

JAERI-M

6708

ブローダウン伝熱流動実験プロGRESS  
レポート, No. 1

(透明テスト部による観察実験, その1)

1976年9月

早田 邦久・山本 信夫・大崎 秀機・斯波 正誼

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、お申しこしてください。

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.

JAERI-M 6708

ブローダウン伝熱流動実験プログレスリポート, No.1  
(透明テスト部による観察実験, その1)

日本原子力研究所東海研究所安全工学部  
早田邦文・山本信夫・大崎秀機・斯波正誼  
(1976年8月18日受理)

透明テスト部を用いたブローダウン実験を行ない、ブローダウン中の冷却材の挙動について定性的な現象の把握を行なった。実験は、放出形式、初期圧力、初期液温、発熱体電気入力、発熱体本数等をパラメータとして、それぞれがブローダウン現象に及ぼす影響を調べた。また、各実験データの解釈を行なった。その結果、放出形式による流動状態の相違、それに基づくDNB発生までの経過の相違などが明きらかになった。

JAERI-M 6708

Blowdown Heat Transfer Experiment, (1) Test with the Transparent Test Section

Kunihisa SODA, Nobuo YAMAMOTO, Hideki OSAKI and Masayoshi SHIBA

Division of Reactor Safety, Tokai, JAERI

(Received August 18, 1976)

Blowdown heat transfer experiment has been carried out with a transparent test section to observe phenomena in coolant behavior during blowdown process. Experimental parameters are discharge position, initial system pressure, initial coolant temperature, power supply to heater rods and number of heater rods.

At initial pressure 7-12 ata and initial power 6-50 kw per one heater rod, the flow condition in the test section is a major factor in determining time of DNB occurrence and physical process to DNB during blowdown.

## SUMMARY

Blowdown heat transfer experiment was performed in order to achieve better and detail understandings of coolant behaviour in a reactor core which would be observed during a postulated loss of coolant accident. The first series of experiment was conducted in a test loop provided with a transparent test section so that phenomenological observation of coolant behaviour was made possible.

Total of 24 runs were made including three tests with a steel test section having identical dimensions of the transparent section. Experimental parameters (and their ranges) were discharge position (top, bottom and simultaneous discharge), initial system pressure (7 to 12 ata for the transparent test section and 22 ata for the steel test section), initial coolant temperature (138 to 171 for the transparent test and 200°C for the steel test), power supply to the rods (7 to 50 kw per one rod) and number of heater rods in the test section (one rod or seven rods).

Phenomenological investigation of the data was conducted and observations were summarized as follows.

- (1) Effect of discharge position which phenomenologically represents break location in a reactor situation was significant in flow conditions in the test section. Depressurization rate, time to surface temperature rise and dried surface region were affected by the flow conditions. It suggests that the flow condition in the core may be the controlling factor to determine clad temperature even in a reactor situation when surface flux is not so high.
- (2) In the case of top discharge closely representing hot leg break in a reactor situation, initial bubble growth was observed in the upper part of the test section and upward flow was established during blowdown. Surface temperature of rods started to rise quite rapidly soon after the rods were exposed to high quality two phase flow from the top end first proceeding down to about middle of the rod. Approximately bottom half of the rod was submerged in violent bulk boiling region and thus no temperature rise was observed. It is indicated from this observation that if upward flow is maintained, the rod can be effectively cooled down until the surface is dried out due to the lack of liquid film on the surface.
- (3) In the case of bottom discharge which represents break location closer to lower plenum in a reactor situation, initial bubble generation was concentrated in the lower portion of the test section. Bulk boiling occurred in the whole test section lasting for about a few seconds until downward two

phase annular flow developed. The quasi steady downward flow continued until entering water from the upper plenum region became unavailable. During this period, downward liquid film flow established on surface of the rod and its disappearance due to lack of water supply from the plenum resulted in the surface temperature rise. The disappearance was observed in the upper section of the test section first. Spacer effect was apparent because region near spacers even in the upper section was covered by local liquid film longer than region between spacers and thus temperature rise was delayed in this region. It seems that liquid film on the rod surface governed time to temperature rise when downward flow was present.

(4) In the case of simultaneous discharge, initial bubble growth due to bulk boiling took place throughout the test section and separation of upward steam flow and downward liquid flow was observed. Liquid film formed on the rod surface disappeared almost at the same time throughout the test section and surface temperature at all position showed rapid increase simultaneously. Lack of both quasi steady upflow as observed in top discharge and downflow as in bottom discharge indicated that amount of water remained in the test section was not enough to effectively cool down the rods. Thus flow separation or stagnation similar to that observed in the test section may be anticipated to occur in a reactor situation resulting in early surface temperature rise of fuel rods.

The above observation seems to indicate within the ranges of experimental parameters that fluid behaviour in the core region may be one of major controlling factors to govern temperature behaviour of the rods. Therefore model development including detail fluid behaviour is needed and especially inclusion of effects of spacers and grid on flow behaviour, slip between liquid and vapor and two dimensional effect in the core region should be taken into account for more accurate prediction of DNB occurrence during blowdown.

## 目 次

1. 序 言 .....	1
2. 実験装置及び実験方法 .....	1
3. 実験結果の検討 .....	6
3.1 テスト部圧力 .....	6
3.2 テスト部上下差圧 .....	8
3.3 テスト部温度 .....	9
3.4 発熱体温度 .....	10
3.5 放出オリフィス前後差圧と放出タンク液位、液温 .....	15
4. 実験データと観察結果の対応 .....	53
4.1 上部放出 .....	53
4.2 下部放出 .....	54
4.3 同時放出 .....	55
5. 実験パラメータの影響 .....	57
6. 結 言 .....	59

## FIGURE

- 2.1.1. Schematic Flow Sheet of the Facility
- 2.2.1. Locations of Instrumentations
- 3.1.1. Typical Pressure Transients in the Test Section
- 3.1.2. Effect of Discharge Mode on Test Section Pressure
- 3.1.3. Pressure Transient of Top Discharge
- 3.1.4. Pressure Transient of Bottom Discharge
- 3.1.5. Pressure Transient of Simultaneous Discharge
- 3.1.6. Specific Vapor Volume per Unit Latent Heat
- 3.1.7. Pressure Transient of Bottom Discharge with Lower Initial Temperature
- 3.1.8. Pressure Transient of Bottom Discharge with Protection Water
- 3.1.9. Pressure Transient of Bottom Discharge with Single Heated Rod
- 3.1.10. Effect of Initial Pressure on Test Section Pressure Transient: Bottom Discharge
- 3.1.11. Effect of Initial Pressure on Test Section Pressure Transient: Top Discharge
- 3.2.1. Effect of Discharge Mode on Pressure Differential in the Test Section
- 3.2.2. Effect of Vapor Generation on Pressure Differential in the Test Section: Bottom Discharge
- 3.2.3. Effect of Vapor Generation on Pressure Differential in the Test Section: Top Discharge
- 3.3.1. Test Section Temperature of Bottom Discharge
- 3.3.2. Test Section Temperature of Top Discharge
- 3.3.3. Test Section Temperature of Simultaneous Discharge
- 3.4.1. Thermocouple Position of Heater Rod
- 3.4.2. Rod Temperature of Bottom Discharge: RUN 1101
- 3.4.3. Rod Temperature of Bottom Discharge: RUN 1102
- 3.4.4. Rod Temperature of Bottom Discharge: RUN 1112
- 3.4.5. Rod Temperature of Bottom Discharge: RUN 1201
- 3.4.6. Rod Temperature of Bottom Discharge: RUN 2104
- 3.4.7. Rod Temperature of Top Discharge: RUN 1103
- 3.4.8. Rod Temperature of Top Discharge: RUN 1104
- 3.4.9. Rod Temperature of Top Discharge: RUN 1113
- 3.4.10. Rod Temperature of Top Discharge: RUN 1202
- 3.4.11. Rod Temperature of Top Discharge: RUN 2103
- 3.4.12. Rod Temperature of Top Discharge: RUN 2106



