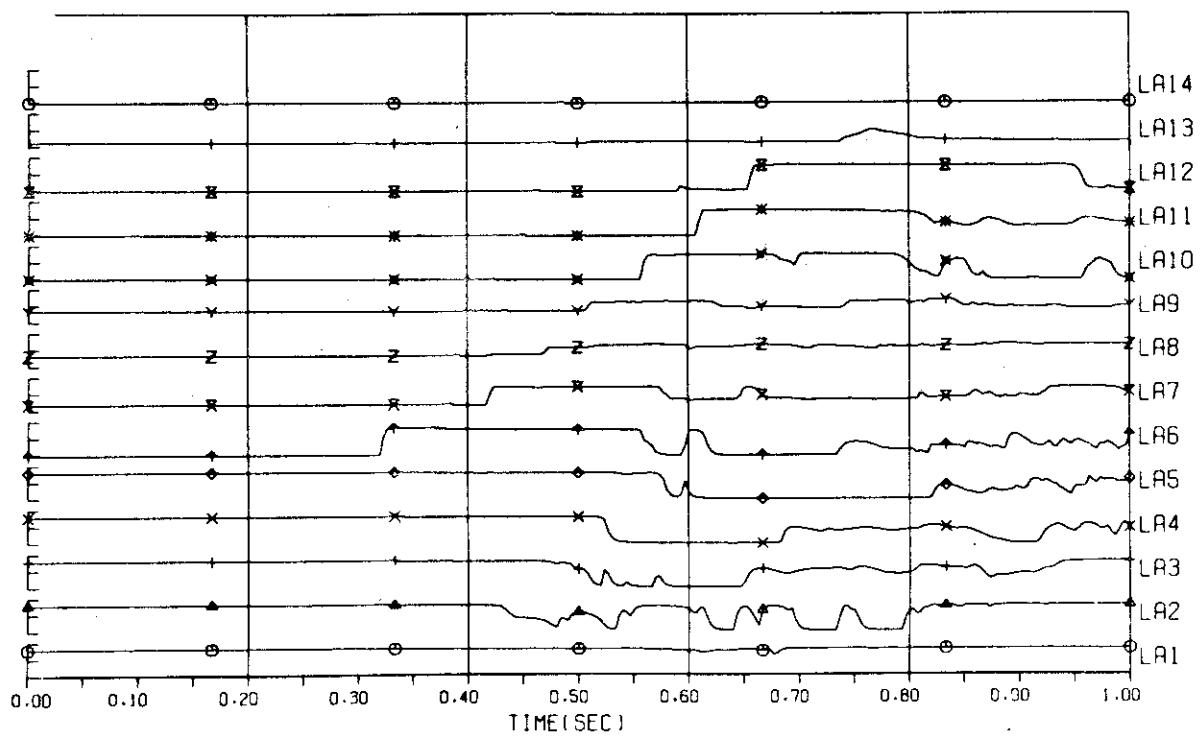


Fig. 4.33 Containment pressure transients, Run 162

RUN 162

LEVEL SIGNAL



RUN 162

LEVEL SIGNAL

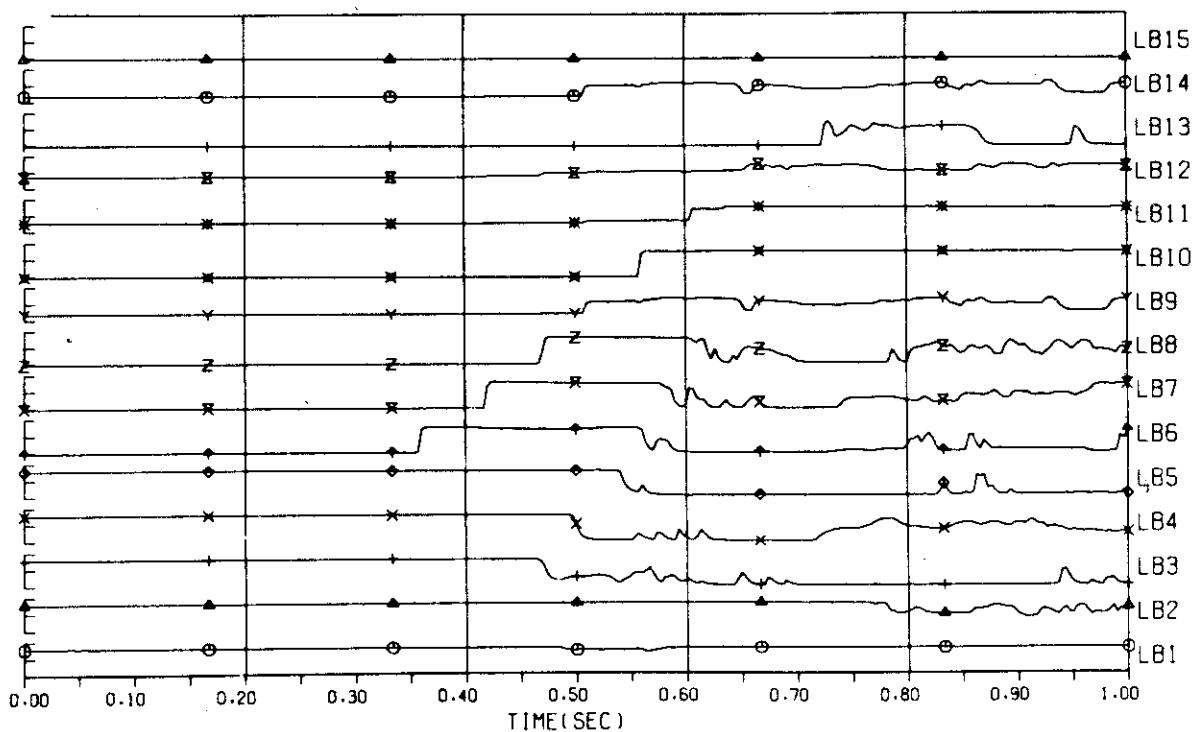
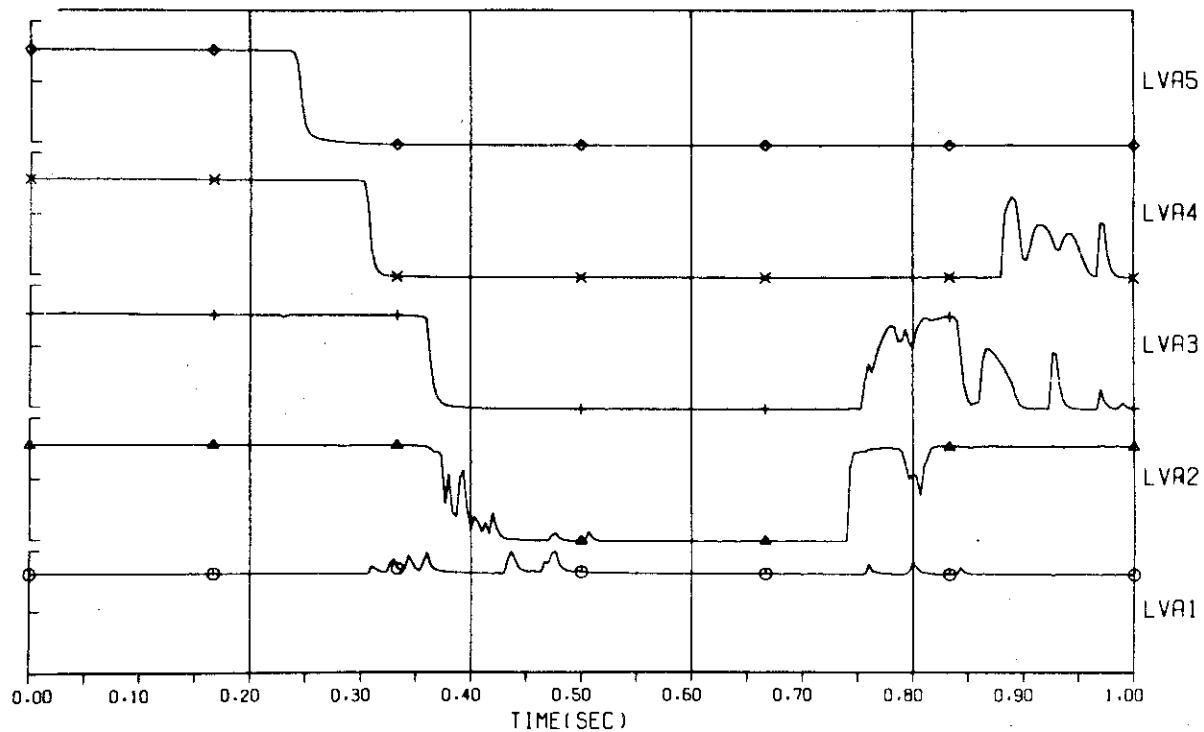


Fig. 4.34 Water level signals vs. time, Run 162

RUN 162

LEVEL SIGNAL



RUN 162

LEVEL SIGNAL

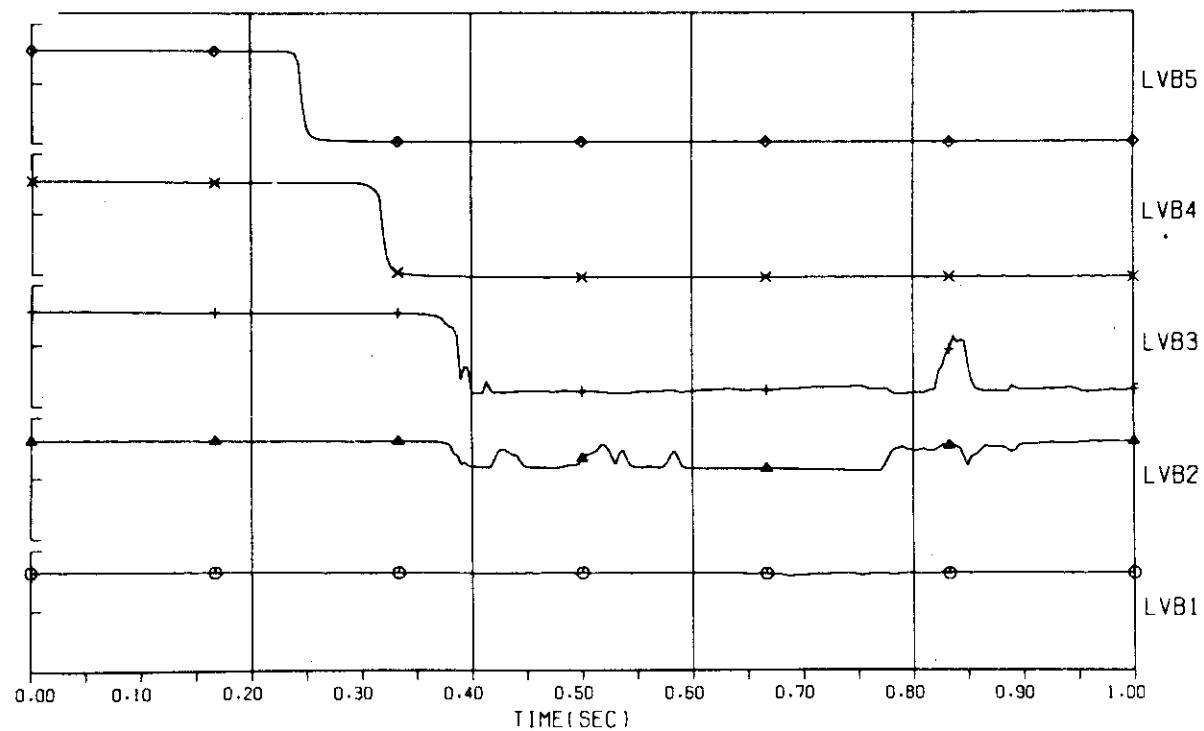


Fig. 4.35 Water level signals vs. time, Run 162

RUN 162

LEVEL SIGNAL

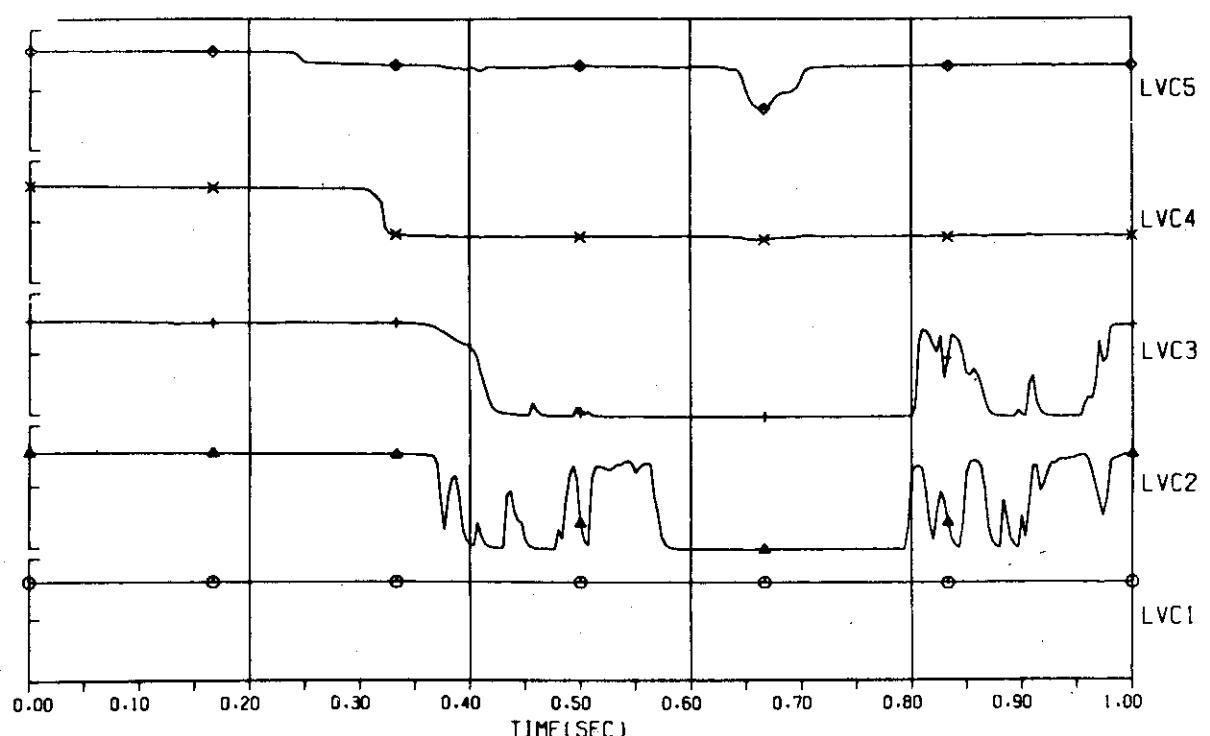


Fig. 4.36 Water level signals vs. time, Run 162

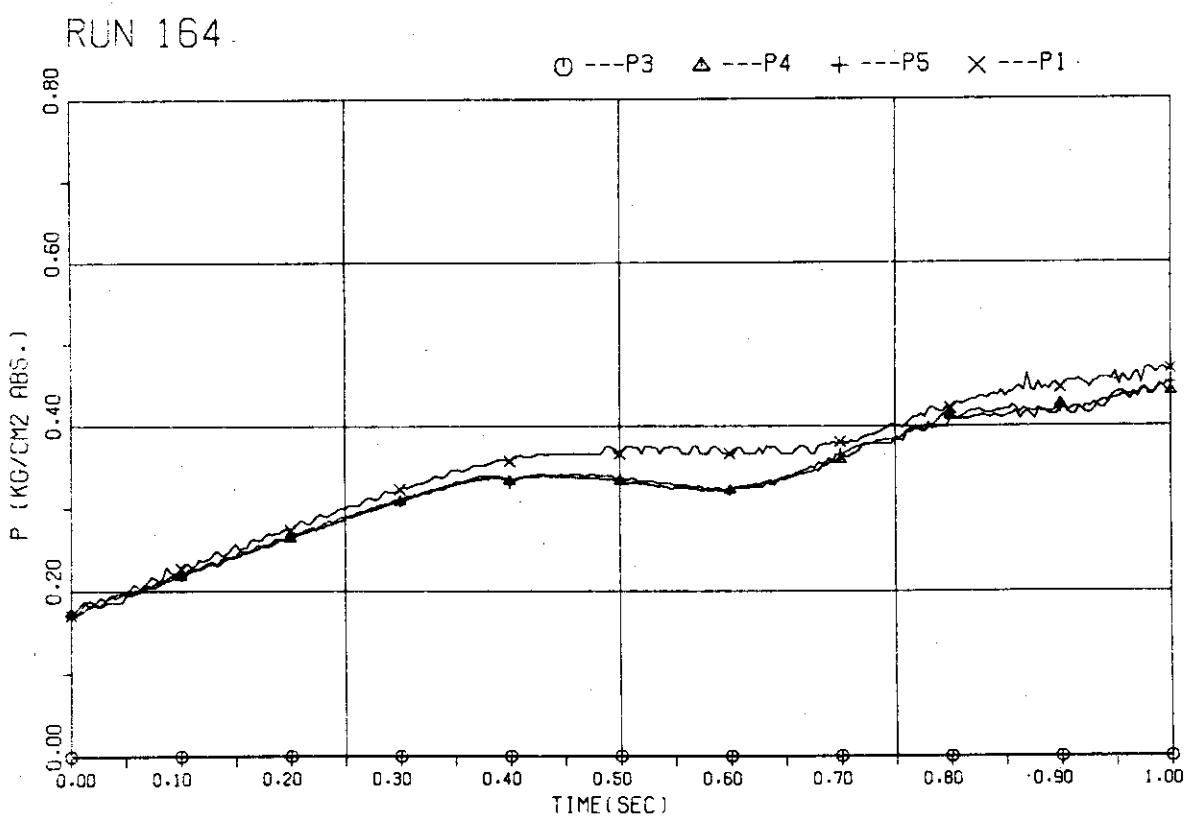
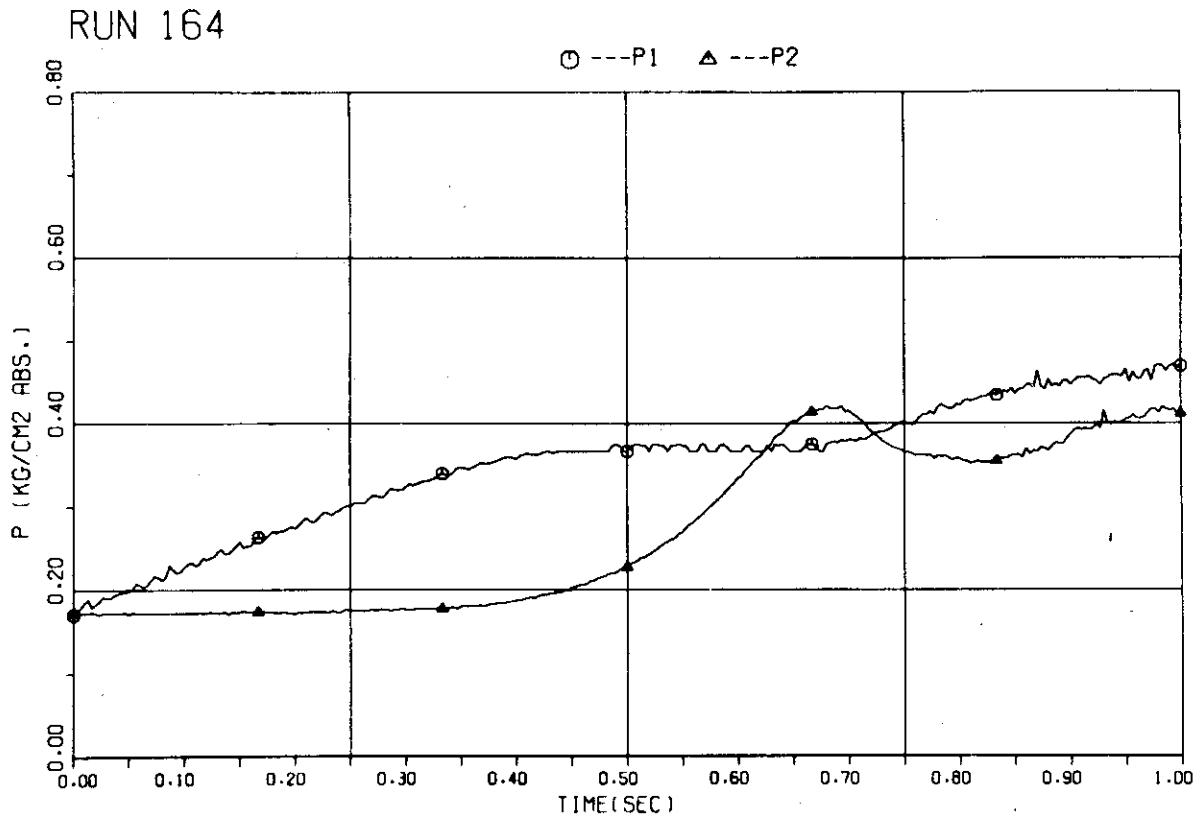