## FIGURE

- 3.4.13. Rod Temperature of Simultaneous Discharge: RUN 1105
- 3.4.14. Rod Temperature of Simultaneous Discharge: RUN 1106
- 3.4.15. Rod Temperature of Simultaneous Discharge: RUN 1111
- 3.4.16. Rod Temperature of Simultaneous Discharge: RUN 1203
- 3.4.17. Rod Temperature of Simultaneous Discharge: RUN 2101
- 3.4.18. Power Profile of the Cosine Power Rod
- 3.4.19. Rod Temperature of the Cosine Power Rod: RUN 3101
- 3.4.20. Rod Temperature of the Cosine Power Rod: RUN 3105
- 3.4.21. Rod Temperature of the Cosine Power Rod: RUN 3106
- 3.4.22. Rod Center Temperature: RUN 3101
- 3.4.23. Rod Center Temperature: RUN 3105
- 3.4.24. Rod Center Temperature: RUN 3106
- 3.5.1. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1101
- 3.5.2. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1102
- 3.5.3. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1201
- 3.5.4. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 2104
- 3.5.5. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 3101
- 3.5.6. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 3105
- 3.5.7. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 3106
- 3.5.8. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1103
- 3.5.9. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1104
- 3.5.10. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1113
- 3.5.11. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1202
- 3.5.12. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 2103
- 3.5.13. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 2106

FIGURE

- 3.5.14. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1105
- 3.5.15. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1106
- 3.5.16. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1203
- 3.5.17. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 2101

TABLE

- 2.1.1. Major Dimensions of the Facility
- 2.2.1. List of Instrumentations
- 3.1.1. Experimental Conditions
- 3.4.1. Major Dimensions of Heater Rod

## 1 序 言

軽水炉の冷却材喪失事故時におけるブローダウン中の炉心内冷却材の挙動は、燃料棒と冷却材間の熱伝達を左右し、事故過程全体を支配する。従って、冷却材の挙動並びに、熱伝達の機構を正確に把握することは、軽水炉の安全性評価をより精度よくするためには欠かすことはできない。原研では、このような事故時の冷却材の挙動を総合的に調べるために、R O S A計画を実施している。しかし、R O S A実験装置は、事故時の冷却材の熱水力学的挙動を、非常冷却水注入系を含めて総合的かつ全過程に汎って調べるように設計製作してあるために、大型かつ複雑である。従って、炉心での冷却材挙動をより詳しく調べるには不適當である。このような欠点を補うための実験がブローダウン伝熱流動実験でブローダウン中の炉心での冷却材挙動をより詳細に調べることを目的としている。

本報告では、昭和50年度に行なった、透明テスト部を用いたブローダウン実験の実験結果について、データの定性的な解釈を行ない、ブローダウン時の諸現象について得られた知見を報告する。

## 2 実験装置の概要と実験手順

実験装置の概要を示すフローシートをFig. 2.1.1に示す。また、装置の主要諸元をTable 2.1.1に示す。

テスト部は、7本の発熱体（直径10.7 mm、発熱長2 m、配列ピッチ15.3 mm、最高熱流束 $1.6 \times 10^6$  kcal/hrm<sup>2</sup>）を挿入できる、内径48 mm長さ約2.5 mの円筒型容器である。内部観察を可能にするために、テスト部は主として石英ガラス管（内径48 mm、長さ500 mm）で構成されている。テスト部には、主循環ポンプ（最大流量400 l/min）で水を循環し、系全体は、チソガスにより加圧器で加圧する。また、冷却材注入時の影響を調べるために、蓄圧器から冷却水を注入することができる。ブローダウンは、急速放出電磁弁（作動時間20 msec以下）を開放して行なう。放出弁は、テスト部入口側、出口側にそれぞれあって、オリフィス口径を適宜選択することにより放出口径を変えることができる。

実験データは、高速デジタル記録計（DATAC-2000B）に集録し、計算機で処理する。

Fig. 2.2.1に計測点フローシートを示し、Table 2.2.1に、計測項目の一覧を示す。

実験は所定の初期条件に到達するまで、予熱器及び発熱体により徐々に昇温、昇圧し、初期条件に達した時点で、放出を開始する。放出時にはテスト部を循環ループから独立させるために遮断弁（MV<sub>3</sub>、MV<sub>4</sub>）を閉じる。また、発熱体への電力は、あらかじめ設定した関数に従って制御し、発熱体温度が設定温度に達した時に、発熱体保護のために電源を切る。系圧力が大気圧に下がった時点でブローダウン実験を終了する。

## 1 序 言

軽水炉の冷却材喪失事故時におけるブローダウン中の炉心内冷却材の挙動は、燃料棒と冷却材間の熱伝達を左右し、事故過程全体を支配する。従って、冷却材の挙動並びに、熱伝達の機構を正確に把握することは、軽水炉の安全性評価をより精度よくするためには欠かすことはできない。原研では、このような事故時の冷却材の挙動を総合的に調べるために、ROSA計画を実施している。しかし、ROSA実験装置は、事故時の冷却材の熱水学的挙動を、非常冷却水注入系を含めて総合的かつ全過程に亙って調べるように設計製作してあるために、大型かつ複雑である。従って、炉心での冷却材挙動をより詳しく調べるには不適當である。このような欠点を補うための実験がブローダウン伝熱流動実験でブローダウン中の炉心での冷却材挙動をより詳細に調べることを目的としている。

本報告では、昭和50年度に行なった、透明テスト部を用いたブローダウン実験の実験結果について、データの定性的な解釈を行ない、ブローダウン時の諸現象について得られた知見を報告する。

## 2 実験装置の概要と実験手順

実験装置の概要を示すフローシートをFig. 2.1.1に示す。また、装置の主要諸元をTable 2.1.1に示す。

テスト部は、7本の発熱体（直径10.7 mm、発熱長2 m、配列ピッチ15.3 mm、最高熱流束 $1.6 \times 10^6$  kcal/hrm<sup>2</sup>）を挿入できる、内径48 mm長さ約2.5 mの円筒型容器である。内部観察を可能にするために、テスト部は主として石英ガラス管（内径48 mm、長さ500 mm）で構成されている。テスト部には、主循環ポンプ（最大流量400 ℓ/min）で水を循環し、系全体は、チソガスにより加圧器で加圧する。また、冷却材注入時の影響を調べるために、蓄圧器から冷却水を注入することができる。ブローダウンは、急速放出電磁弁（作動時間20 msec以下）を開放して行なう。放出弁は、テスト部入口側、出口側にそれぞれあって、オリフィス口径を適宜選択することにより放出口径を変えることができる。

実験データは、高速デジタル記録計（DATAC-2000B）に集録し、計算機で処理する。

Fig. 2.2.1に計測点フローシートを示し、Table 2.2.1に、計測項目の一覧を示す。

実験は所定の初期条件に到達するまで、予熱器及び発熱体により徐々に昇温、昇圧し、初期条件に達した時点で、放出を開始する。放出時にはテスト部を循環ループから独立させるために遮断弁（MV<sub>3</sub>、MV<sub>4</sub>）を閉じる。また、発熱体への電力は、予かじめ設定した関数に従って制御し、発熱体温度が設定温度に達した時に、発熱体保護のために電源を切る。系圧力が大気圧に下がった時点でブローダウン実験を終了する。

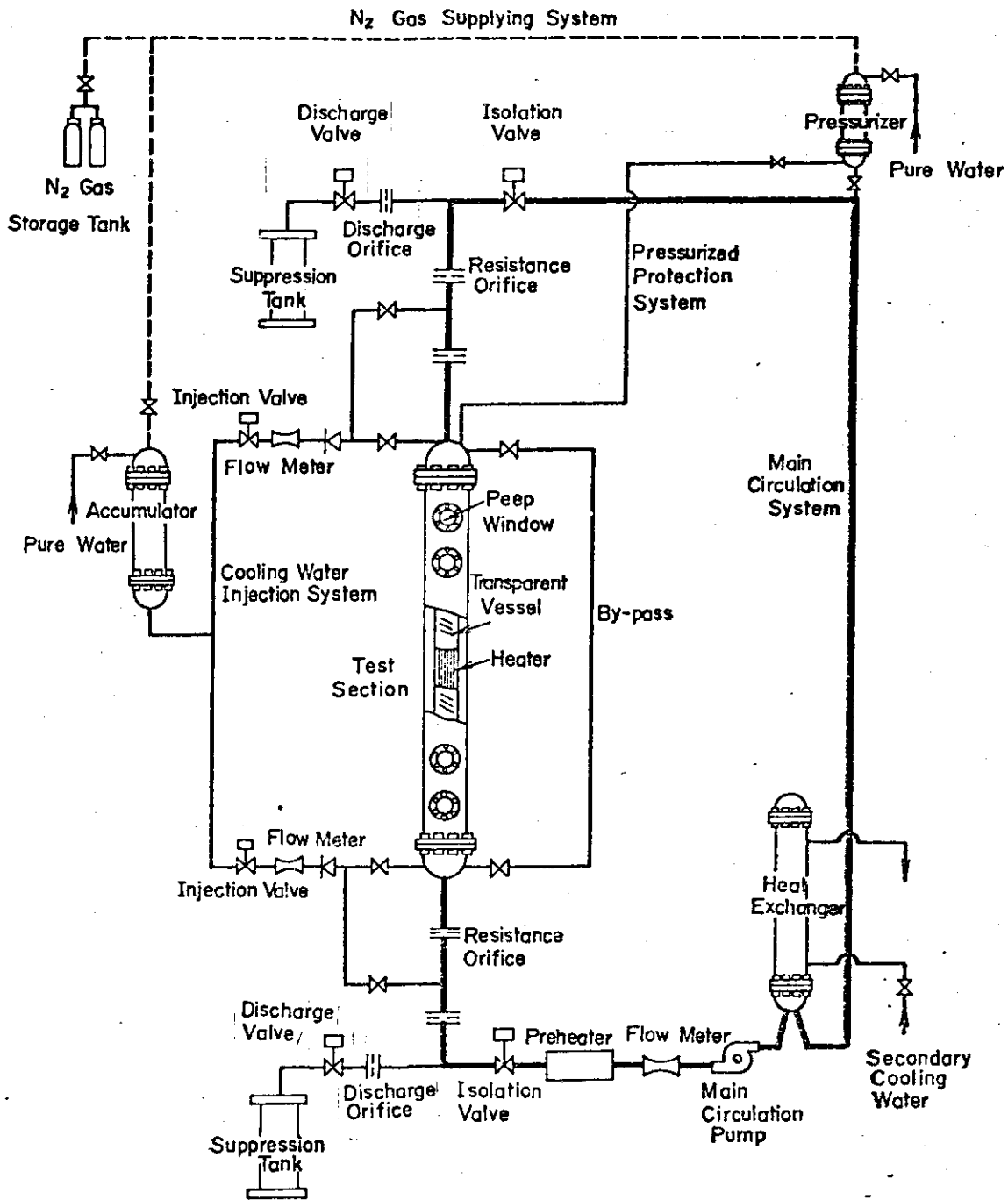


Figure 2.1.1. Schematic Flow Sheet of the Facility

Table 2.1.1 Major Dimensions of the Facility

Component volumes (m <sup>3</sup> )	
Test section	0.00422
Upper plenum	0.00299
Lower plenum	0.00418
Top discharge piping	0.00140
Bottom discharge piping	0.00198
Heater rods	0.00173
Test section internals	0.00036
Component height (m)	
Test section	2.148
Upper plenum	0.324
Lower plenum	0.406
Heated section	2.0
Net fluid volumes in each component (m <sup>3</sup> )	
Test section	0.00387
Upper plenum	0.00285
Lower plenum	0.00400
Top discharge piping	0.00140
Bottom discharge piping	0.00198
Total fluid volume	0.01310
Flow area (m <sup>2</sup> )	
Test section	0.00133
Upper plenum	0.01459
Lower plenum	0.01443
Discharge pipings	0.00060
Maximum operating condition	
System pressure (Ata)	30.0
System temperature (°C)	232
Flow rate (m <sup>3</sup> /sec)	0.0067
Electric power to heater rods (KVA)	550.0
Mass flux in Test Section (kg/m <sup>2</sup> hr)	$1.629 \times 10^7$
Fluid velocity in Test Section (m/sec)	5.04