Fig. 4.37 Containment pressure transients, Run 164

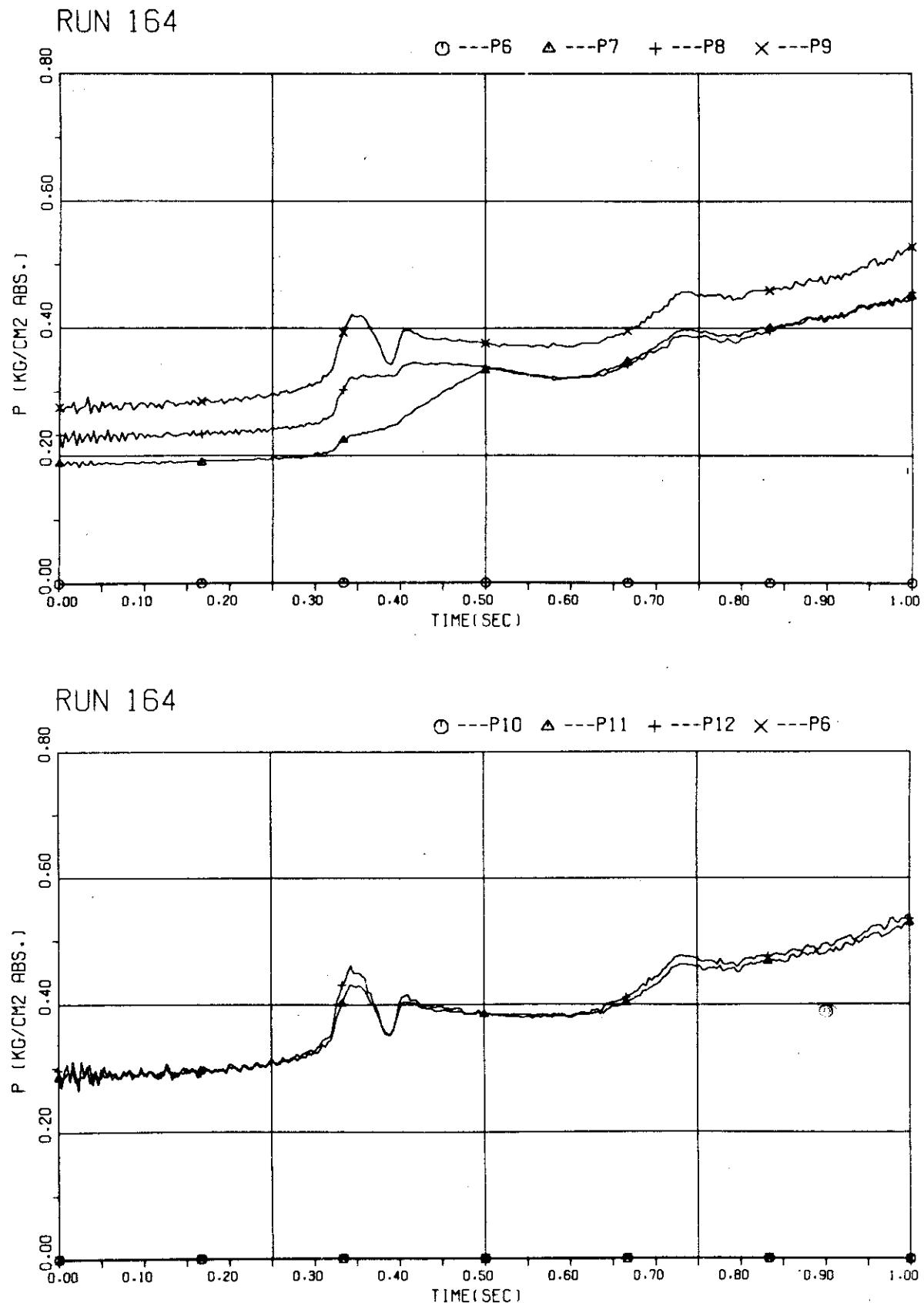
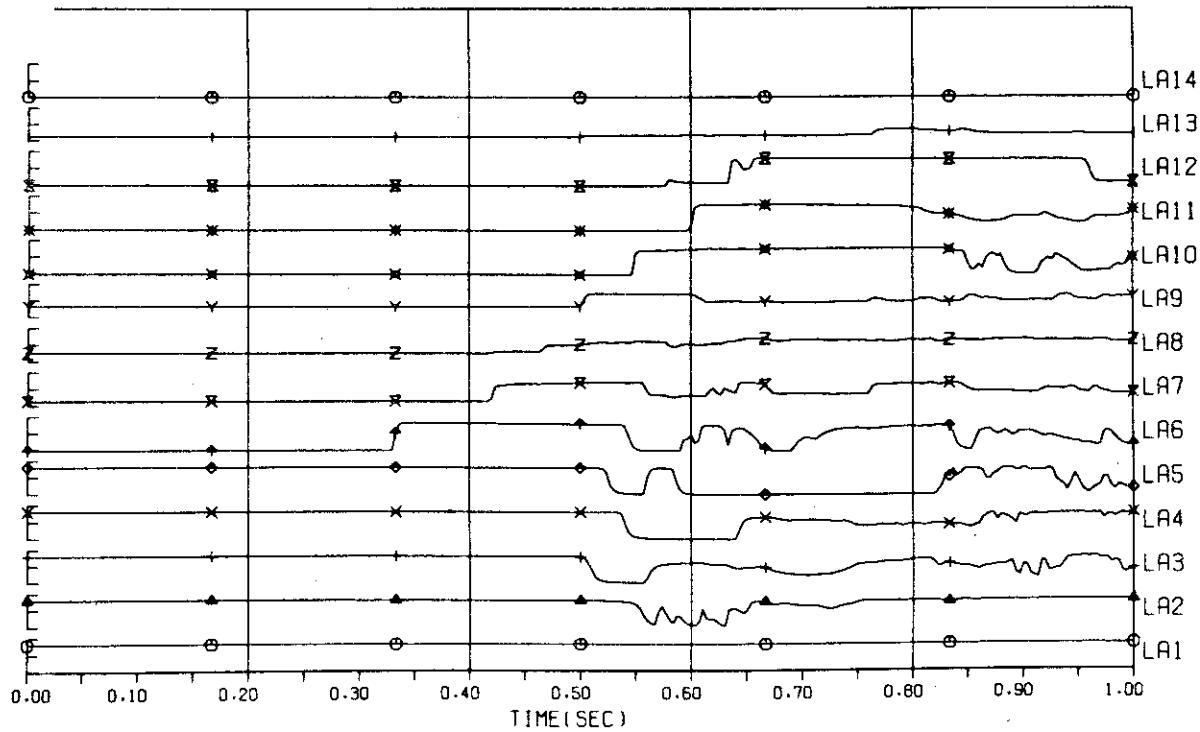


Fig. 4.38 Containment pressure transients, Run 164

RUN 164

LEVEL SIGNAL



RUN 164

LEVEL SIGNAL

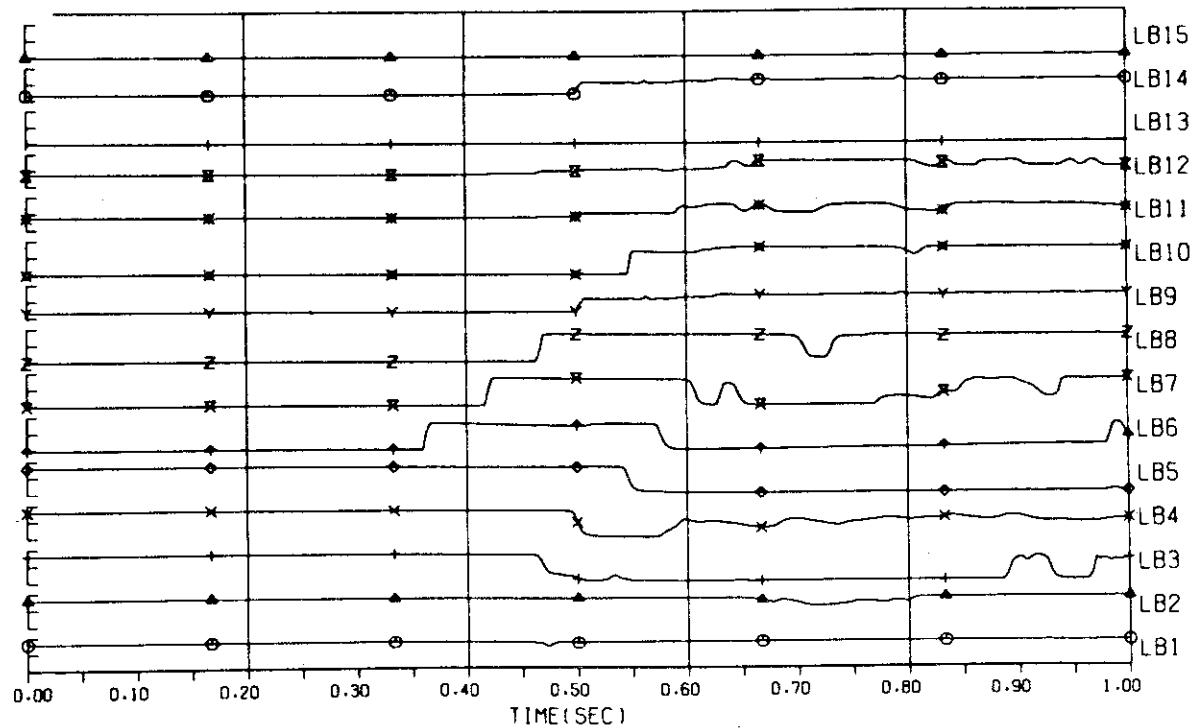
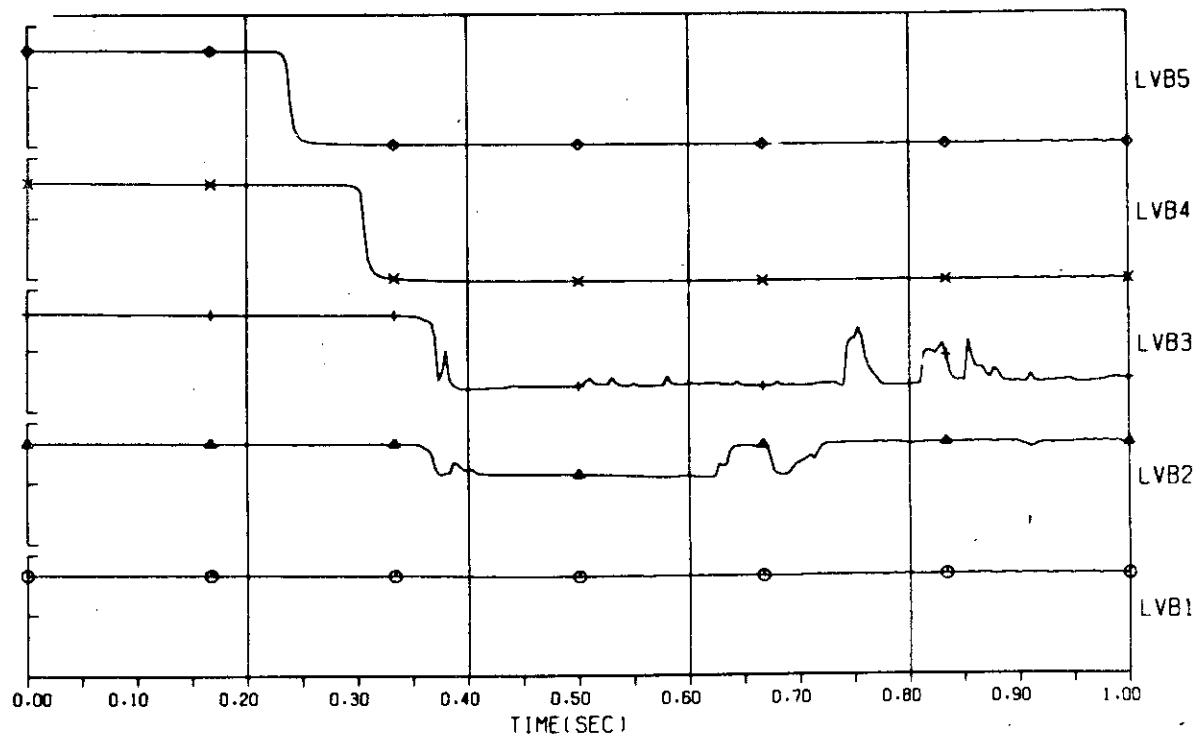


Fig. 4.39 Water level signals vs. time, Run 164

RUN 164

LEVEL SIGNAL



RUN 164

LEVEL SIGNAL

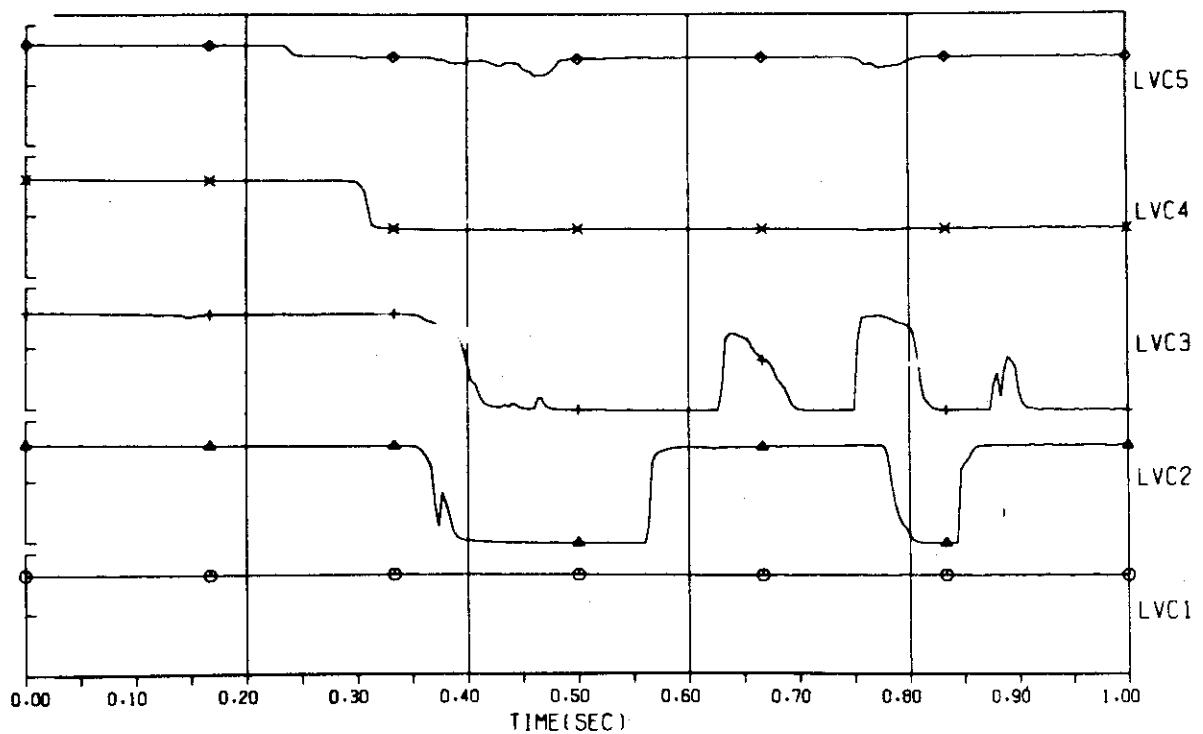
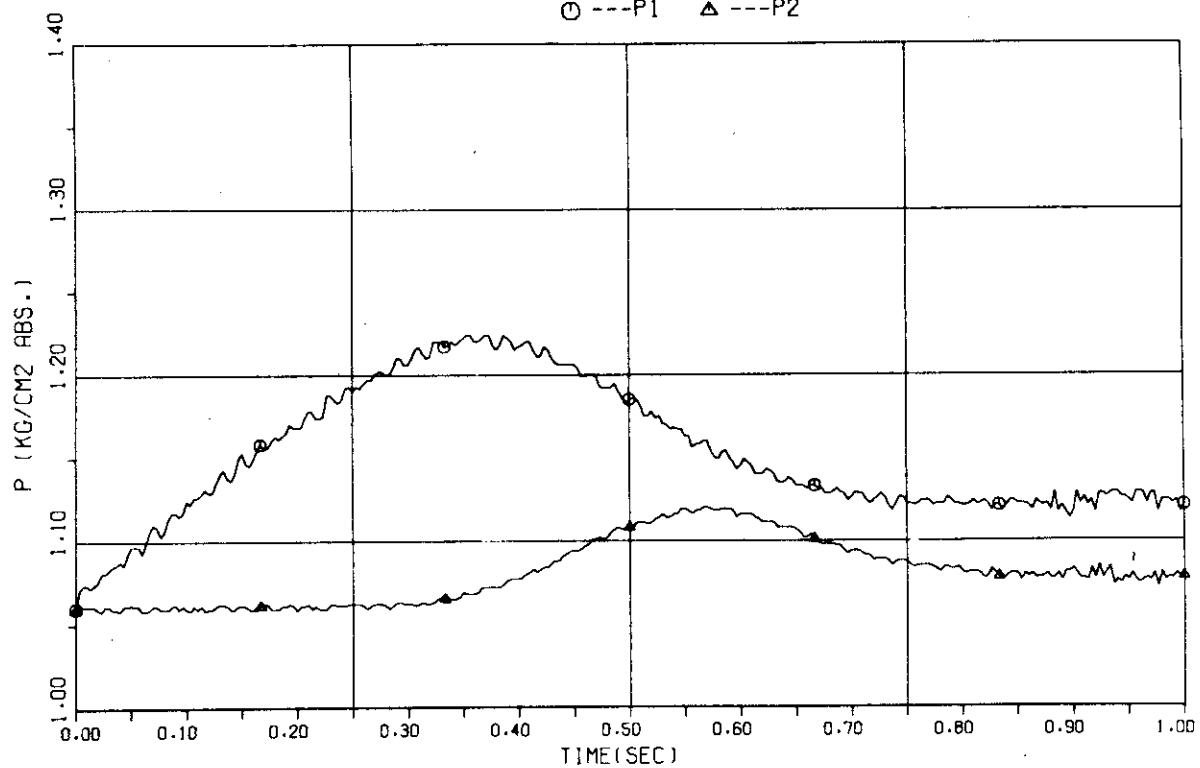


Fig. 4.40 Water level signals vs. time, Run 164

RUN 165

○ ---P1 △ ---P2



RUN 165

○ ---P3 △ ---P4 + ---P5 X ---P1

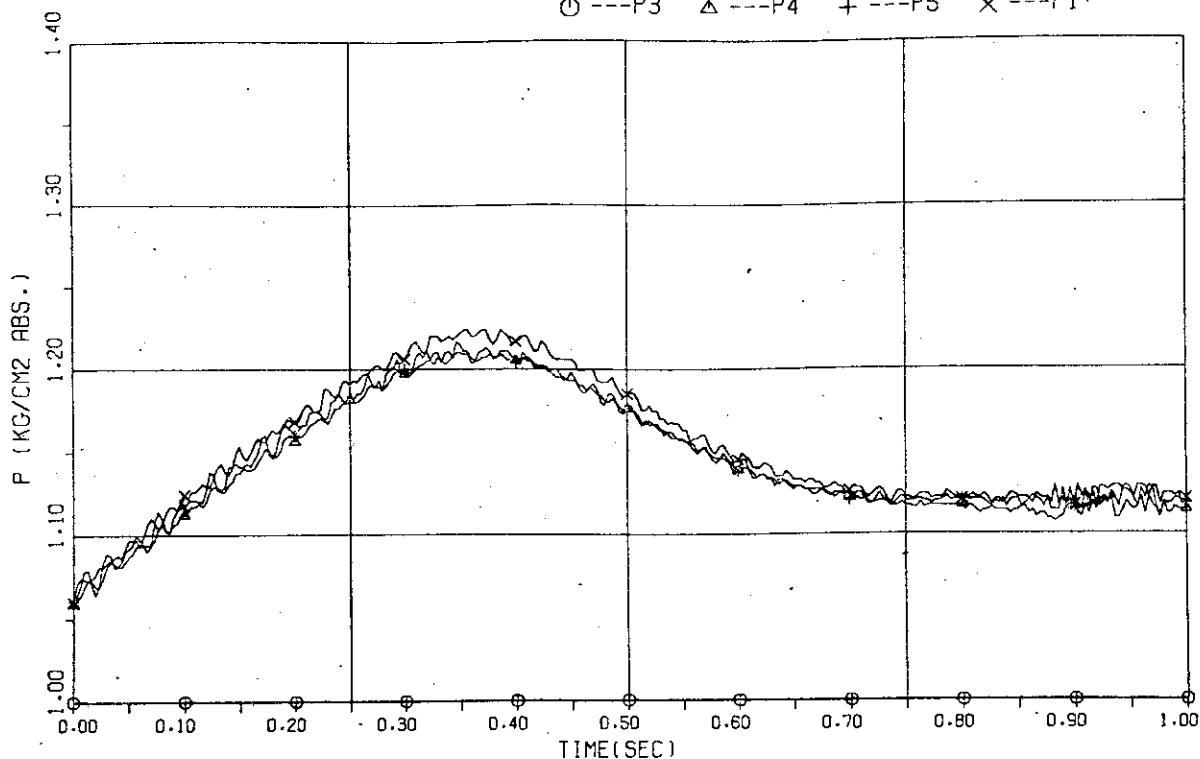


Fig. 4.41 Containment pressure transients, Run 165

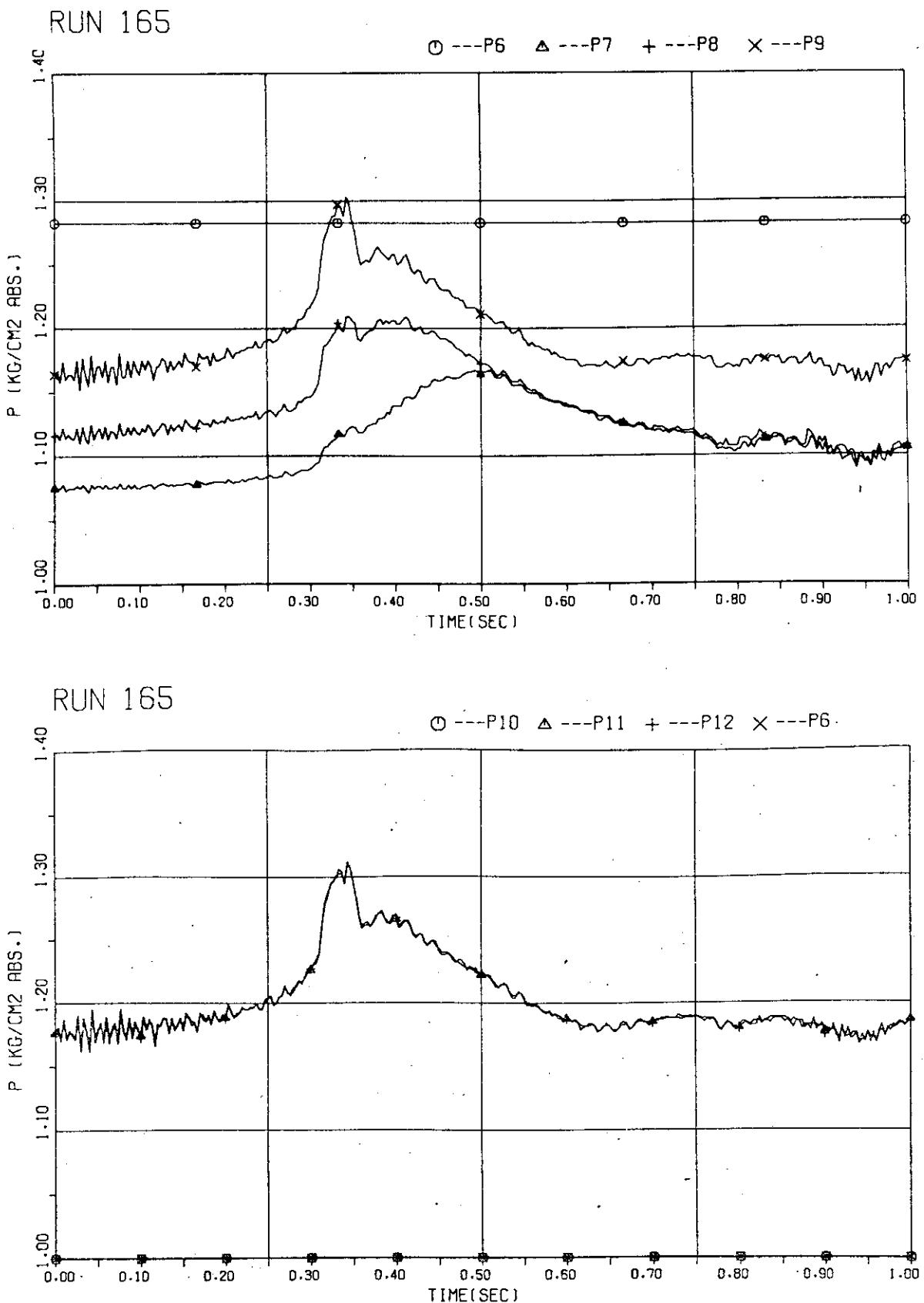
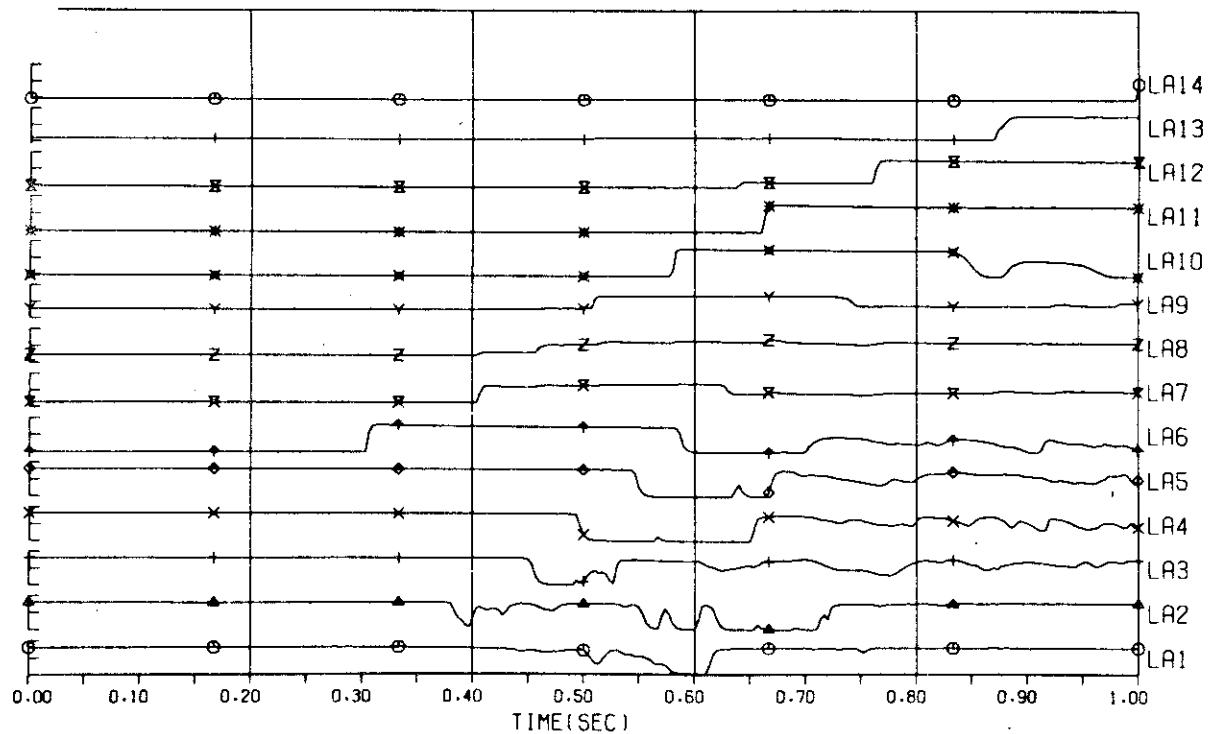


Fig. 4.42 Containment pressure transients, Run 165

RUN 165

LEVEL SIGNAL



RUN 165

LEVEL SIGNAL

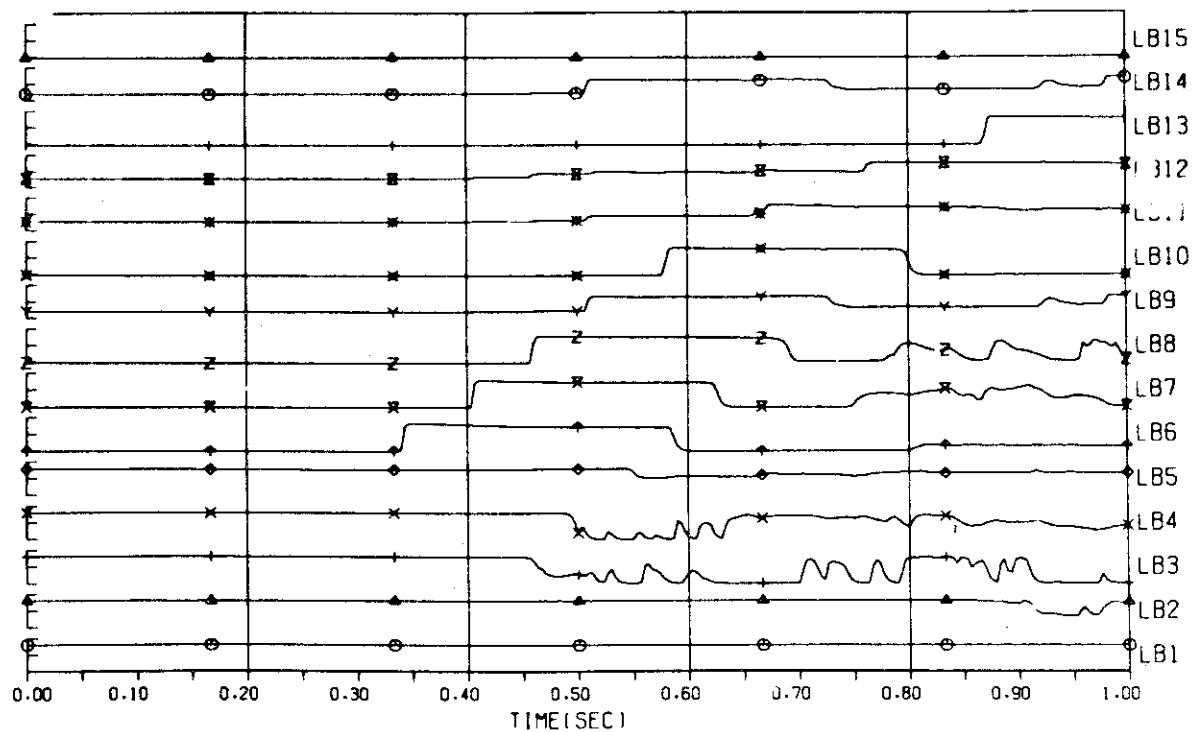
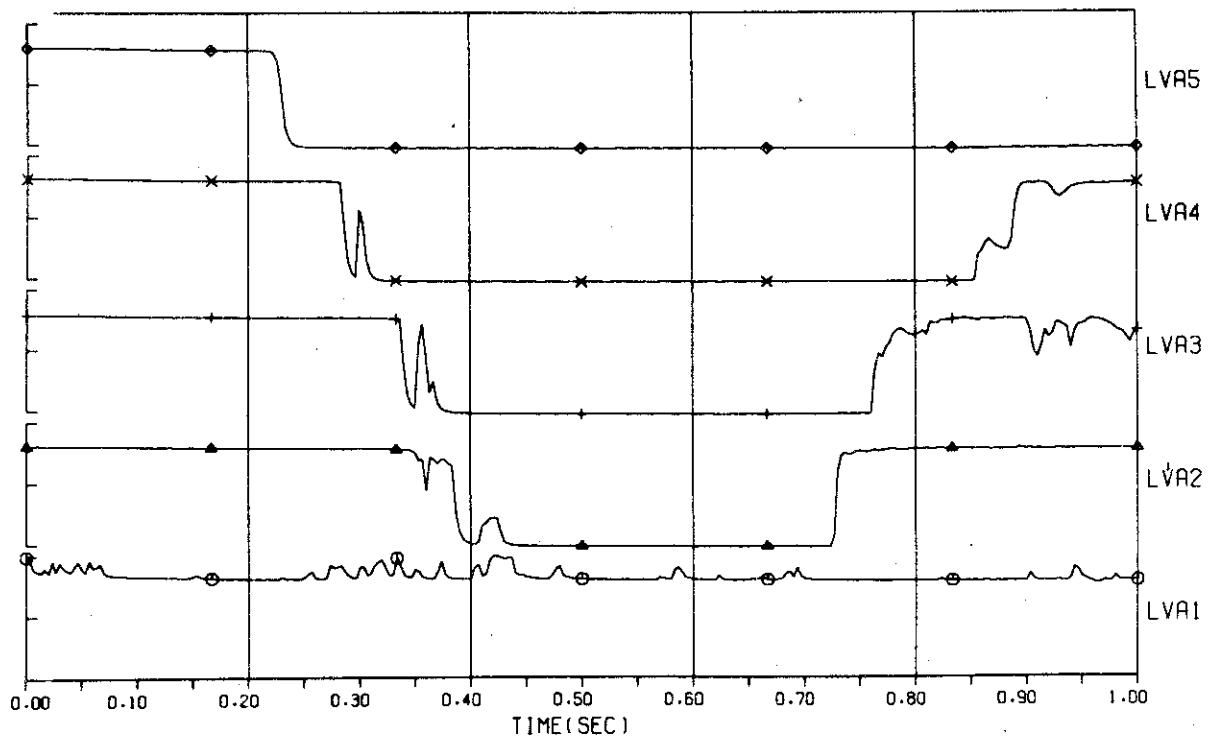