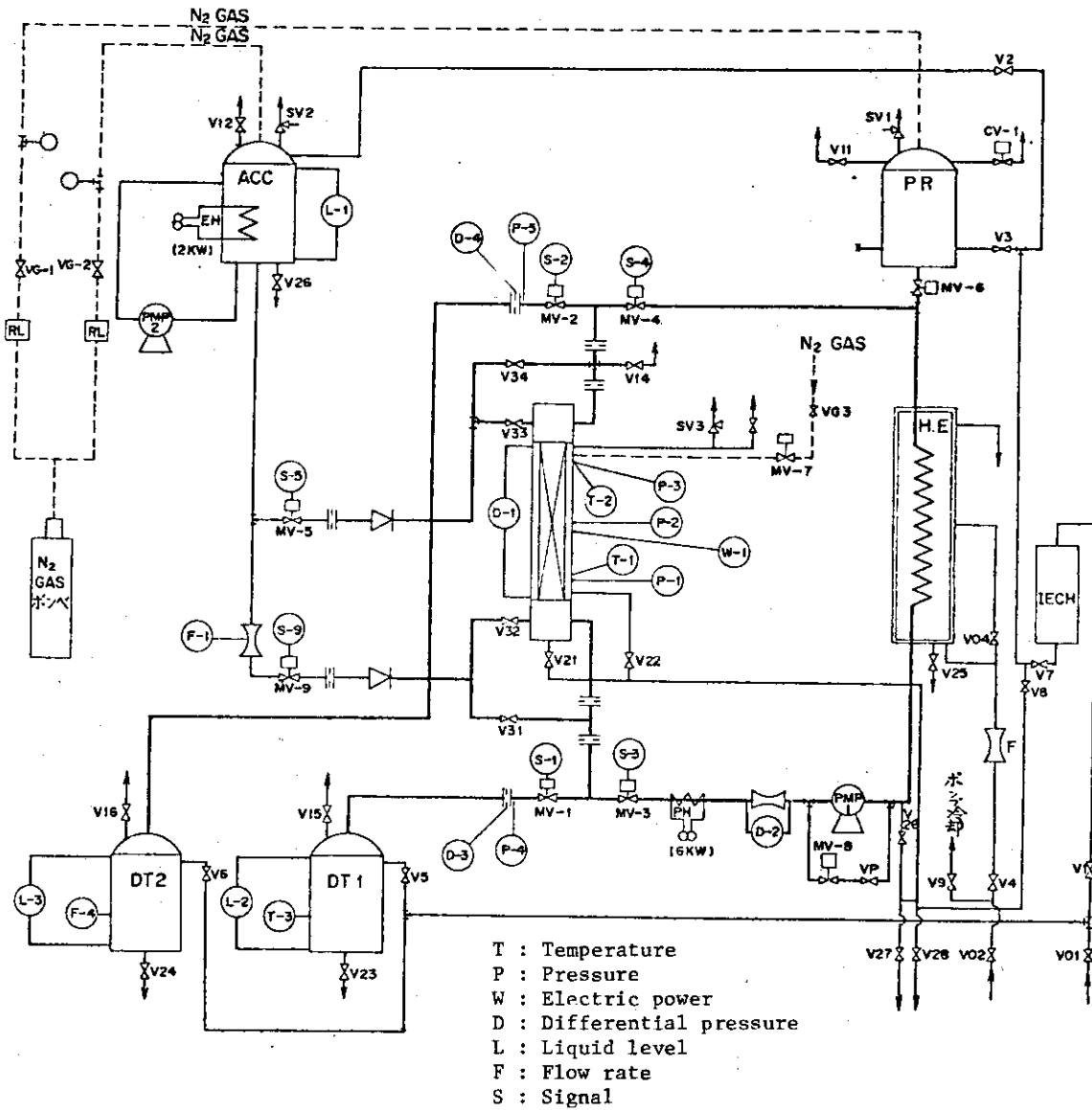


Figure 2.2.1. Locations of Instrumentations

TABLE 2.2.1 LIST OF INSTRUMENTATIONS

Channel No.	Item	Symbol	Position	Type of sensors	Range	Accuracy
1	Rod surface temperature	TF-1	Center rod	0.5 mm $\phi$ CA thermocouple	0~1000°C	$\pm 1.4$ %
2		TF-2				
3		TF-3				
4		TF-4				
5		TF-5				
6		TF-6				
7		TF-7				
8		TF-8				
9		TF-9				
10		TF-10				
11	System temperature	T-1	Test section inlet	1.0 mm $\phi$ CA thermocouple	0~300°C	
12		T-2	Test section outlet			
13		T-3	Discharge tank No.1			
14		T-4	Discharge tank No.2			
15	Differential pressure	D-1	Test section inlet-outlet	Differential pressure transducer	0~1 ata	$\pm 1.0$ %
16		D-2	Circulation loop orifice		0~0.1 ata	
17		D-3	Bottom discharge orifice		0~30 ata	
18		D-4	Top discharge orifice		0~30 ata	
19	Water level	L-1	Accumulator	Semiconductor pressure transducer	0~1 mH <sub>2</sub> O	$\pm 2.4$ %
20		L-2	Discharge tank No.1		0~2 mH <sub>2</sub> O	
21		L-3	Discharge tank No.2		0~2 mH <sub>2</sub> O	
22	Pressure	P-1	Test section inlet	Semiconductor pressure transducer	0~30 atg	$\pm 2.4$ %
23		P-2	Test section middle			
24		P-3	Test section outlet			
25		P-4	Upstream of bottom discharge orifice			
26		P-5	Upstream of top discharge orifice			
27	Electric power	W	Heater rod	Power transducer	0~555 KVA	$\pm 1.0$ %
28		Valve operation signal	MV-1	Bottom quick opening valve	Relay signal voltage generator	0~7 V
	MV-3		Bottom quick closing valve	0~5 V		
	MV-5		Top water injection valve	0~9 V		
	MV-2		Top quick opening valve	0~8 V		
	MV-4		Top quick closing valve	0~6 V		
29		MV-9	Bottom water injection valve	Turbine meter	0~10 V	
		F-2	Accumulator piping		210~1200 $\pm$ /h	
30	Flow rate					



### 3 実験結果

本シリーズの実験は、ブローダウン実験装置の機能を調べることで、ブローダウン現象を目視観察することにより現象を把握しておくことを目的とした。従って実験パラメータには、初期圧力、初期液温、発熱体電力、放出位置及び口径、発熱体本数、保護容器内の水の有無を選びそれぞれの及ぼす影響を調べた。本シリーズ実験の実験条件の一覧を Table 3.1.1 に示す。

RUN 1100 は、発熱体を加熱しない実験で比較のためのものである。RUN 1101~2104 は、いずれも、テスト部初期圧力を約 7 atg に設定した実験である。このうち、RUN 1101~RUN 1113 は 7 本の発熱体を発熱させた上、保護筒内には水を満たした実験で、RUN 1201~1203 は保護筒に水を満たさない場合の実験である。RUN 2101~3106 は、発熱体 7 本のうち 1 本だけを加熱したもので、このうち、RUN 3101~3106 では、 $\cos$  状の発熱分布をもった発熱体を使用している。RUN 1109, 1110 を除いたすべての RUN は放出開始と同時に遮断弁を閉じて、テスト部を独立な系として使用したものである。放出形式については、上部放出、下部放出、同時放出を選び、それぞれについて初期液温などのパラメータを変えて実験を行なった。

本節では、これらの実験結果について、計測項目別に実験データの定性的な検討を行なった結果を述べる。

#### 3.1 テスト部圧力

Fig. 3.1.1 は、テスト部圧力変化を示した例である。図で「BDHT」に続く番号は実験番号を示し、記号（□、○など）に続く番号は、Table 2.2 に示すチャンネル番号を示している。図から明らかのように、定常運転時のテスト部圧力はテスト部入口と出口間で、約 0.6 ata の圧力差がある。静圧水頭差が 0.23 ata であるから、流動による圧力損失が定常時に約 0.37 ata あることになる。しかし、放出開始直後から、流動による圧損が減少することと、テスト部内のボイド発生に伴いテスト部内圧力はほぼ一様になる。そこでテスト部圧力の代表値としてテスト部中央の圧力を選び、それぞれの実験値を比較することにする。

Fig. 3.1.2 は初期圧力が約 7 atg、初期テスト部入口温度が約 150℃ の場合について、テスト部圧力を比較したものである。RUN 1101 と 1103 は 10 mm  $\phi$  のオリフィスを用いた、それぞれ下部放出、上部放出であり、1105 は 5 mm  $\phi$  のオリフィスを 2 個用いた上部、下部同時放出である。いずれの場合も、放出開始後約 5 秒間、圧力が上昇する。これは放出による水、蒸気の体積減少割合よりも発熱体による沸騰に伴う蒸気発生による気泡の体積増加割合の方が大きいことを示している。従って、発熱体の数を減らせば、蒸気発生による効果は減少し、圧力上昇の割合は小さくなる。また、保護筒内に水を満たさない場合や、加熱量の多い場合には蒸気発生による効果は増大する。

Fig. 3.1.3 に、上部放出について、それらの影響を示す。RUN 1103 と RUN 1113 の相違は、発熱体入力の違いである。図から明らかなように、発熱体入力が多い RUN 1113 では、放出初期の圧力上昇割合が RUN 1103 より大きい。但し、RUN 1113 の初期液温度は、RUN 1103 の場合より高いので、電気入力の影響は、実際には図よりも小さい。RUN 1113 と 1202

は、1113では保護筒に水があるのに対して、1202では、保護筒には水を入れていない場合である。テスト部圧力の違いは、ガラス管から保護筒内の水に伝わる熱量の影響を示している。即ち、保護筒内の水は、テスト部内の冷却材保有エンタルピを減少させる効果を持っているが、その影響は顕著ではない。RUN 2103は、7本の発熱体のうち、中心の発熱体のみを発熱したものである。RUN 1103と比較すると、発熱量がRUN 1103では6.23KW/発熱体であるのに対し、RUN 2103では5.0KWである。従って、発熱量の小さいこと、また、気泡発生に寄与する発熱体表面積の小さいことが、圧力上昇割合の小さい原因である。

同様にテスト部圧力変化を下部放出、同時放出についてFig. 3.1.4及びFig. 3.1.5に示す。Fig. 3.1.4では、Fig. 3.1.3で示したのと同様に、気泡発生に寄与する因子の影響がブローダウン中の圧力変化に現われている。一方、Fig. 3.1.5で示した同時放出については、保護筒内の水の影響があることは、RUN 1105、RUN 1203の比較で明らかであるが、顕著な差ではない。また、単一発熱体の場合に破断後2.5秒以後圧力が他の場合より高く、ブローダウン時間が長くなっているのは、発熱体の温度が他の実験よりも高く保たれている効果である。つまりRUN 2101では、発熱体保護のために発熱体表面温度が600℃になった放出開始後10秒の時点で電源を切ったが、他のRUNは、すべて400℃で電源を切っている。従って、電源を切った後ふく射により蒸気に与えられる熱は、RUN 2101の方が他のRUNよりも多く、そのため系内の圧力が高くなっている。

以上のように、本実験の実験範囲では、放出開始後の圧力上昇が顕著であるが、これは、放出による減圧よりも、発生蒸気による加圧効果が大きいことを示している。従って、蒸気発生に寄与する発熱面積や発熱量が大きいほど圧力上昇が大きい。

また、透明テスト部保護のための水の有無は、除熱源としての効果が多少あるが、大きな影響ではない。これはガス管から、外部の水へ伝わる熱量は保護筒内の水温上昇から約5KWと推定でき、発熱量の5.0KWに比べてかなり小さいことが原因である。初期の保有水量と発熱体表面積の比をとると、TROJAN炉で $13.7\text{m}^{-1}$ 、ROSA-IIで $5.7\text{m}^{-1}$ ブローダウン装置の7本バンドルのとき $3.14\text{m}^{-1}$ であり、ブローダウン装置では、発熱体による発泡による影響が出易い。

単一発熱の場合には、 $4.5\text{m}^{-1}$ でROSA-IIに近い値であるが、単位蒸発潜熱あたりの蒸気比容積はFig. 3.1.6でみるように低圧であるほど大きくなる。従って、低圧実験では蒸気発生の影響が著しい。

Fig. 3.1.2では、初期の圧力上昇の他に、放出形式による、テスト部圧力変化の傾向の違いをみることができる。下部放出のRUN 1101は、上部放出のRUN 1103と比べ、圧力上昇後の減圧速度がゆるやかである。これは、上部放出では、蒸気放出になる時刻が、下部放出の場合より早く、急激に圧力が減ることが原因である。下部放出では、放出に伴ってテスト部内の水が激しく上下に振動しながら、次第に蒸気放出へと移行する。こういった放出形式による違いは、初期液温の違いや、発熱体本数の違いのある場合にも見ることができる。Fig. 3.1.7は、初期液温のやや低い場合であるが、全体の傾向はFig. 3.1.2と同様である。また、保護筒に水を入れない場合及び単一発熱の場合についての比較を、それぞれ、Fig. 3.1.8およびFig. 3.1.9に示す。保護筒に水のない場合のFig. 3.1.8は、Fig. 3.1.7に比べやや減圧速度が遅い他は、同じ傾向である。Fig. 3.1.9の場

合の圧力変化は、放出後の圧力上昇が、Fig. 3.1.2, Fig. 3.1.6, 3.1.7に比べ顕著ではない。従って、放出形式による差も他の場合ほど大きくない。これは、単一発熱体であるために、非発熱の発熱体に接する冷却材の影響が大きく、発熱体からの気泡の影響があまり大きくないことが主な原因である。

Fig. 3.1.10は、初期圧力の違いを、下部放出の場合について比較したものである。RUN3106を除き、放出オリフィス径は10 mm  $\phi$ であり、RUN3106では5 mm  $\phi$ のオリフィスを使用している。RUN3105と3101の違いは、初期圧力の大きさだけであり、圧力変化はほぼ相似である。RUN2104は、7 atgからの放出であり、放出後の圧力上昇がある。これに対し、RUN3105, 3101には、圧力上昇は全くない。RUN3106は、放出口径が5 mm  $\phi$ となり、放出面積がRUN3101の1/4である。従って、流出流量も少なく発生蒸気の影響が大きく、下部放出の場合に特有な圧力変化を示している。Fig. 3.1.11は上部放出についての比較である。初期圧力が高いと、圧力回復の度合いが小さいことがわかる。

以上の結果から、今回のブローダウン実験シリーズで得られたテスト部圧力変化は、次のような傾向のあることがわかる。

- 放出形式によらず放出開始後数秒間の圧力回復現象がある。
- 圧力回復の度合いは、初期圧力の低い場合、発熱面積の大きい場合、発熱量の大きい場合、保護筒内に水のない場合は大きい。
- 圧力回復は、初期圧力の高い場合には、弱くなるが放出面積が小さい場合には、高圧でも現われる。
- テスト部内での蒸気発生量が、圧力回復現象を左右する。
- 圧力回復後の減圧速度は、上部放出の方が、下部放出より早い。
- 下部放出では、減圧中に圧力回復を数回くり返す。これは、本装置構成に基づく冷却材の挙動に起因する特有な現象である。

### 3.2 テスト部上下差圧

テスト部上下差圧は、テスト部入口、出口側を導圧管で接続して、測定する。2点間の垂直距離は2300 mmである。従って、静圧水頭は、常温で0.23 ataとなる。しかし、定常運転時には、流動抵抗に基づく圧力損失があるため、初期差圧は約0.6 ataとなる。

Fig. 3.2.1は、テスト部上下差圧の違いが明白である。RUN1101は、下部放出で、放出開始後約5秒からわずかながら負圧を示す。この負圧を示している間は、テスト部内で冷却水が下向きに流れている。RUN1103の上部放出では、テスト部内の水は、完全には流出せず、テスト部内の約1/4の高さまで残存している。この場合の同時放出では、上部での減圧が逆流を阻止するため、負圧にはならずすぐに零となる。