Fig. 4.43 Water level signals vs. time, Run 165

RUN 165

LEVEL SIGNAL



RUN 165

LEVEL SIGNAL

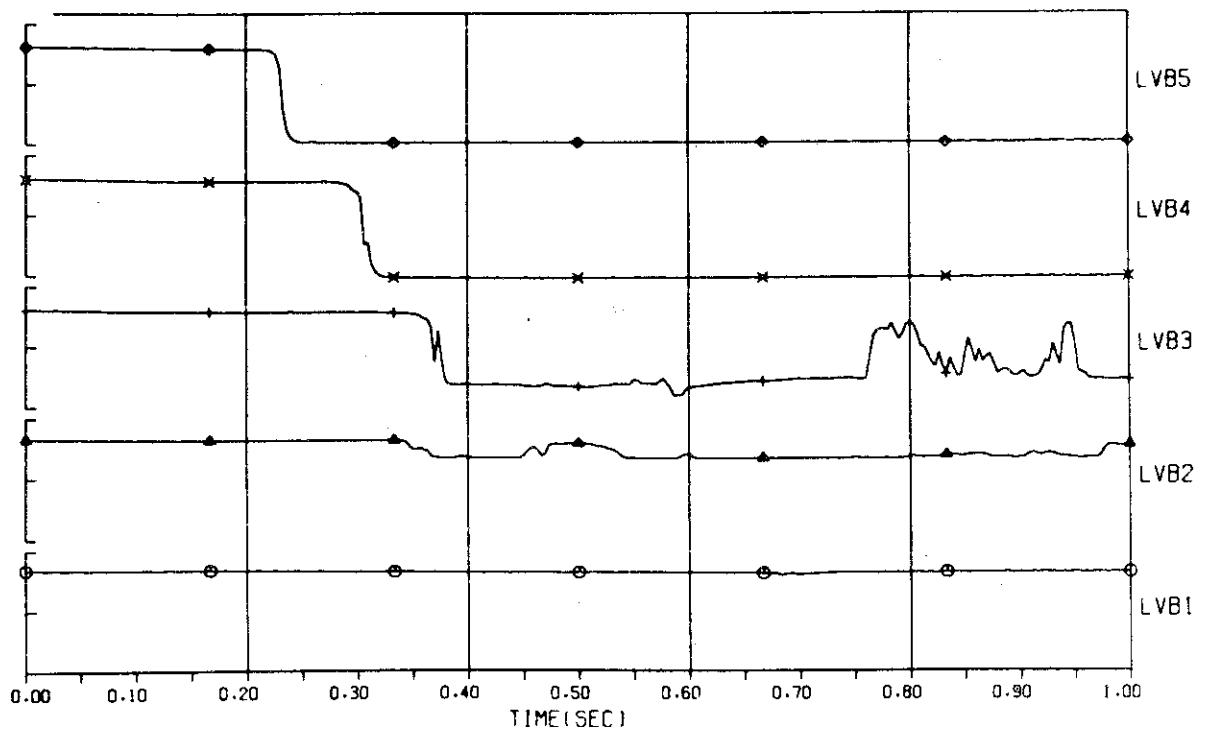


Fig. 4.44 Water level signals vs. time, Run 165

RUN 165

LEVEL SIGNAL

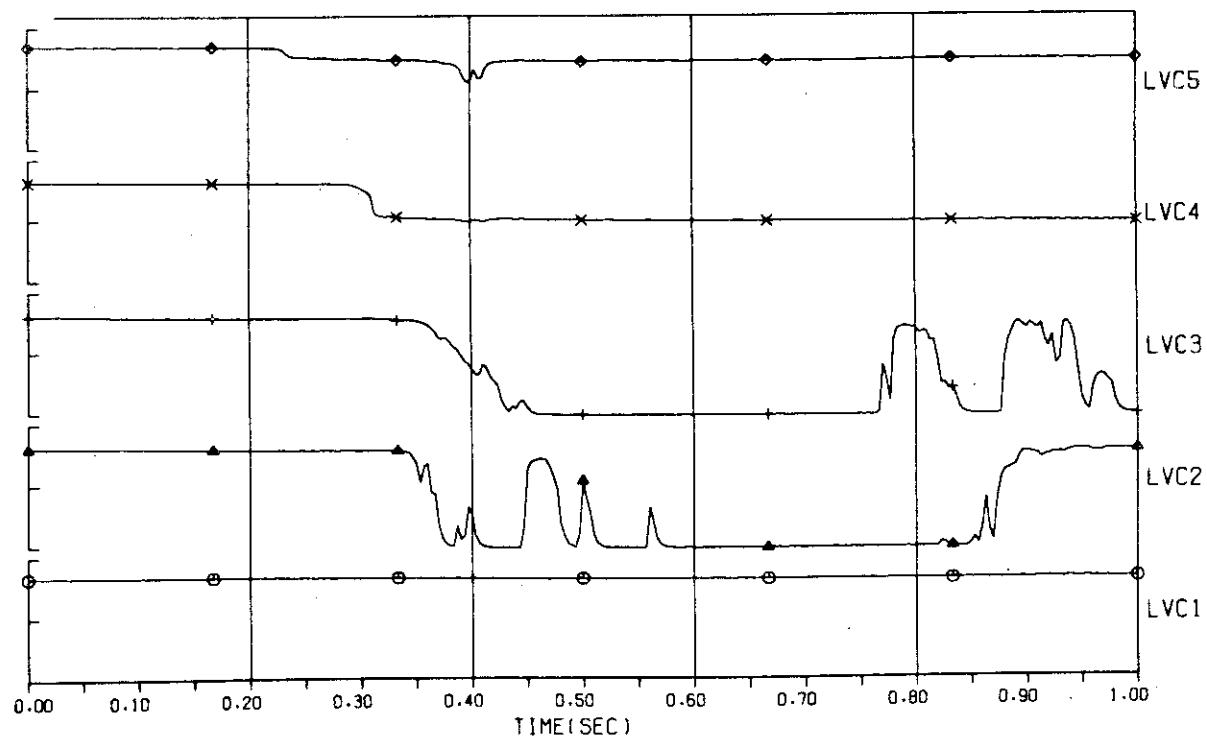
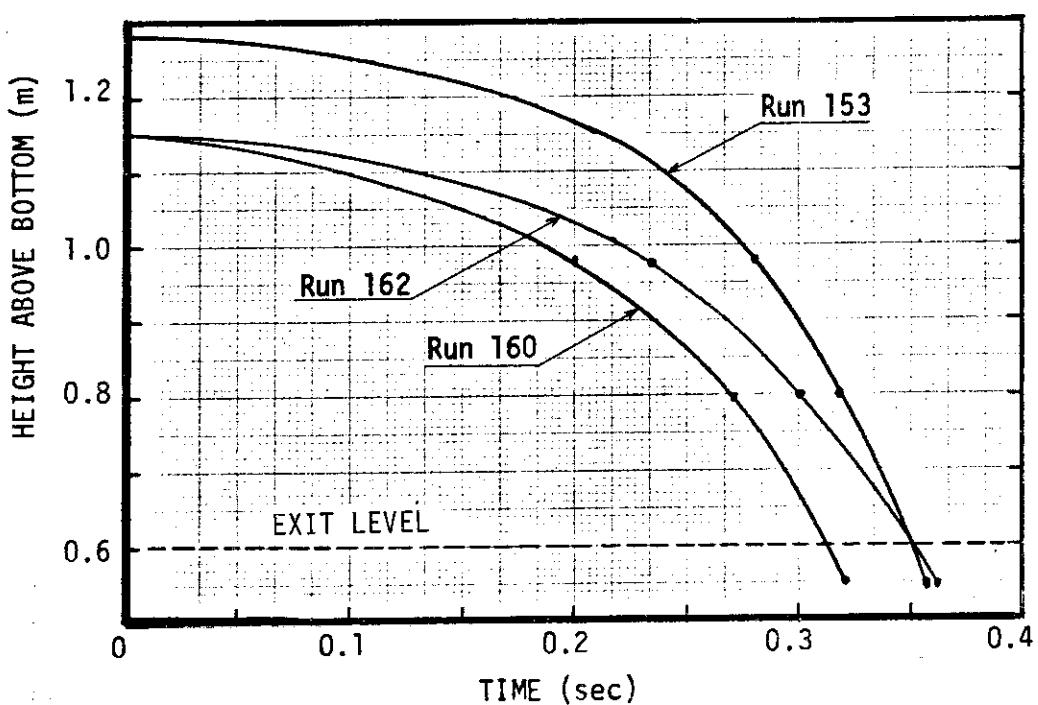
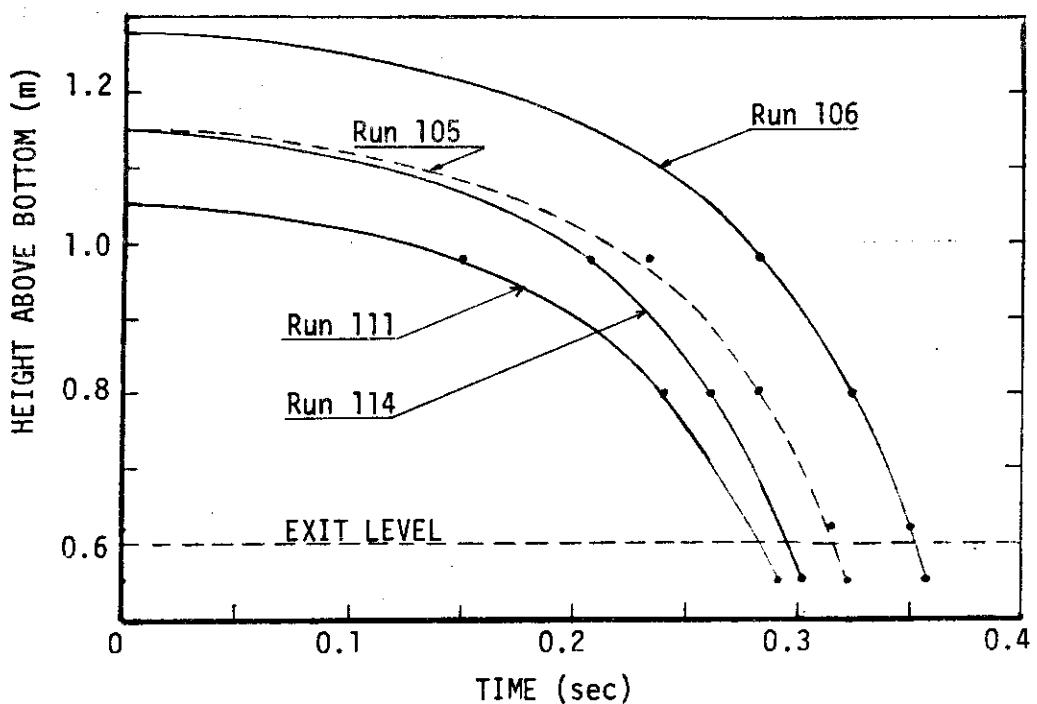


Fig. 4.45 Water level signals vs. time, Run 165



RUN 106

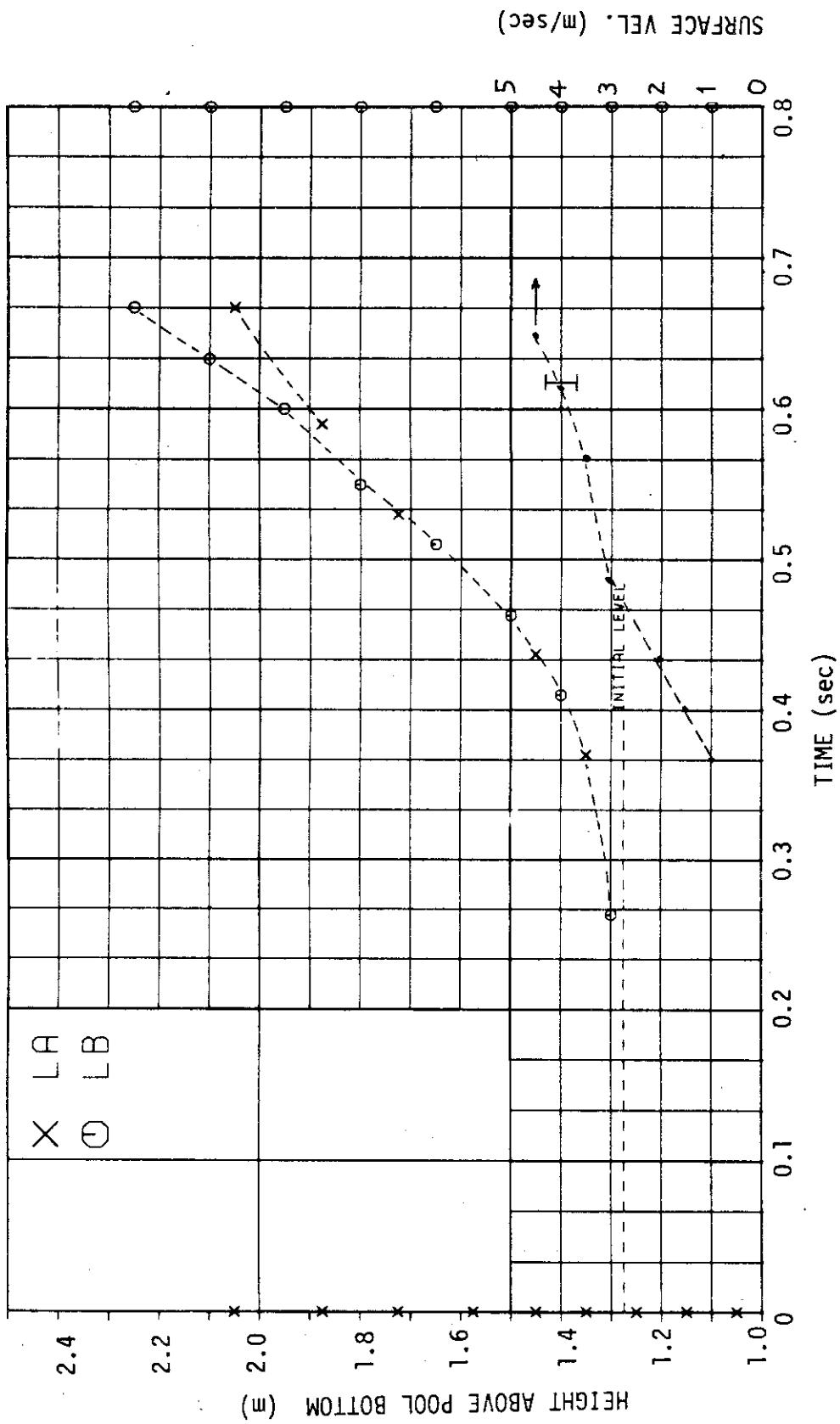


Fig. 4.48 Water level and surface velocity of pool, Run 106

RUN 111

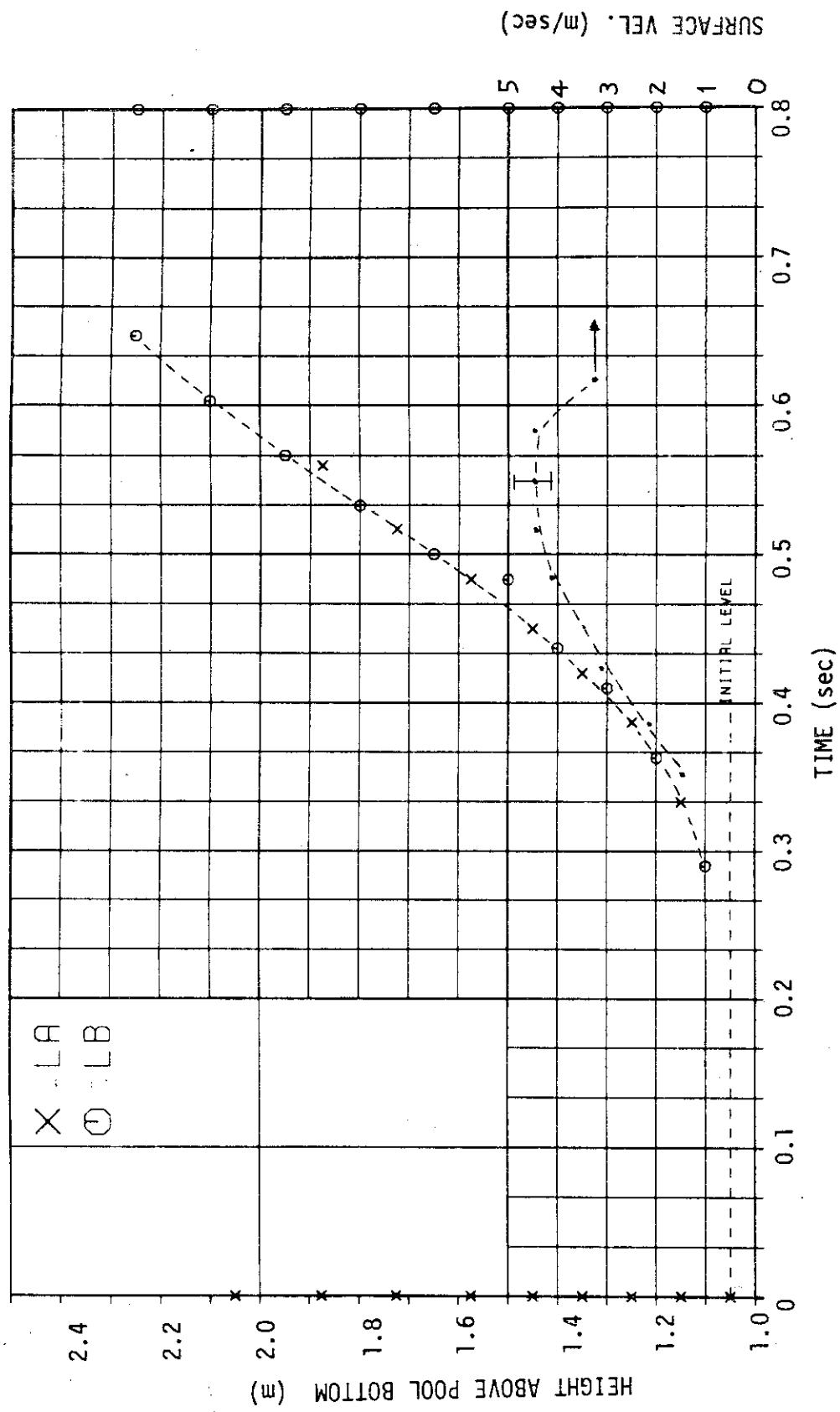


Fig. 4.49 Water level and surface velocity of pool, Run 111

RUN 114

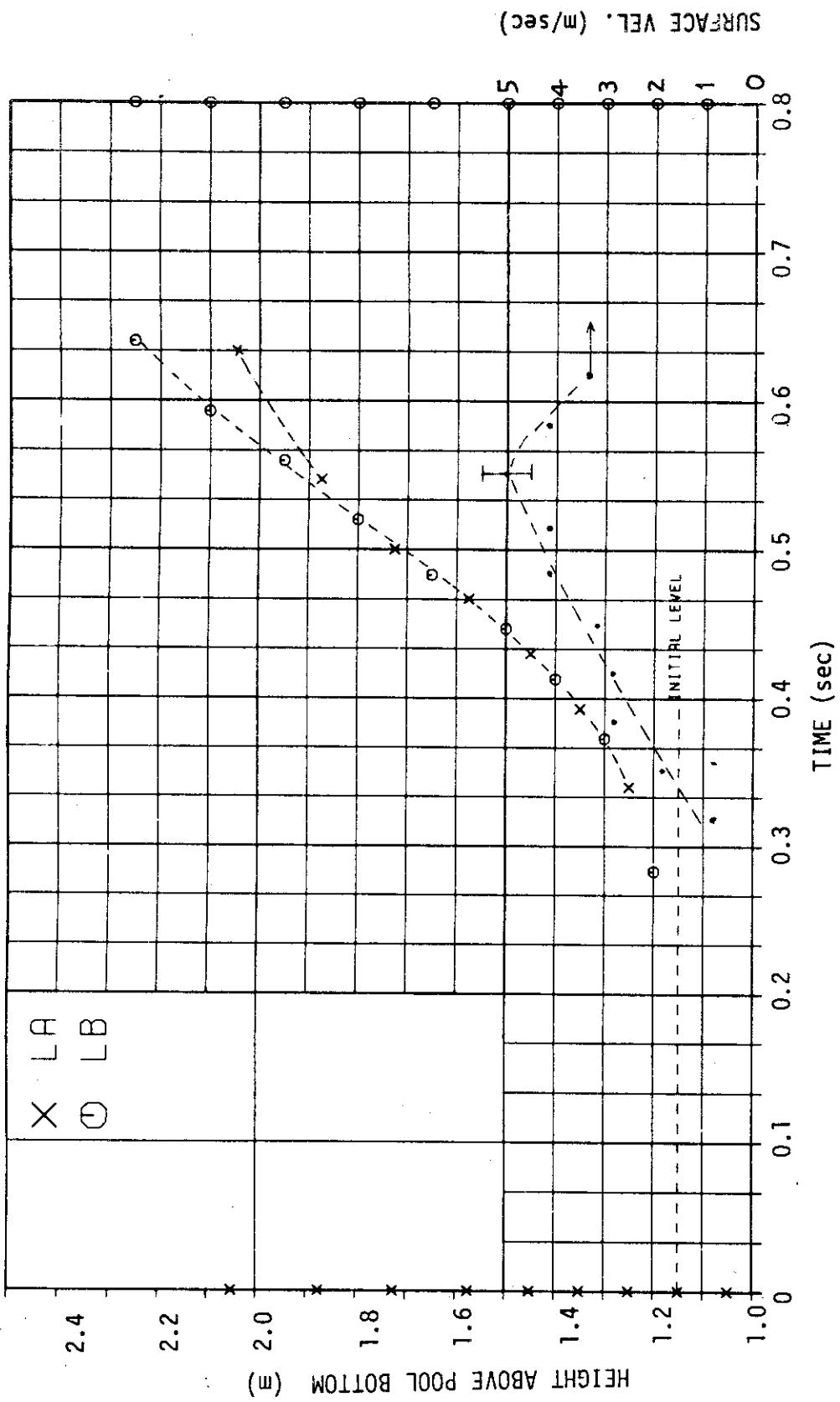


Fig. 4.50 Water level and surface velocity of pool, Run 114

RUN 153

JAERI-M 7624

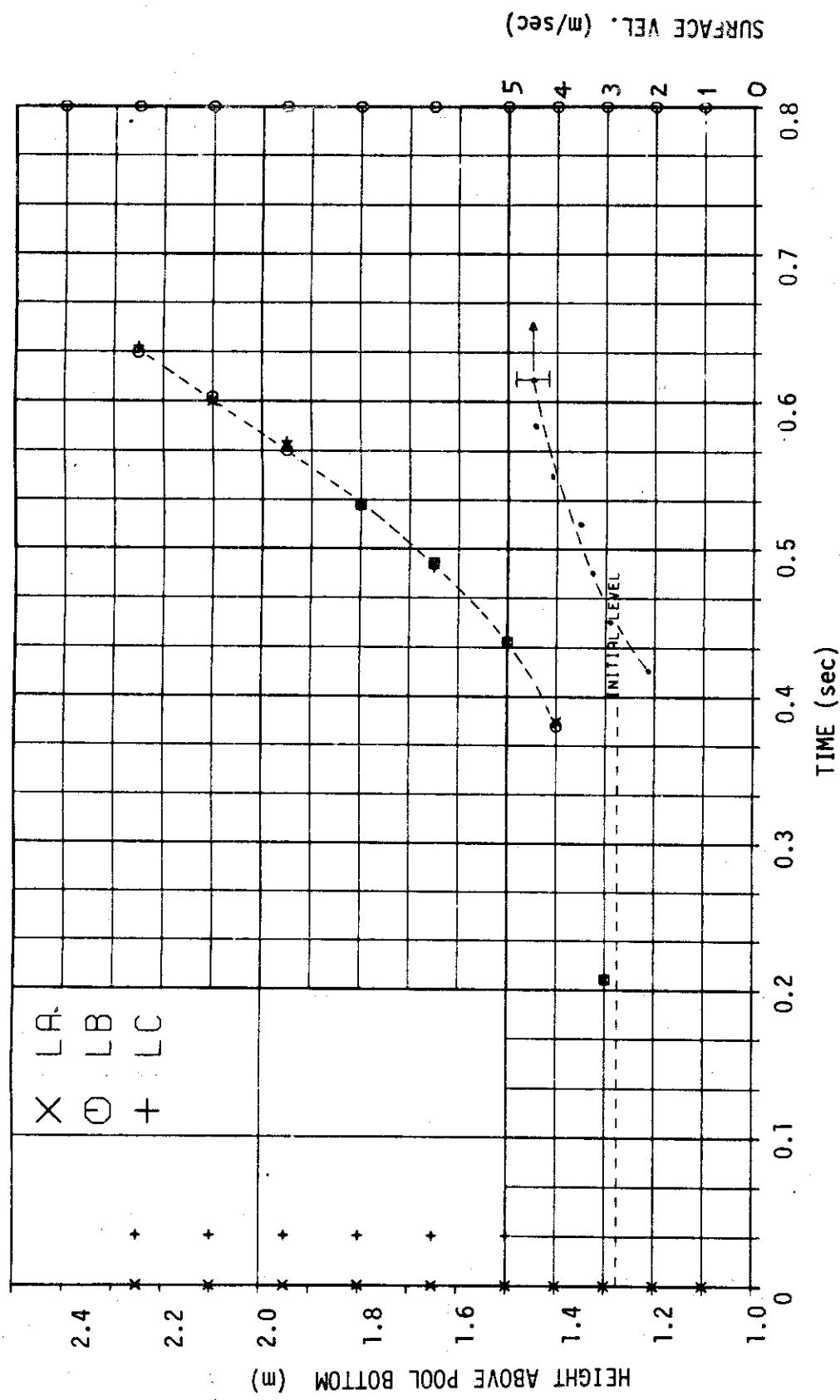


Fig. 4.51 Water level and surface velocity of pool, Run 153

RUN 160

JAERI-M 7624

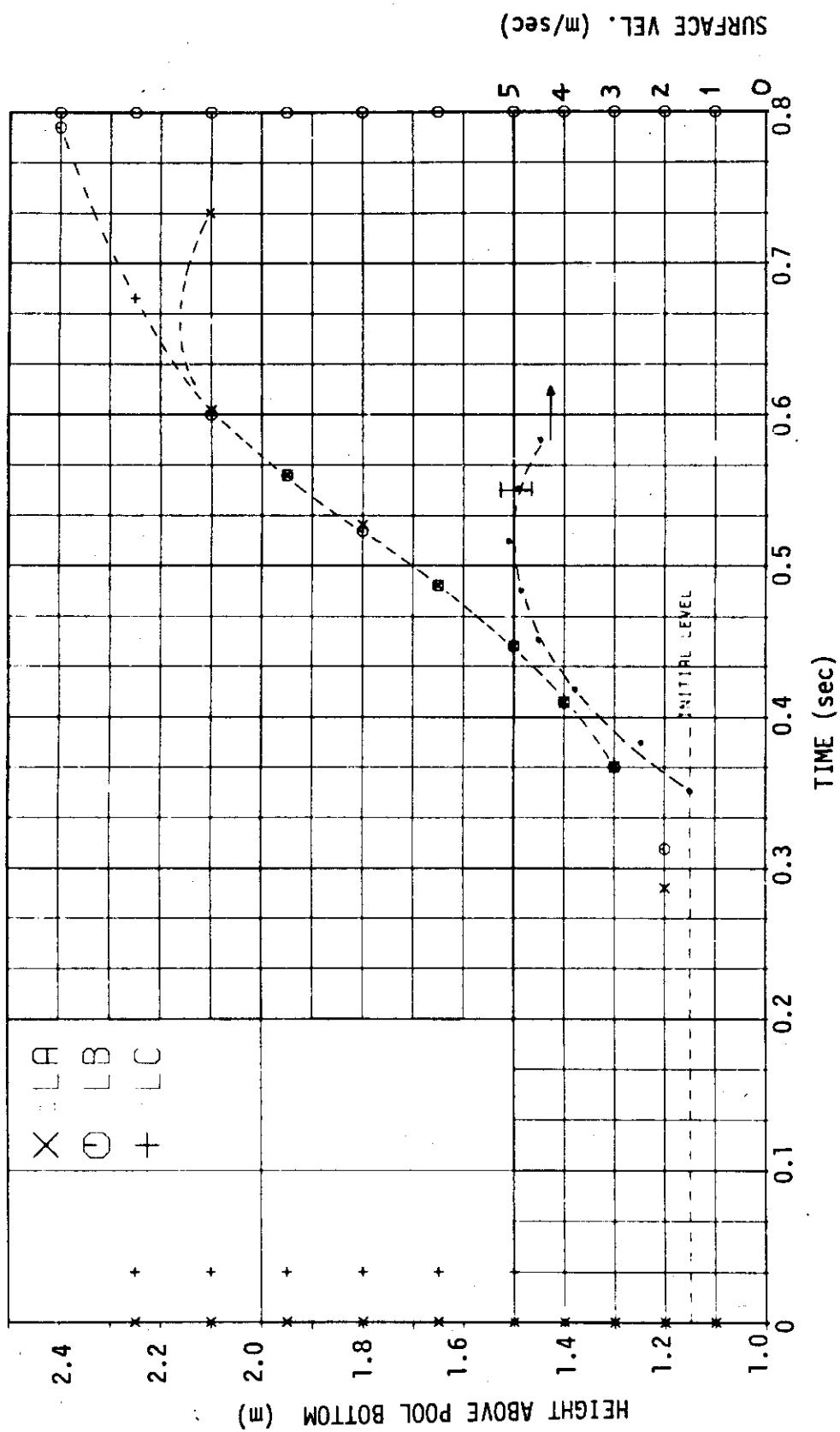


Fig. 4.52 Water level and surface velocity of pool, Run 160

RUN 161

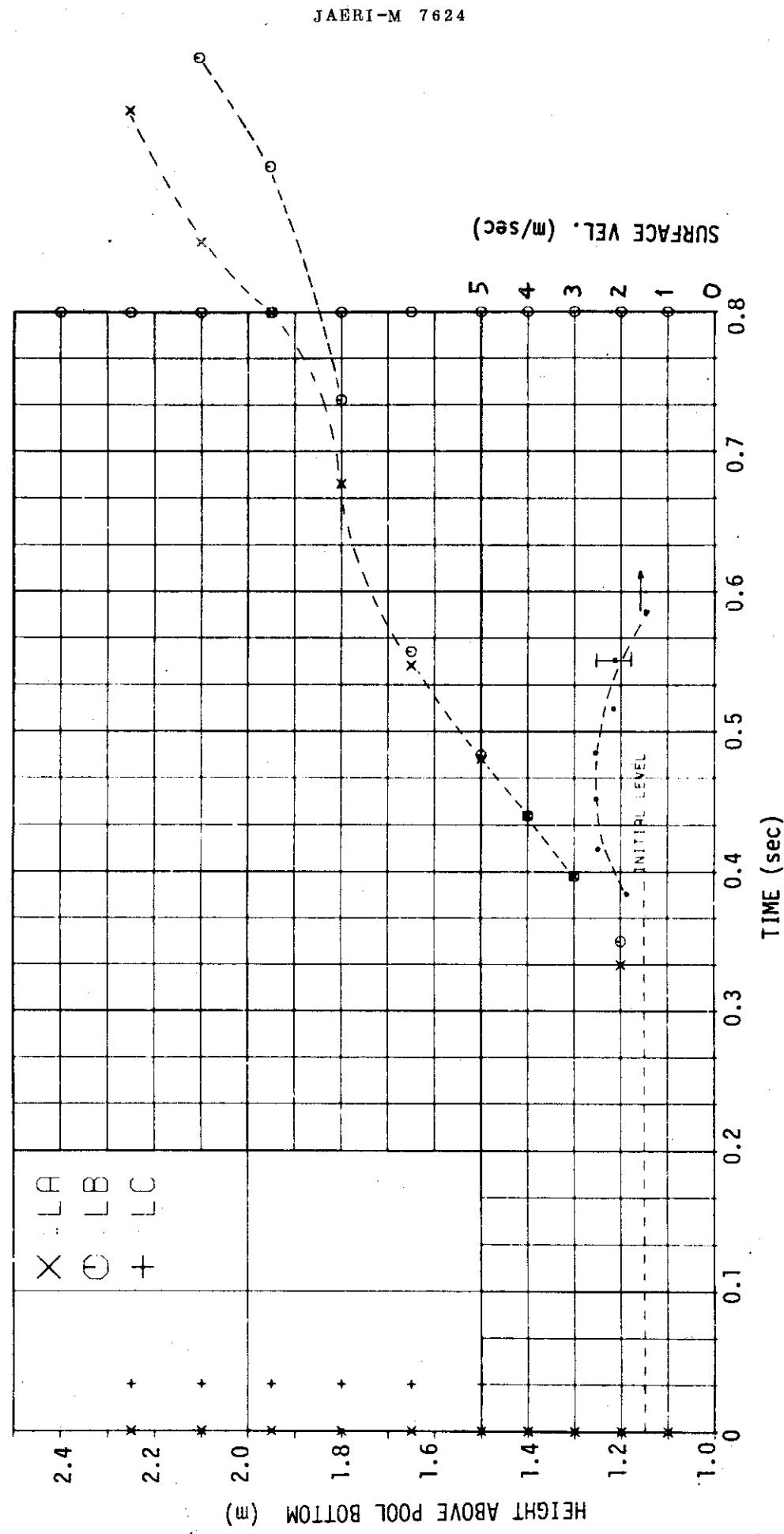


Fig. 4.53 Water level and surface velocity of pool, Run 161

RUN 162

JAERI-M 7624

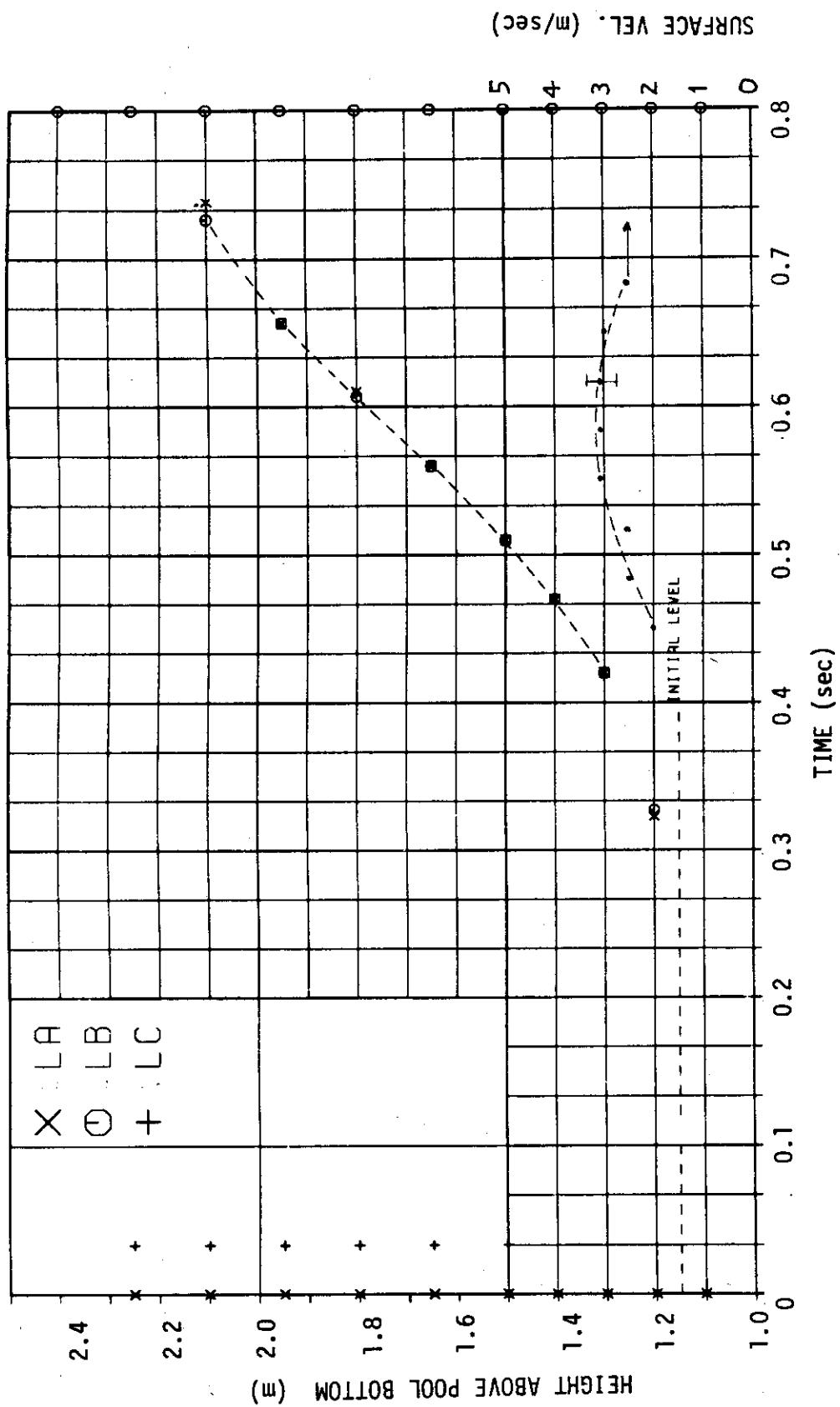


Fig. 4.54 Water level and surface velocity of pool, Run 162

RUN 164

JAERI-M 7624

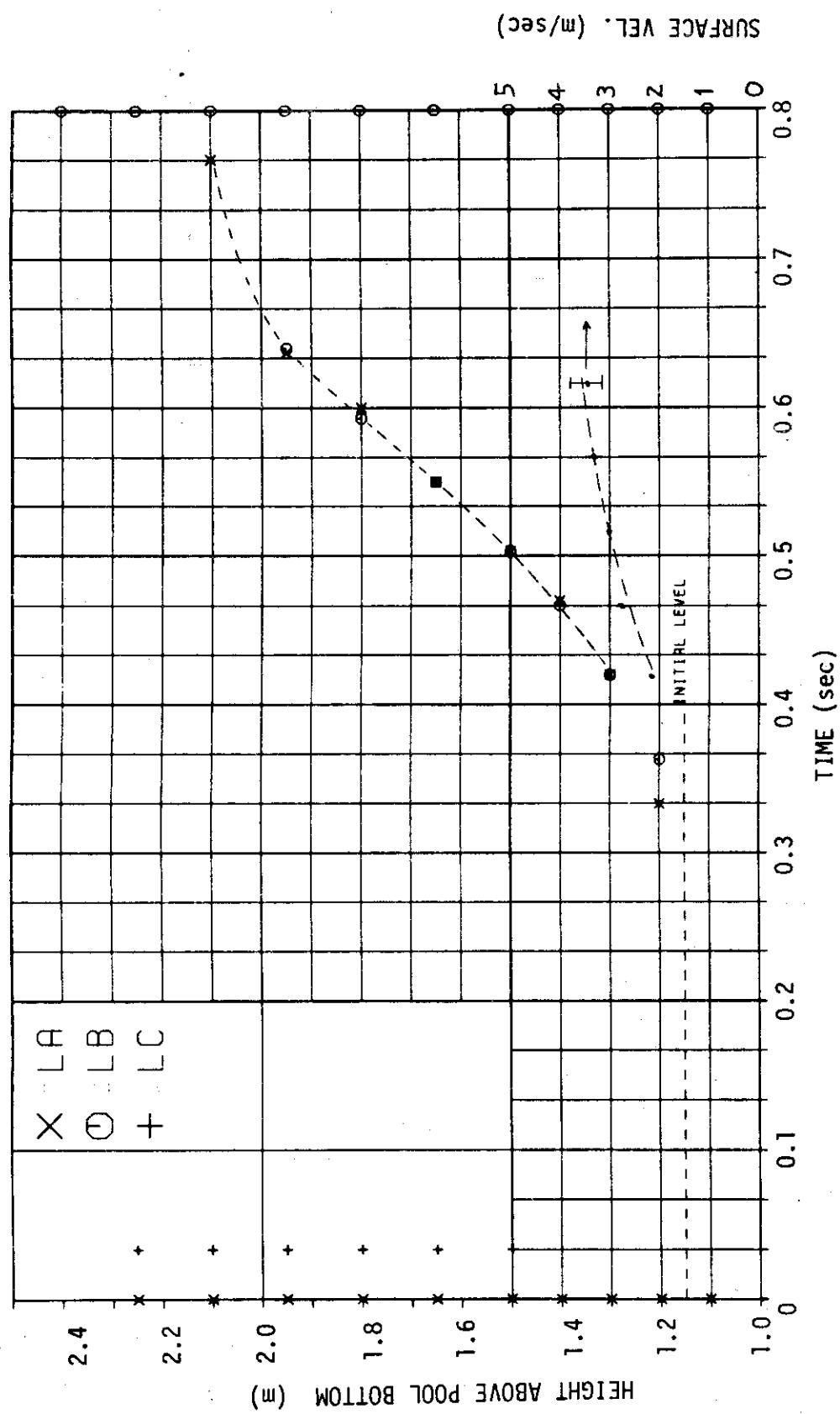


Fig. 4.55 Water level and surface velocity of pool, Run 164

RUN 165

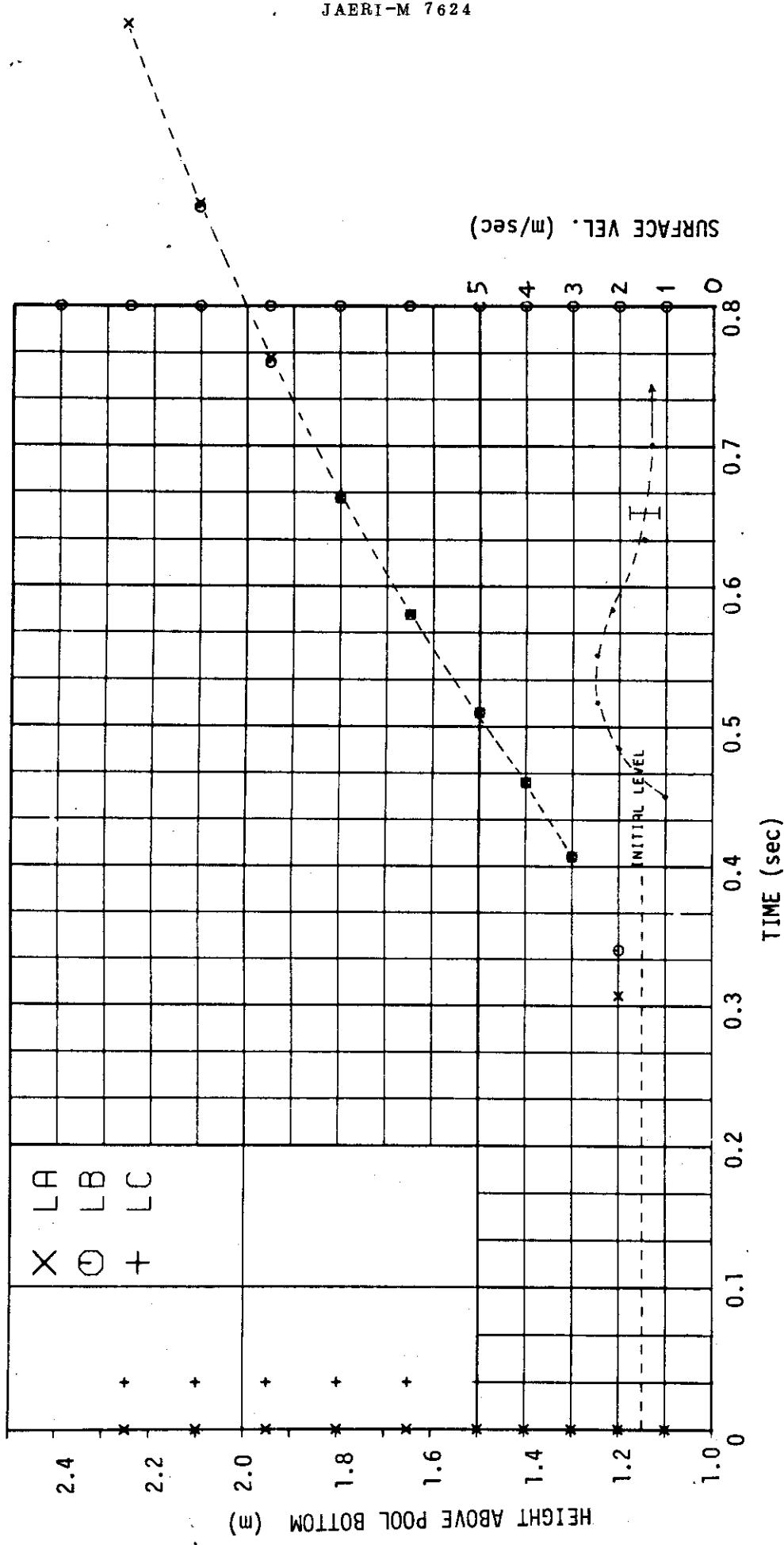


Fig. 4.56 Water level and surface velocity of pool, Run 165

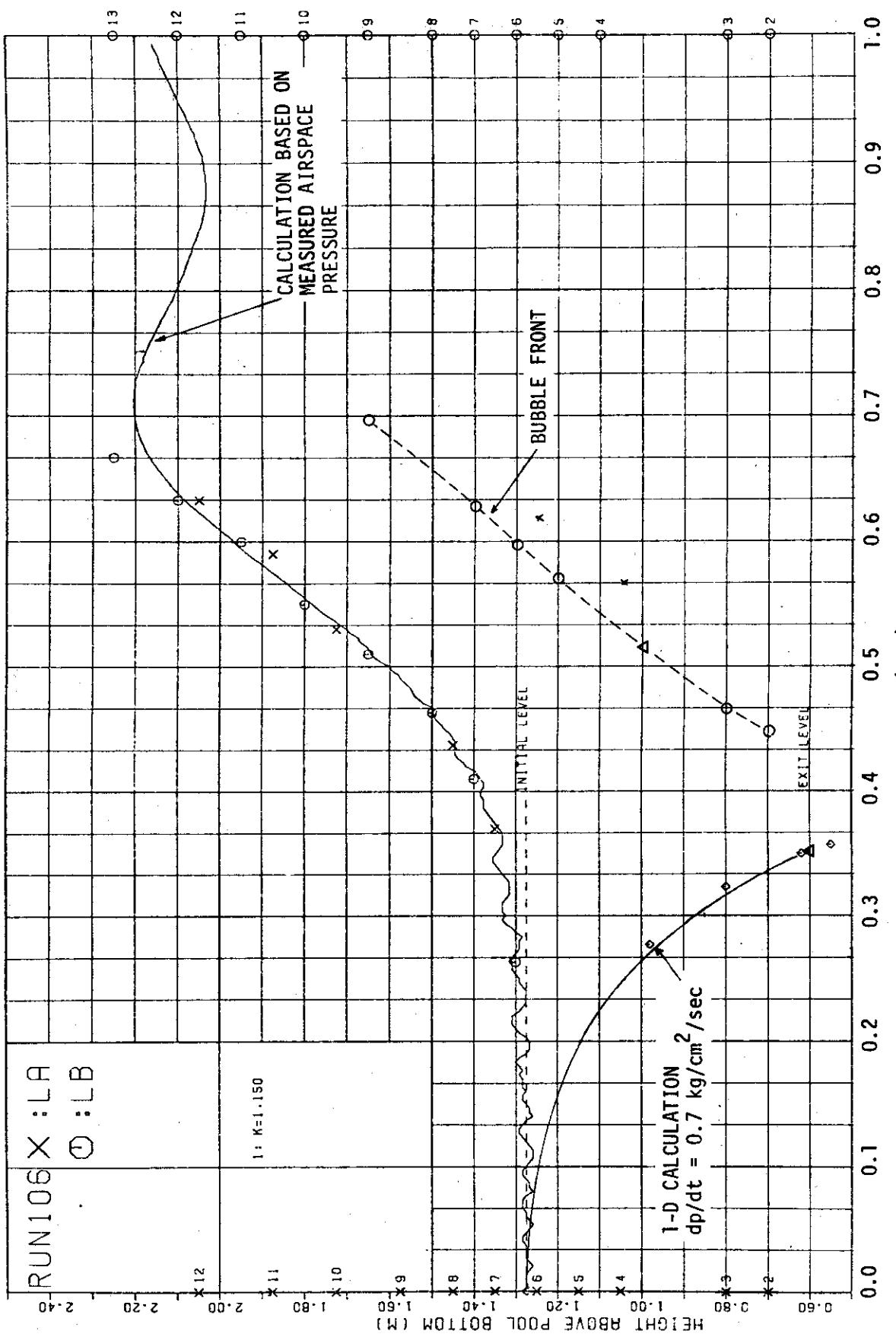


Fig. 4.57 Water level inside and outside downcomer, Run 106

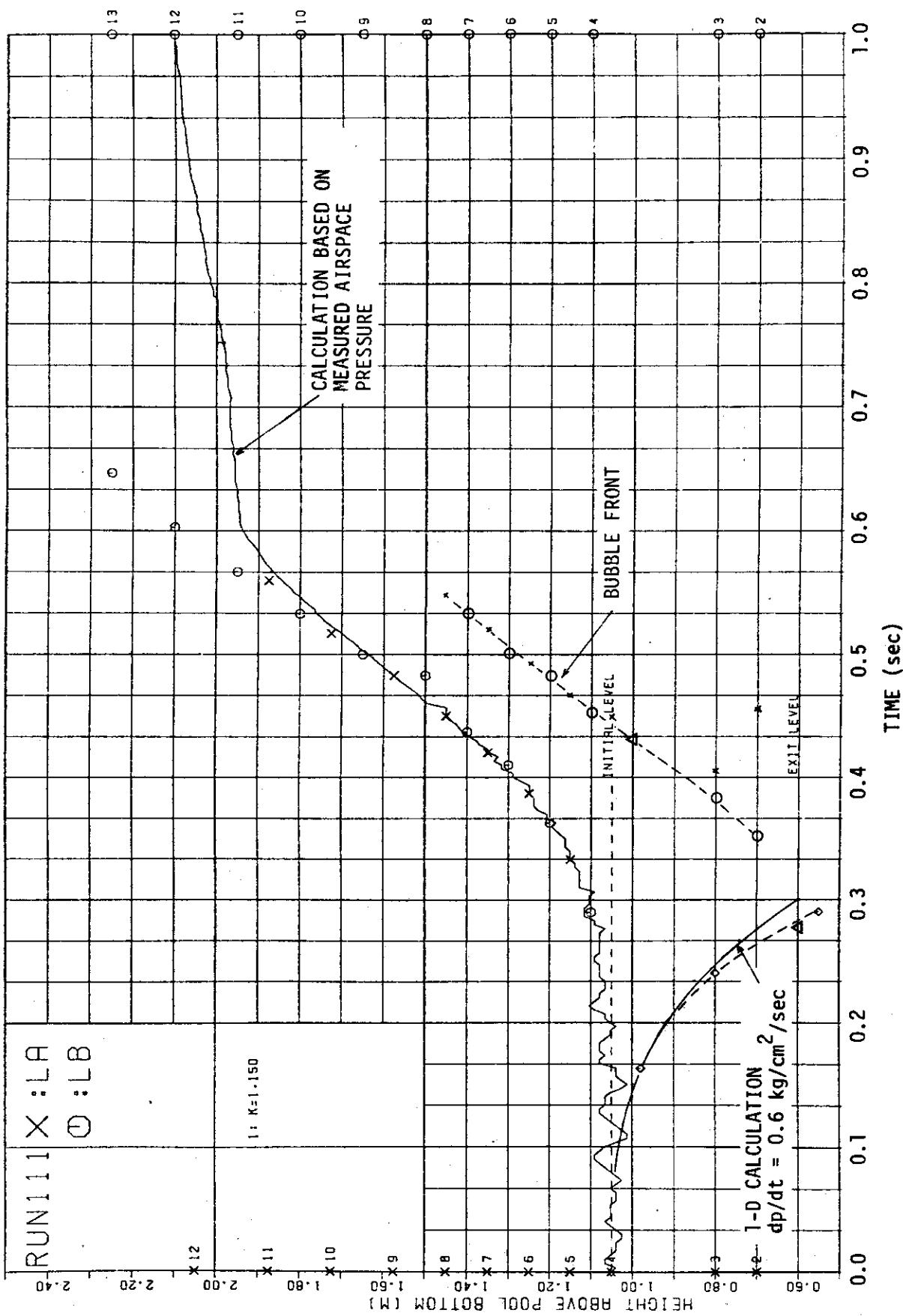


Fig. 4.58 Water level inside and outside downcomer, Run 111