下部放出の場合の蒸気発生効果をFig. 3.2.2に見ることができる。RUN1101とRUN2104は、殆んど区別できない。これは、RUN1101のテスト部での発熱量が40.6 KWであるのに対し、RUN2104では5.0 KWであって、大きな差がないことが原因である。これに対し、RUN1201は、7本バンドルで、発熱面積、発熱量共に大きくテスト部内でのボイド発生により、

テスト部圧力が上昇する。一方、流出による下向きの流れがあって、そのために差圧の程度が大きい。Fig. 3.2.3は、同様な比較を上部放出について行なったものである。これらの差圧データで特徴的な点は、放出開始後にある差圧のパルスの上昇である。RUN 1103では、放出開始後40秒、1113では30秒、1202でも30秒、2103では、10秒、2106では6秒の時点でみられる。この現象は、テスト部内の水が、沸騰により生じた蒸気で吹き上げられ、蒸気が吹き抜けると水が落下する、振動的な流動を示すことに対応している。さらに予熱器出口側配管とテスト部とが、U字管状の構成であるためこの中で流動が振動的であることも原因である。なかでも、2106は、初期圧力が高く振動現象が著るしい。それぞれのRUNにある差圧振動の波形は、時間軸のずれを除けば、ピークがそれぞれ対応している。このことから、これらの振動が装置構成上特有な現象である可能性が強い。

以上の結果から、テスト部上下差圧については、次のことが言える。

- ・ 下部放出では、差圧は放出開始後、数秒で負になる。負圧の原因は、テスト部上部の圧力上昇と放出に伴うテスト部下部の減圧によるもので、テスト部内は逆流である。
- ・ 上部放出では、テスト部内の差圧は常に正で、残存している水が激しく上下に振動しながら流動する。振動は主としてバルク沸騰によるが、装置固有の現象もあって、比較的規則的な波形を示す。
- ・ 同時放出の場合は、振動も少なく、負圧になることもない。

### 3.3 テスト部温度

テスト部内の液温は、テスト部入口及び出口のテスト部圧力、差圧測定位置と同位置で測定した。熱電対の挿入位置は、中心発熱体近くの流路サブチャンネル内である。熱電対はCA 1.0 mm  $\phi$ を使用した。

Fig. 3.3.1は、下部放出の場合のテスト部上部、下部温度の変化である。実線は、テスト部下部破線はテスト部上部での液温である。いずれのRUNでも、実線はほぼ飽和温度に等しい。RUN 1101と1102では、上部温度の方が下部温度よりも高く、過熱蒸気が存在していることを示している。これは、蒸気発生の影響が小さいので、テスト部内の冷却材の沸騰に伴う混合の効果が弱く、初期の上下温度差が比較的良好に保たれる上に、冷却材の流出に伴って、上部が蒸気中に露出することが原因である。しかし、発熱量の多いRUN 1102では放出開始後2秒から6秒の間で、下部温度に乱れがあるのは、テスト部内の流体の混合がRUN 1101に比べてより大きく、テスト部上部及び上部放出配管内の未飽和水が、一時的に押し戻され、流出を妨げていることを示している。RUN 1112、2104及び3105では、上部、下部の温度が逆転する。この場合にも、実線は飽和温度にほぼ等しい。従って、テスト部上部では、始めのうちは過熱状態で、後にサブクール状態になる。初期の過熱状態は、放出に伴う減圧とバルク沸騰により発生した蒸気が発熱体の露出に伴って加熱されているためであり、サブクール状態は、テスト部及び上部放出配管の中に残っているサブクール水が、上部プレナム内に流入し、テスト部上部を冷却しているためである。これらの温度の逆転は、蒸気発生によるテスト部内冷却材流動へ及ぼす影響が小さいRUN 2104及び3105では逆転の持続時間も短かく、テスト部上下間の温度差も殆んどないしテスト部内は、全体にわたりほぼ飽和温度であ

る。

Fig. 3.3.2は、上部放出時のテスト部上下部温度である。実線が下部、破線が上部の温度を示している。上部放出時には、上部の液温が飽和温度にほぼ等しく、下部の温度がやや高い。上部が飽和温度になっているのは、流出する2相流が、飽和温度であり、その影響を直接受けているためである。一方、下部温度が上部温度よりも高く、飽和温度以上である部分については、発生蒸気の影響であると考えられる。とくに、上部放出の場合、下部プレナム近くの流体は、流出しにくく、常に沸騰による発生蒸気が存在している。しかし、熱電対取付位置の影響の可能性も考えられ、下部温度が飽和温度以上であることの原因について明確には結論できない。

上部下部同口径のオリフィスを用いた同時放出についての、上下部液温をFig. 3.3.3に示す。RUN1105とRUN1106では温度の示す傾向が、殆んど同じである。共に、実線で示す下部温度が、放出開始後約7秒間、上部温度は上昇を続け、この間にテスト部内の流体が温度差を保って上下に流出する。放出開始後7秒の時点でテスト部内の水はほとんどなくなり、テスト部内はほぼ均質な蒸気で満たされる。その後は、テスト部内蒸気の内対流の効果で、上部温度が下部温度よりも高くなる。7秒の時点での系内の温度は、未飽和であるが、これは、保護筒内の水による冷却効果によるものである。RUN111, 1203, 1201はいずれも、上部温度より下部温度が放出後に高くなる。これは、下部放出の場合と同様に、テスト部がほとんど空になった状態で、過熱された蒸気が下部から流出することと、上部では、上部プレナム内の残存水が流入し蒸発することにより飽和温度になることが原因である。

以上の結果から、ブローダウン中の上下部液温について、次のようなことがわかった。

- 下部放出時のブローダウン初期には、テスト部上部では、発生蒸気の影響で下部よりも温度が高いが、それ以後では、逆に上部配管、プレナム等の残存水が流入するので、逆に下部の温度が高くなる。電気入力が大、初期圧力が大なほど冷却材の混合がよくなり、テスト部の温度は、ほぼ一樣になる。
- 上部放出では、放出初期の下部液温は、ほとんど一定である。上部液温は、飽和温度にほぼ等しい。
- 上下部同時放出では、上部液温、下部液温共に放出初期に飽和温度に近づく。テスト部内の水がなくなる時点で、下部の温度が、上部温度が上まわり、下部放出の場合と同じ傾向を示す。

### 3.4 発熱体温度

発熱体温度は、発熱体に取付けた熱電対 (CA 0.5 mm  $\phi$ ) で測定した。熱電対は、シース表面に溝を切って埋め込み、さらにその外側にさやをかぶせてある。熱電対の軸方向の取付位置及び半径方向の取付位置をFig. 3.4.1に示す。また発熱体の主要諸元をTable 3.4.1に示す。実験ではRUN 3101, 3105, 3106を除いて、WATLOW社製の発熱体を用いた。3101, 3105, 3106については、助川電機製のcos 状発熱分布をもった発熱体を用い、この発熱体では、中心温度の測定を試みた。

Fig. 3.4.2からFig. 3.4.6までは、下部放出時の発熱体温度の変化である。いずれも中心発熱体の温度である。Fig. 3.4.2に示すRUN1101は、発熱体電力が最も低い場合である。温度上