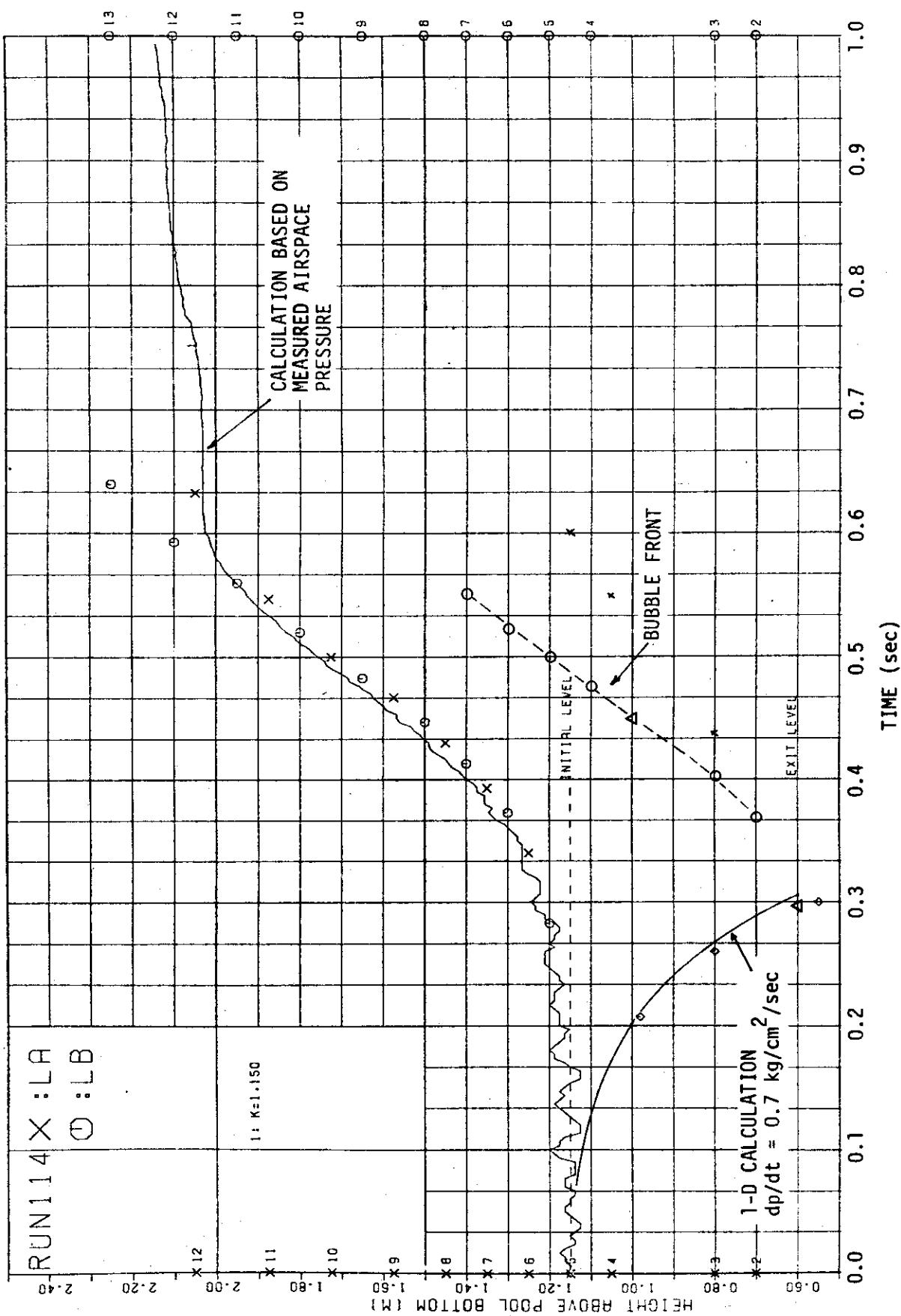


Fig. 4.59 Water level inside and outside downcomer, Run 114

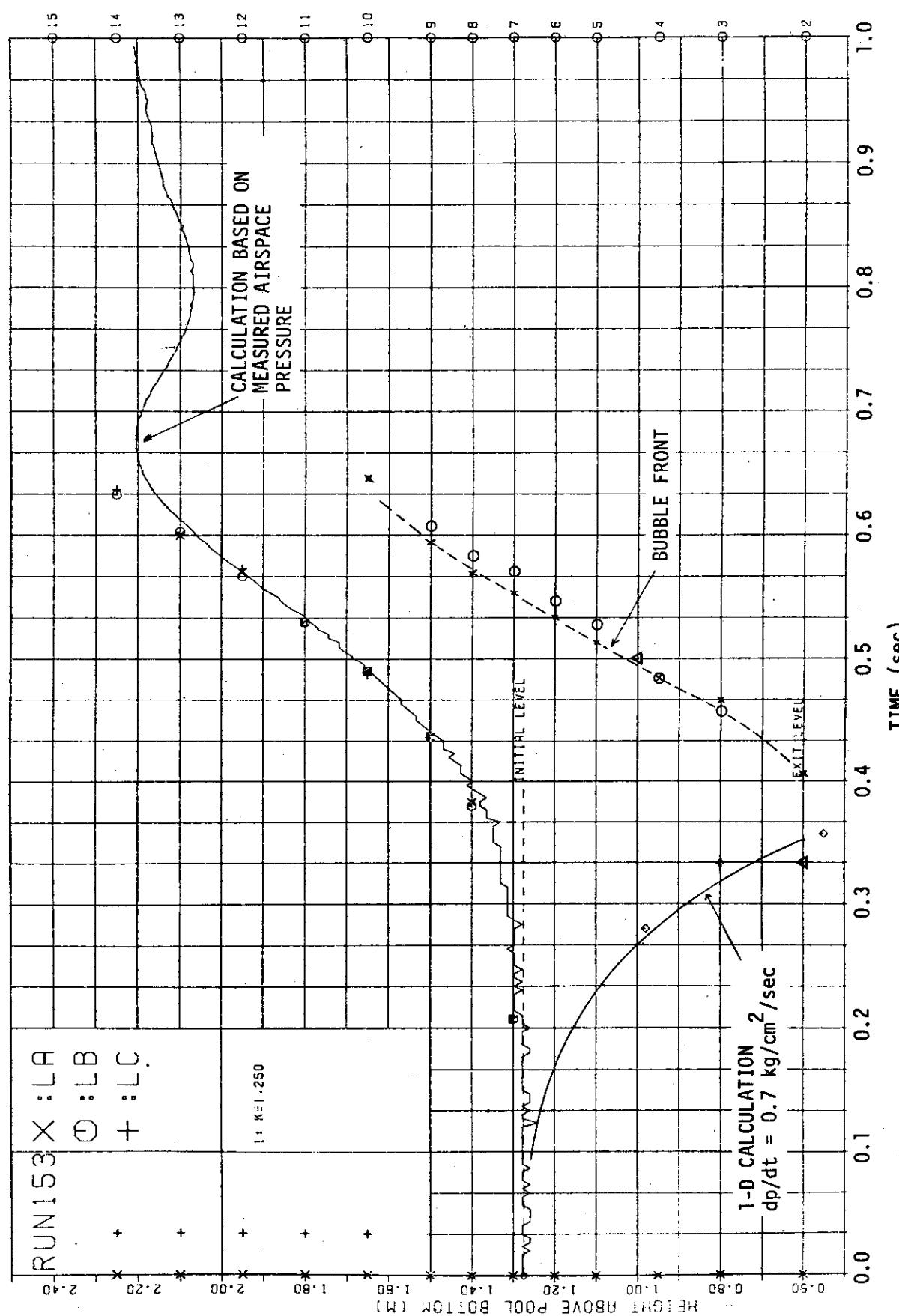


Fig. 4.60 Water level inside and outside downcomer, Run 153

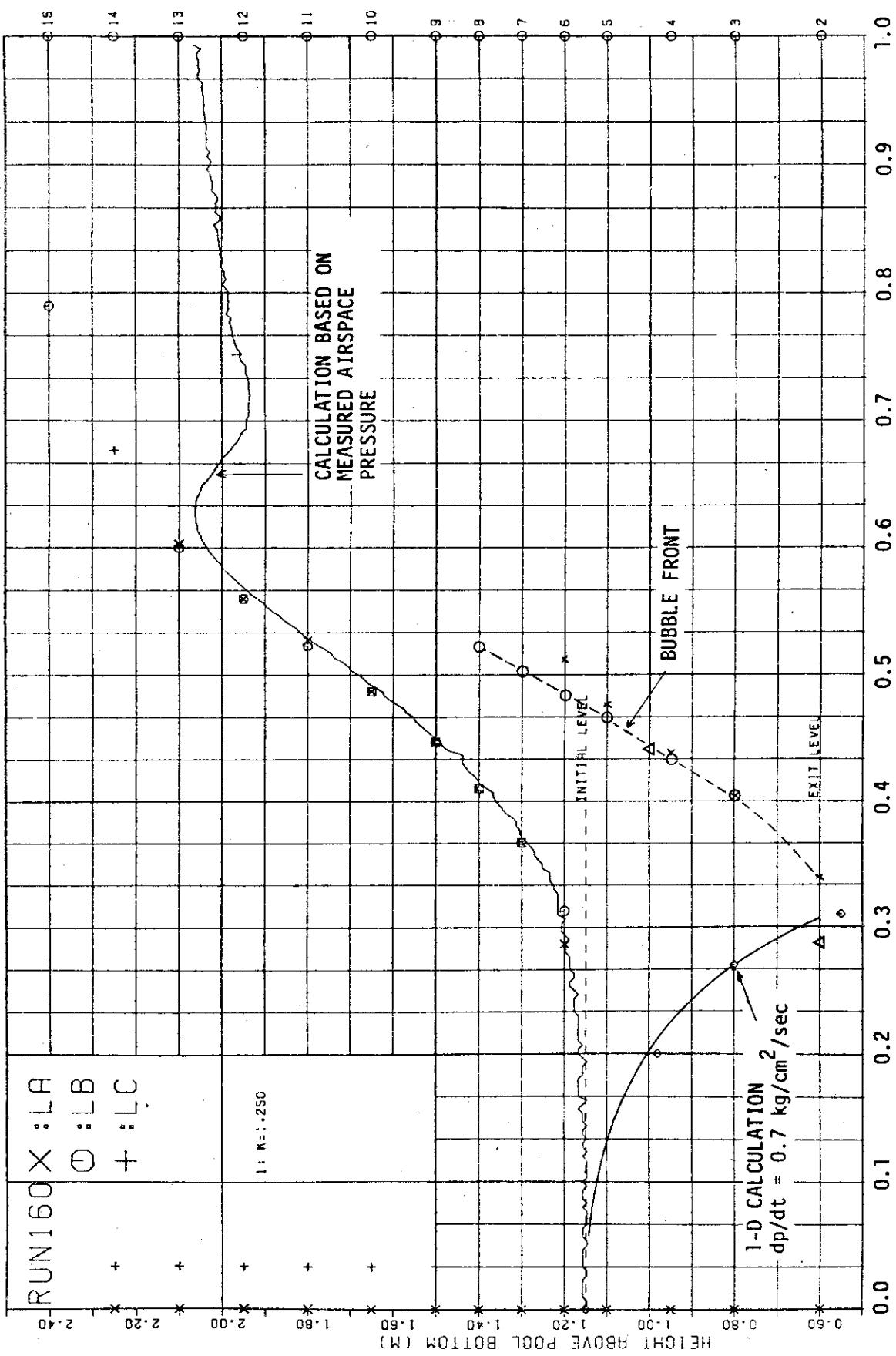


Fig. 4.61 Water level inside and outside downcomer, Run 160

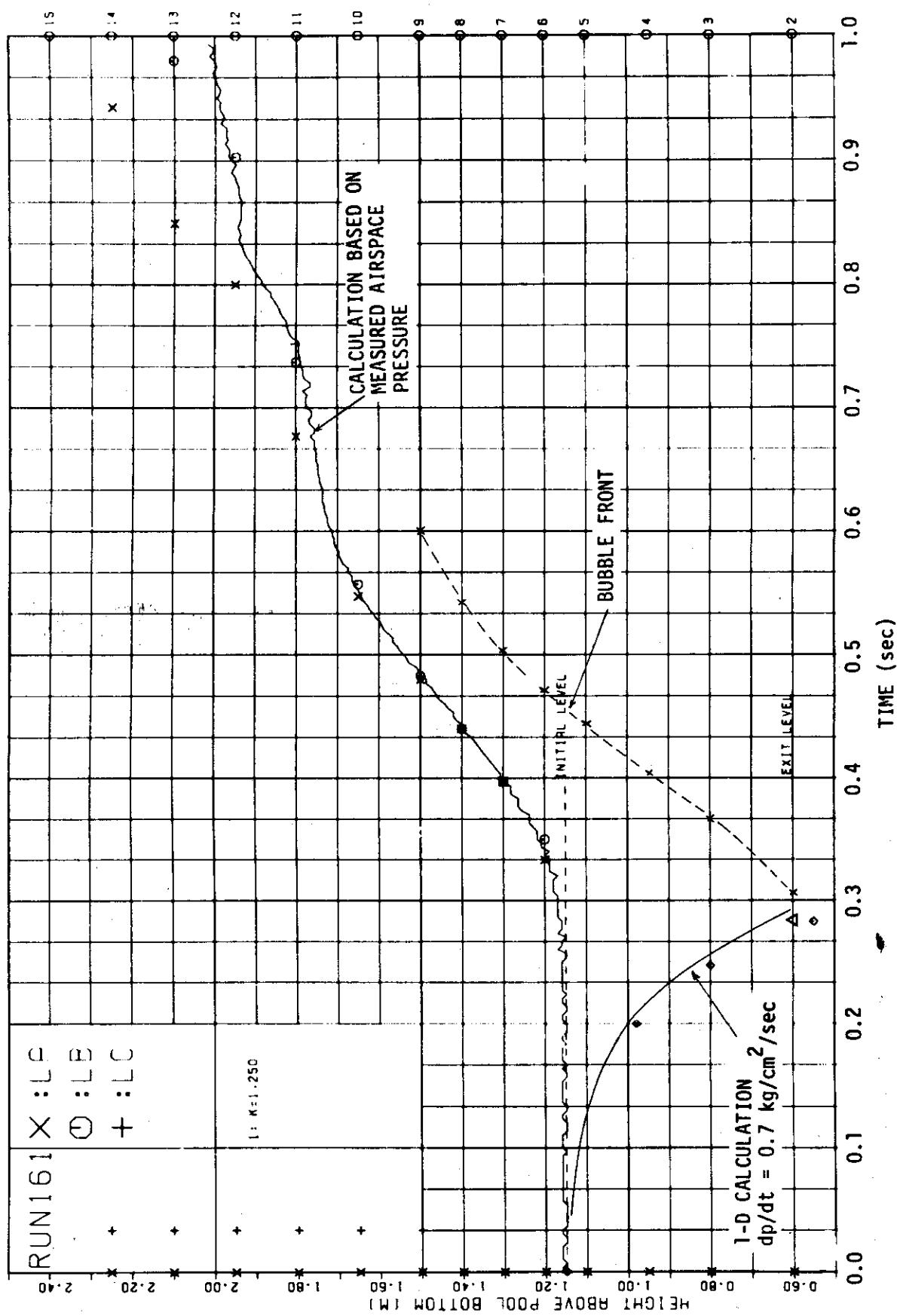


Fig. 4.62 Water level inside and outside downcomer, Run 161

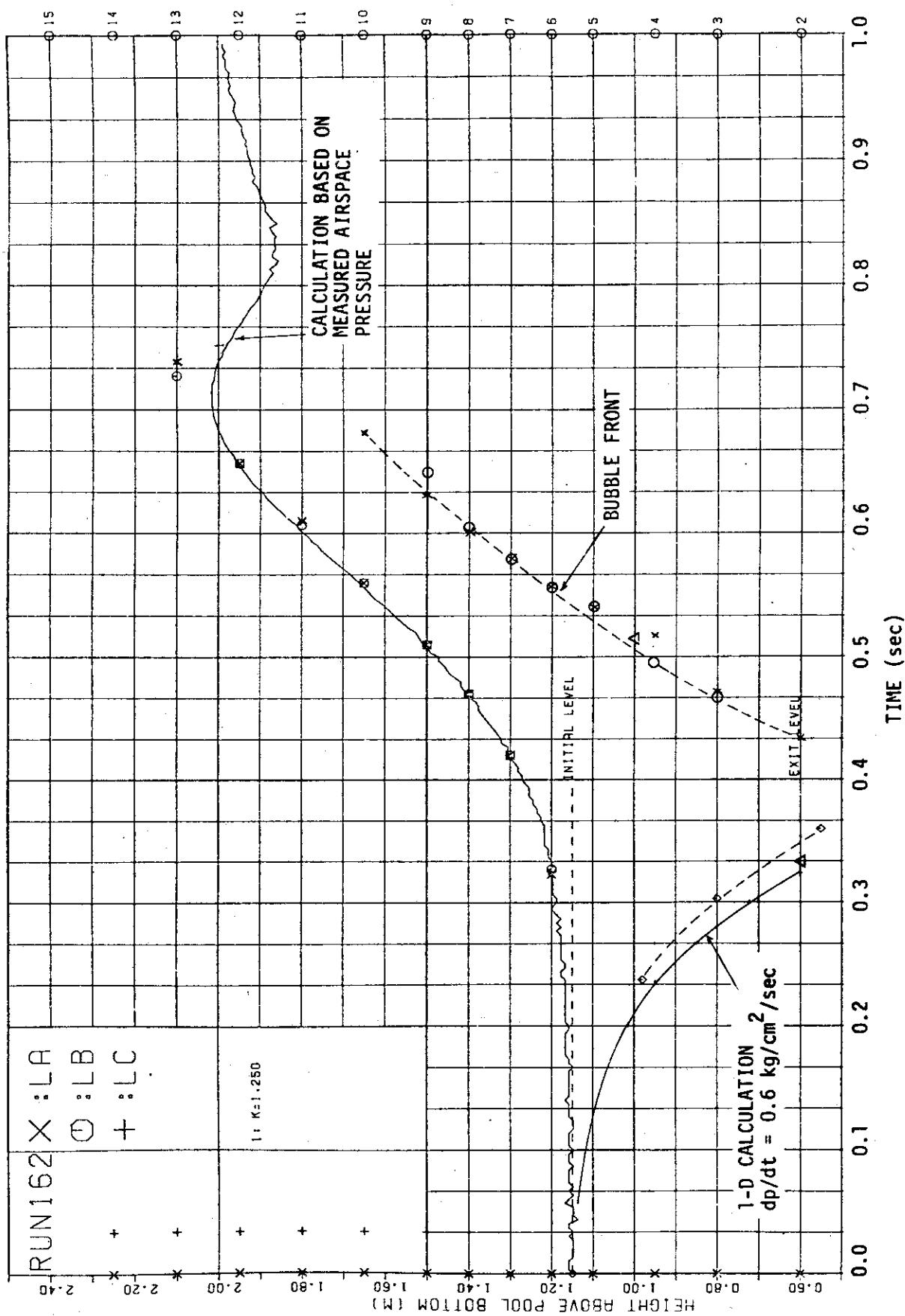


Fig. 4.63 Water level inside and outside downcomer, Run 162

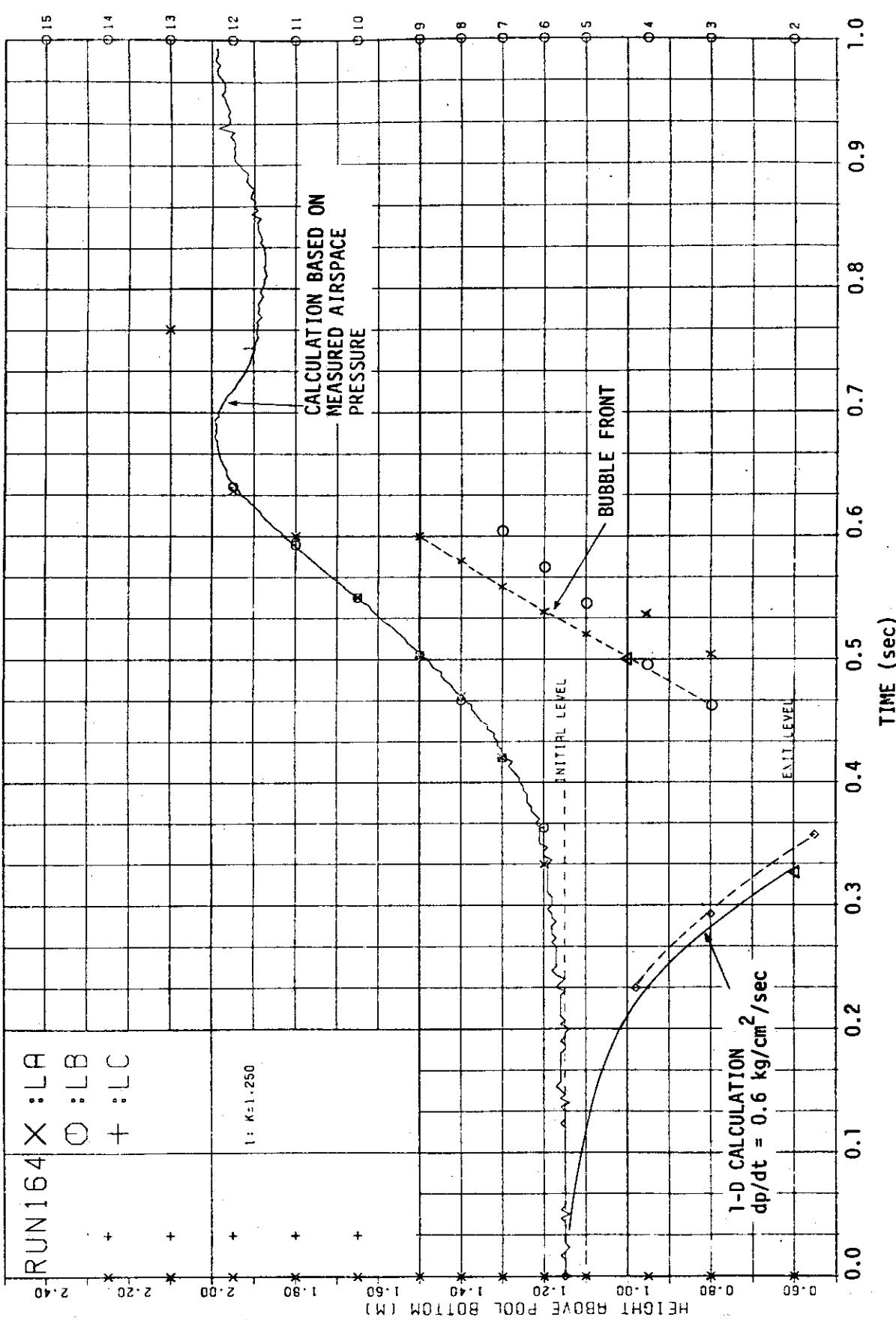


Fig. 4.64 Water level inside and outside downcomer, Run 164

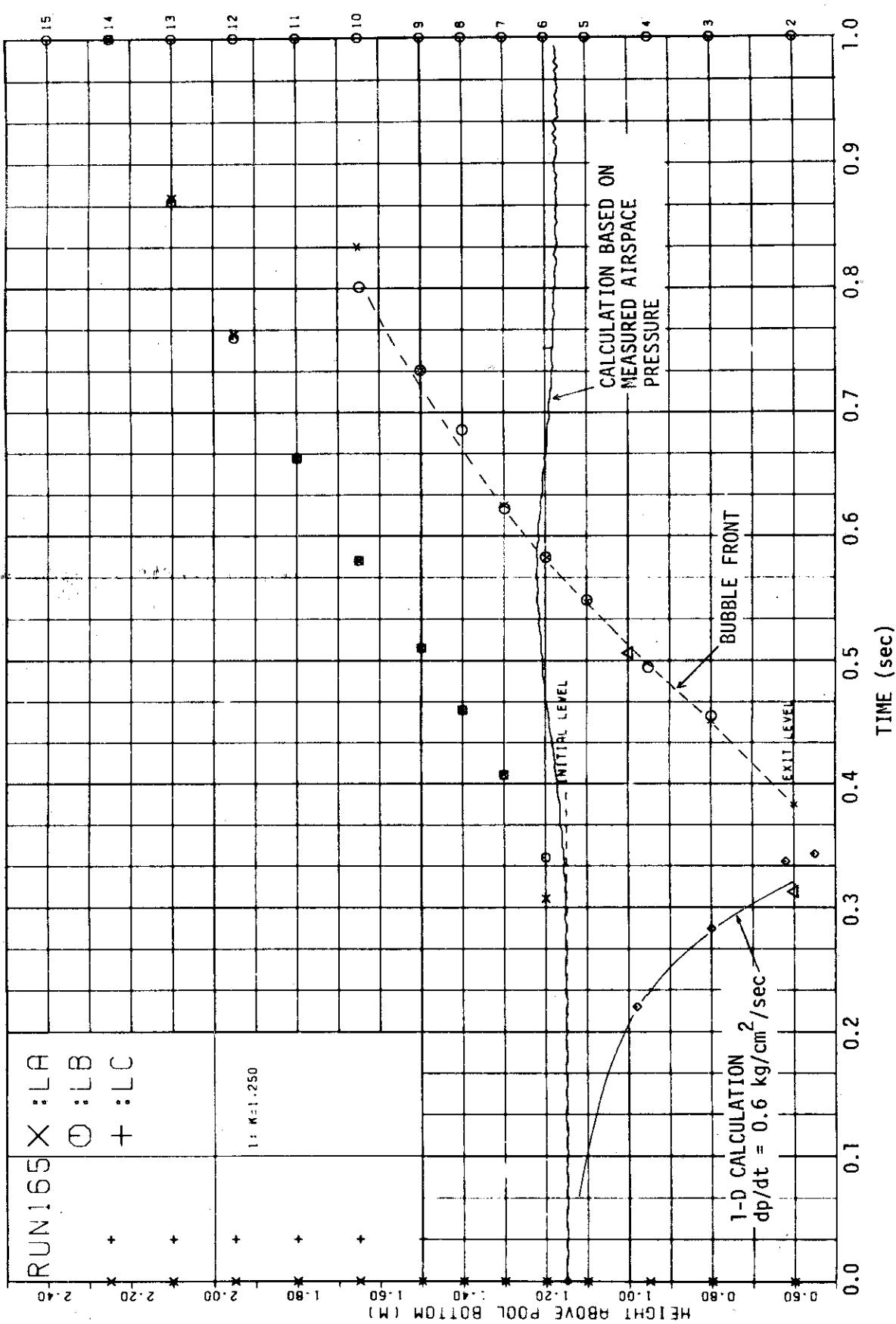


Fig. 4.65 Water level inside and outside downcomer, Run 165

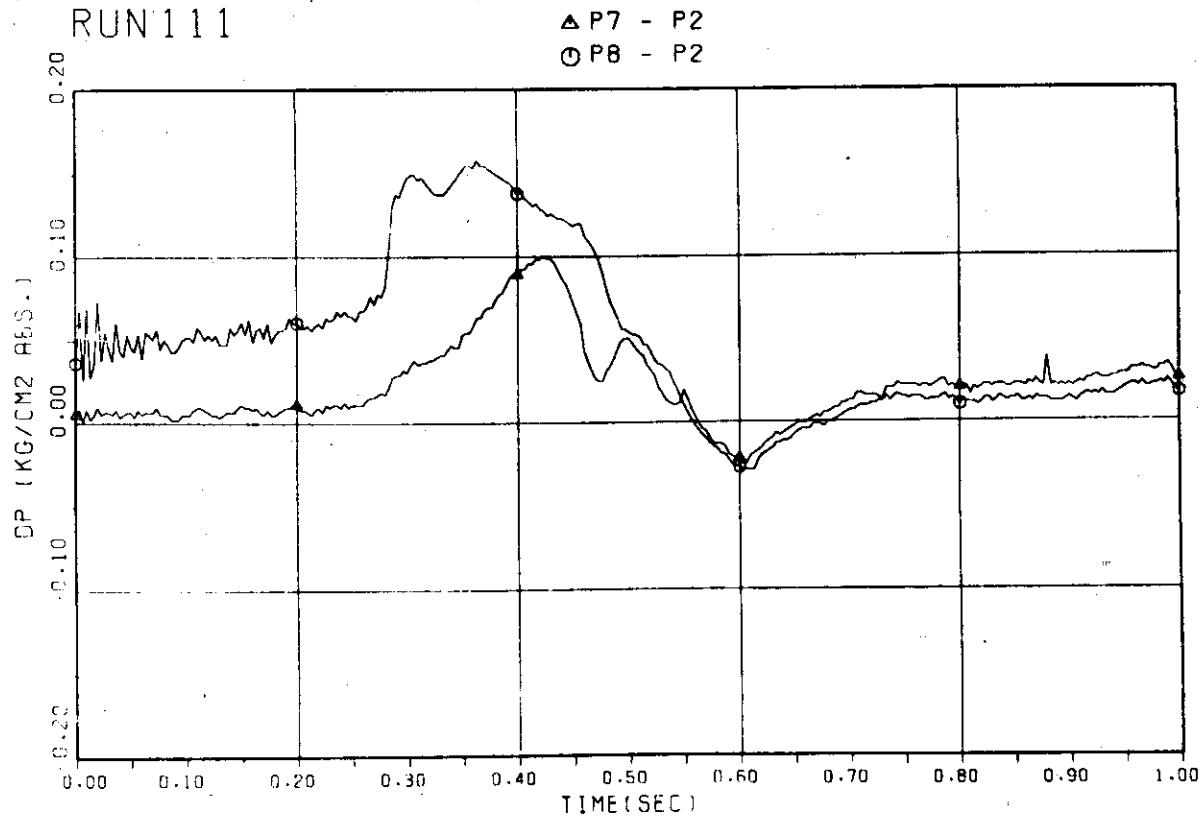


Fig. 4.66 Differential pressures in wetwell, Run 111

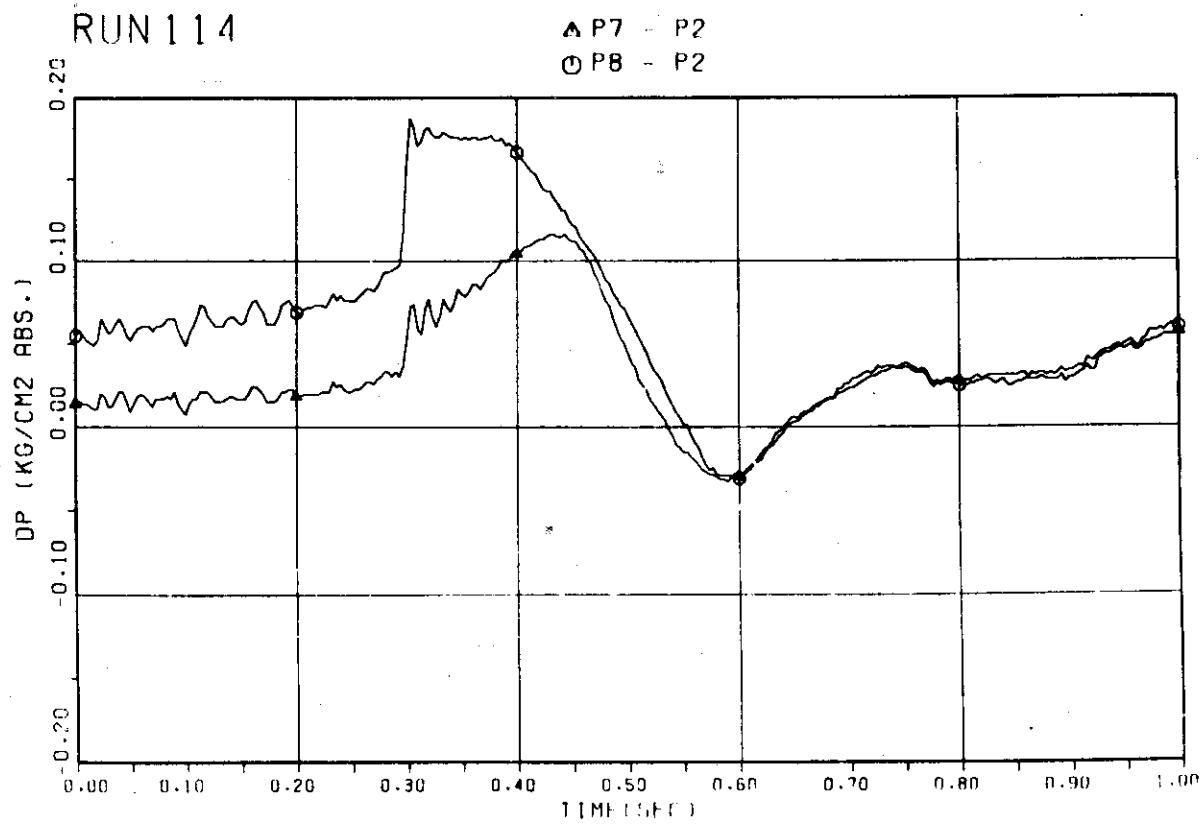


Fig. 4.67 Differential pressures in wetwell, Run 114

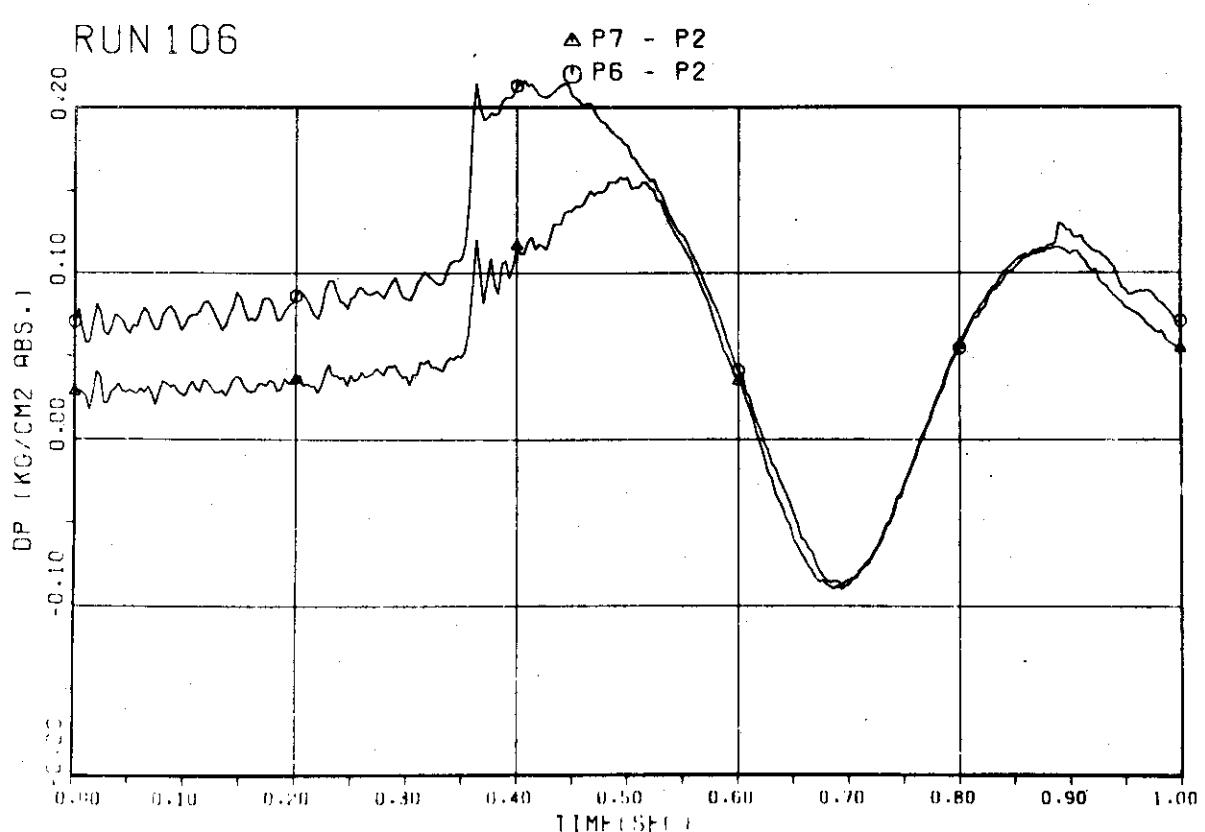


Fig. 4.68 Differential pressures in wetwell, Run 106

5. 結 語

B WR 格納容器圧力抑制効果小型試験装置によるプール・スウェル試験 9 ランのデータを報告し、あわせて試験装置および計測系を概説した。

本報中の試験結果および 1977 年 1 月から 6 月にかけて実施した受託試験研究の結果によって、現象の定性的な傾向に関する知見が得られたが、現象に対する各パラメータの効果等について定量的に結論づけるためには、なお試験データの蓄積が必要である。