昇は、テスト部内の冷却材が放出に伴って減少し、発熱体が露出し十分な冷却が行われなくなったためにおきたものである。温度は、放出開始後33秒で電源を切る時点まで上昇を続ける。温度上昇を開始する時刻は、最上部にあるTF1が最も早い、殆んど温度は上昇しない。これは、下部放出であるため、冷却材が下向きに流れ、上部が最初に露出することと、熱電対の取付位置が、発熱部の上部から2mm離れた非発熱部上にあることが原因である。TF1以外の温度上昇は、上部の熱電対から順に上昇する。TF7, 9, 10については、温度上昇開始時刻が他の位置よりも約10秒遅れる。TF7は、中央のスペーサ下端から53.6mmしか離れていないためスペーサ上端近くに一時的にたまる水が、時折落下してTF7を冷却することが原因である。TF9についても同様なことが言えるが、テスト部下部には比較的水が残りがやすく、TF9およびTF10の温度上昇を遅らせている。温度上昇中のそれぞれの熱電対の示す温度は、全体として、スペーサ近くでは低くスペーサとスペーサの間付近が温度上昇開始も早く、上昇後の温度も高い。Fig. 3.4.3は、RUN1102の結果で発熱体電力をRUN1101の約70%増しにした下部放出である。この場合にも、上部から温度上昇が始まる。温度上昇に要する時間がRUN1101より短かいのは、電力が大きいことによる。また、TF2の示す温度が44秒の時点でクエンチするのは、最上部にあるスペーサによって落ちにくくなっていた上部プレナム内の水が、テスト部内での激しい水、蒸気の上下振動に伴ってスペーサーを通過して押し下げられてくることが原因である。同様に、TF1の温度が22秒で一時上昇するのは、押し上げられて来た蒸気の影響である。スペーサに近い熱電対の温度の上昇が遅れる傾向は、RUN1101と同様である。Fig. 3.4.4に示すRUN1112では、RUN1102よりもさらに出力を増した下部放出である。熱電対の示す定性的な傾向は、RUN1102と殆んど差がない。TF6と8が、放出開始後5秒で一時温度上昇するが、これは、テスト部の第1セクションと第2セクションそれぞれの中央部分にボイドが発生し、それぞれ水、蒸気を上下に押し上げ、押し下げる結果である。しかし、テスト部内の流体の動きにより、この状態は間もなく解消し、放出開始後20秒の温度上昇開始点までは、準定常的な下向き流れが続きほぼ一定の温度を示す。RUN1112でもTF2は放出開始後44秒でクエンチする。Fig. 3.4.5に示すRUN1201では、TF1からTF6及びTF8の示す温度はRUN1112と殆んど差がない。しかし、TF9の温度は24秒で一時的に温度が下がるが、26秒で再び上昇し、32秒でクエンチする。また、放出開始後5秒で、わずかではあるが、全体に一時的な温度の上昇がある。これは、RUN1201では保護筒に水を入れていないので、水による除熱効果が少なく発生蒸気の影響でテスト部内の水の流動はRUN1112より激しくなり、そのために、気泡発生の影響の及ぶ範囲が大きく、TF6, 8以外の場所でも、温度上昇がある。また、TF10がRUN1201の方が早くクエンチするのは、RUN1112では、保護筒の水によって冷やされているガラス管に接する部分の冷却材の温度が低く、テスト部内の水は、ガラス管壁に近い部分に集まって流れる。一方RUN1201では、ガラス管壁は断熱に近く、水に濡れにくいので、冷却材は、テスト部同一断面では、比較的一様に分布し、冷却材の上下流動がテスト部中心流路チャンネル内にも影響を及ぼしている。そのために、TF10が早く冷やされる。Fig. 3.4.6は、7本バンドルの中心発熱体のみを加熱した場合の発熱体温度変化である。他のRUNと著しく異なるのは、テスト部第1セクション内では、温度の上昇がないのに対して、第2, 第3, 第4セクションでは、すべての温度が上昇していることである。第2, 第3, 第4セクションでの温度上昇の順番は、スペ

ーサに遠い部分が最初で、次にスパーサのすぐ下部で上昇する。7本バンドルの場合との違いは、非発熱の発熱体に接するサブチャンネルの総流路が7本発熱の場合より大きく、同一断面での流体の状態が均質ではないことである。中心発熱体まわりのサブチャンネルから、周囲のサブチャンネルへの流体の流れは比較のおこり易いが、周囲のサブチャンネルから中心発熱体サブチャンネルへの流体の流入は発生蒸気に妨げられておこりにくい。従って、中心発熱体囲りに発生した蒸気が、冷却材流入を妨げるために、中心発熱体の温度が上昇しやすくなる。RUN1201では、放出開始後6秒の時点で、一時的に温度が上昇しても、すぐに冷却されてしまうのに対し、RUN2104では、7秒の時点で温度上昇が始まり、そのまま持続する。しかし中心発熱体だけが発熱しているので上部プレナム内の冷却材は、最上端のスパーサを通して下降しやすい。従って第1セクションでの発熱体温度は上昇しない。

上部放出時の発熱体温度の変化をFig. 3.4.7～Fig. 3.4.12に示す。Fig. 3.4.7及び3.4.8に示すRUN1103及びRUN1104は、それぞれ初期液温が147℃である以外、ほぼ同一条件下の放出である。いずれの場合にも、上部にあるTF2の温度が最初に上昇する。これは、上部の流体が先に流出することの影響であり、TF1は、非発熱部にあるため上昇開始がTF2より少し遅れている。第1セクションにあるTF3は、RUN1104ではTF2と同時に、RUN1103では、TF4及び5と同時に上昇する。この違いは、第1セクション内での気泡発生が、RUN1104では中央部であり、RUN1103では、やや上部に片寄っていたことが原因である。しかし、RUN1103及び1104共に第2セクション内の温度上昇時期は、第1セクションの温度上昇から、約3秒後である。またTF4と5が、電源を切る前にクエンチするのは、第3セクション及び第4セクションに残っている水が沸騰して上向きに蒸気を吹き上げ、それに伴って液塊が、第2セクションの中で上向きに吹き上げられる。それが、第2セクション上部のスパーサに衝突し、逆にそこから落下する。この液塊が、TF4及びTF5を冷やしている。電源を切った後でのクエンチは、TF3については、第1セクション内での液塊の吹き上げによるものであるが、TF1及びTF2は、上部プレナムからの落下液膜に基づくものである。RUN1103、1104共に、TF6～10までは、温度上昇はなく、バルク沸騰領域にある。Fig. 3.4.9と3.4.10は、RUN1113とRUN1202の結果である。両者の違いは、保護筒内の水の有無である。温度上昇開始時刻について両者の差は殆んどなく、保護筒内の水の影響は無視できる。クエンチ時刻については、TF5、6、7は残存水の吹き上げ効果によるクエンチであって両者共差がない。しかし、蒸気中にある、TF1、2、3、4は、吹き上げ効果よりも、保護筒内の水の冷却効果を受けてRUN1113の方が、RUN1202よりも早くクエンチする。また、RUN1113をRUN1103と比べると、発熱体電力の大きいRUN1113では、温度上昇域が第3セクションにまで広がっているのに対し、RUN1103では、第3、4セクションでは温度が上昇しない。つまり発熱量に伴う発生蒸気量の差がそのまま現われている。Fig. 3.4.11とFig. 3.4.12には、7本バンドルのうち、中心発熱体のみを加熱したものである。RUN2103は、保護筒内に水がある場合で、RUN2106は、圧力を12.1atgまで上げた場合である。RUN2103はRUN1113に対応するもので、両者を比較すると、RUN2103には第1セクションで、放出開始後6秒に温度上昇があるが、第2、3、4セクションはバルク沸騰のまま、温度の上昇はない。しかも、TF3は、電源を切る以前に一度クエンチしかかっている。このことは、単