本試験は、隣接する ROSA 試験装置の改造工事のため 77 年 9 月から休止しているが 78 年 4 月に再開する予定である。これに先立って、圧力変換器および水位計検出器の交換をはじめとする計測系の整備を行い、2.2 で述べた装置の機械的振動による計測結果の誤差の可能性を除去するため、模擬格納容器架台の強化を行う予定である。

謝 辞

本試験に使用した試験装置は、受託試験研究「B WR 格納容器 $\frac{1}{6}$ スケールの健全性に関する試験研究」のため、東京電力株式会社、東北電力株式会社、中部電力株式会社、中国電力株式会社、日本原子力発電株式会社の出資によって、1976 年 12 月建設され、77 年 8 月原研に譲渡されたものである。

本報で報告した試験の一部は、受託試験研究の結果に関する、東京電力、日本原子力発電、東京芝浦電気株式会社、株式会社日立製作所の関係各位との討論にもとづいて実施されたものである。

試験装置の製作は、松本 嶽氏（現技術部施設第三課）、伊藤秀雄氏（安全工学部安全試験技術室）が担当し、試験装置の運転に際しては千葉辰夫氏（安全試験技術室）をはじめとする方々の協力を得た。

ここにこれらの各位に対し心から謝意を表わす。

5. 結 語

B WR 格納容器圧力抑制効果小型試験装置によるプール・スウェル試験 9 ランのデータを報告し、あわせて試験装置および計測系を概説した。

本報中の試験結果および 1977 年 1 月から 6 月にかけて実施した受託試験研究の結果によって、現象の定性的な傾向に関する知見が得られたが、現象に対する各パラメータの効果等について定量的に結論づけるためには、なお試験データの蓄積が必要である。

本試験は、隣接する ROSA 試験装置の改造工事のため 77 年 9 月から休止しているが 78 年 4 月に再開する予定である。これに先立って、圧力変換器および水位計検出器の交換をはじめとする計測系の整備を行い、2.2 で述べた装置の機械的振動による計測結果の誤差の可能性を除去するため、模擬格納容器架台の強化を行う予定である。

謝 辞

本試験に使用した試験装置は、受託試験研究「B WR 格納容器 $\frac{1}{6}$ スケールの健全性に関する試験研究」のため、東京電力株式会社、東北電力株式会社、中部電力株式会社、中国電力株式会社、日本原子力発電株式会社の出資によって、1976 年 12 月建設され、77 年 8 月原研に譲渡されたものである。

本報で報告した試験の一部は、受託試験研究の結果に関する、東京電力、日本原子力発電、東京芝浦電気株式会社、株式会社日立製作所の関係各位との討論にもとづいて実施されたものである。

試験装置の製作は、松本 嶽氏（現技術部施設第三課）、伊藤秀雄氏（安全工学部安全試験技術室）が担当し、試験装置の運転に際しては千葉辰夫氏（安全試験技術室）をはじめとする方々の協力を得た。

ここにこれらの各位に対し心から謝意を表わす。

参考文献

- 1) 久木田, 岡崎, 生田目, 斯波, "Mark II 格納内容器 1/6 規模試験結果の解析," 昭和 52 年日本原子力学会秋の分科会
- 2) Bilanin, W.J. et al., "Mark II Containment Dynamic Forcing Functions Information Report", NEDO-21061 Rev. 2, Sep. 1976.
- 3) Ernest, R.J. and Ward, M.G., "Mark II Pressure Suppression Containment Systems: An Analytical Model of the Pool Swell Phenomenon", NEDO-21544, Dec. 1976.
- 4) Torbeck, J.E. et al., "Mark I 1/12-Scale Pressure Suppression Pool Swell Tests", NEDO-13456, 1976.
- 5) Kukita, Y., "Analysis of the Short-Term Pressure Response of Mark II Containment to a Loss-of-Coolant Accident", JAERI-M 7504, Jan. 1978.
- 6) 例えば, Idel'chik, I.E., "Handbook of Hydraulic Resistance", AEC-Tr 6630, 1966.

参考文献

- 1) 久木田, 岡崎, 生田目, 斯波, "Mark II 格納内容器 1 / 6 規模試験結果の解析," 昭和 52 年日本原子力学会秋の分科会
- 2) Bilanin, W.J. et al., "Mark II Containment Dynamic Forcing Functions Information Report", NEDO-21061 Rev. 2, Sep. 1976.
- 3) Ernest, R.J. and Ward, M.G., "Mark II Pressure Suppression Containment Systems: An Analytical Model of the Pool Swell Phenomenon", NEDO-21544, Dec. 1976.
- 4) Torbeck, J.E. et al., "Mark I 1/12-Scale Pressure Suppression Pool Swell Tests", NEDO-13456, 1976.
- 5) Kukita, Y., "Analysis of the Short-Term Pressure Response of Mark II Containment to a Loss-of-Coolant Accident", JAERI-M 7504, Jan. 1978.
- 6) 例えば, Idel'chik, I.E., "Handbook of Hydraulic Resistance", AEC-Tr 6630, 1966.