一ピンの場合には、加熱面積に比してテスト部内に残っている水の量が、7本発熱の場合より多く、それが吹き上げられて冷却効果を示していることを意味している。一方、圧力の高いRUN 2106の場合は、放出開始後5秒で、TF 1、TF 2の温度が上昇し始めるが、TF 2はすぐにクエンチする。TF 1はそのまま温度上昇を続け、電源を切るまでクエンチしない。放主開始後13秒の時点から、TF 2、3、5、7、9の温度が上昇、クエンチをくり返し始める。これは、それぞれのセクション内で相似な流動状態を示していることに対応している。即わち、各セクション内にそれぞれ蒸気相、液相ができて、各セクションの上部はクオリティが高く、下部はクオリティの低い状態になる。従ってそれぞれのセクションの上部にあるTF 2、3、5、7、9は、時折蒸気相に露出するが、セクション下部のTF 4、6、8、10は、バルク沸騰域にあるので、温度上昇がない。このバルク沸騰による液塊が、上部に吹き上げられ、TF 2、3、5、7、9を冷やす。RUN 2106では、圧力が高く、流体の流動が激しいために、各セクションで類似の現象を示している。

上部、下部同時に放出をした場合の温度変化をFig. 3.4.13から、Fig. 3.4.17に示す。Fig. 3.4.13のRUN 1105とFig. 3.4.14のRUN 1106との違いは、初期液温である。RUN 1105、RUN 1106共に第2セクションにあるTF 5の温度が最初に上昇を始めるが、これは上下部放出による流れの分岐点がこのセクションにあるためである。続いて、第2セクションのTF 6、第3セクションでスペーサから遠いTF 8が温度上昇を始め、最下部セクション及び、最上部セクションの温度の上昇は最後になる。電源を切った後のクエンチは、上部プレナムに近いTF 2にみられるが、RUN 1106では、その影響がTF 3にも及んでいる。これはRUN 1106で、放出後5秒から一度温度上昇したものが、初期液温が低かった影響で一度クエンチし、さらに上昇を開始したために、TF 2の温度がRUN 1105よりかなり低く、従ってTF 3の温度もRUN 1105より低くなりクエンチしやすくなっていることが原因である。またRUN 1106では、TF 9もクエンチするが、第4段目のスペーサのすぐ下にあるために、スペーサ上部にたまっていたわずかな量の水が落下し始めていることを示している。Fig. 3.4.15に示す。RUN 1111はRUN 1105とほぼ同じ実験条件である。しかし、温度変化はむしろRUN 1106と類似しており始めのうちに温度上昇を数回くり返しているために、電源を切った後ですぐにTF 3がクエンチする。TF 9も、同様にスペーサたまり水の効果で、クエンチする。Fig. 3.4.16で示すRUN 1203は、保護筒に水を入れていない場合である。これをRUN 1111と比較すると、TF 1、2を除き、最初の熱電対の温度が上昇し始める時刻から最後の熱電対の温度が上昇し始める時刻までの所要時間が、RUN 1111では約3秒であるのに対しRUN 1203では、約1秒である。このことは、保護筒内の水による冷却効果による温度上昇の遅れを示している。また、TF 3は一度クエンチするがすぐに温度は回復し、熱伝導と輻射により温度はゆるやかに上昇を始める。Fig. 3.4.17は、7本バンドルの中心発熱体のみを発熱したRUN 2101の温度変化である。この場合には、最下部のTF 10、スペーサ内のTF 4を除き、殆んど同時刻に全体の温度が上昇し始める。しかし、TF 2は、上部からの水の影響でクエンチが早い。これは、単一発熱体加熱のために加熱面に接していない冷却材の量が多く、流出速度も早い。従って、テスト部内の単一発熱体周りのサブチャンネル内では流量が少なく、従って除熱効果が減少し温度が上昇し、クエンチもおこりにくい。

以上の温度変化は、すべて発熱分布が直線状の発熱体を使用したものである。Fig. 3.4.18に示



すような  $\cos$  状発熱分布を持った発熱体を使用した場合の結果を Fig. 3.4.19 から Fig. 3.4.22 に示す。この発熱体には、中央部の発熱体中心部分に、熱電対を 3 本挿入し、中心温度を測定できるようにした。Fig. 3.4.19 及び 3.4.20 は、下部放出で、同一条件下での実験である。2 つのデータは TF 3 を除き殆んど差がない。RUN 3101 では、TF 3 のクエンチは、電源を切った後でおこっているのに対し RUN 3105 では、幾度かクエンチをくり返しているため、温度の上昇はそれほど顕著ではない。両者の実験条件に殆んど差がないことから、単に流動パターンの一時的な違いが原因である。Fig. 3.4.21 に示す RUN 3106 では、同一発熱分布ではあるが、異なる発熱体を使用している。この発熱体では製作工程の相違が原因で測定温度がかなり高い。放出径口は 5 mm  $\phi$  で、RUN 3101, 3105 の半分である。しかし、温度変化は、RUN 3101 と定性的には殆んど同じであるが、TF 10 の温度上昇がない。電源を切った時刻が殆んど同じで、しかも放出面積が小さいために、残存水が多かったことが原因である。次に、中心温度の変化を、Fig. 3.4.22, 3.4.23, 3.4.24 に示す。いずれも中心温度と発熱体温度との比較をしてあるが、中心温度測定用熱電対の時間遅れが大きい。これは熱電対の挿入方法に問題があったため、熱電対と断熱材とのギャップが大きすぎるものが原因である。従って、追従性をよくし精度を高めるには、挿入の方法を改善する必要がある。

以上の結果をまとめると、発熱体温度変化について次のようなことが言える。

#### 下部放出

- 発熱体電面が小さい場合には、上部から順に発熱体が露出し、温度が上昇する。
- 発熱体電力が大きいと、流動状態に応じて、下部にもボイドが発生し、温度が上昇する。
- ボイドは、スぺーサから遠い位置に発生しやすい。
- スぺーサ付近にたまった水が落下して、クエンチすることがある。
- 保護筒の水は、蒸気相を冷却する効果があるが、液相への影響は少ない。
- 単一発熱体の場合には、上部のセクションでは温度上昇はおこらず、下部で温度上昇がある。
- $\cos$  状発熱分布の場合では、スぺーサから遠くしかも発熱分布の大きい中央部から温度上昇が始まる。

#### 上部放出

- 上部の冷却材が先に流出するため、温度上昇は上部位置から順に始まる。
- 下部の冷却材は、流出しきらないので、下部位置の温度は上昇しない。
- 下部残存水の沸騰によって、冷却材が吹き上げられ上部位置の温度を下げることもある。
- 上部位置で蒸気中に露出した部分は、保護筒に水のある時には、保護筒の水の影響で早めにクエンチする。
- 単一発熱体の場合には、バルク沸騰の冷却効果が著しく、第 2, 3, 4 のセクションでは温度上昇がない。
- 圧力が高い場合は、各セクションでの流動状態は、定性的に相似で、各セクション毎に、蒸気相に露出する部分とバルク沸騰の部分が存在する。

#### 同時放出

- 温度上昇は、上部から下部への順と、スぺーサからの距離が遠い順との組み合わせでおこる。

- 上部にある熱電対は上部プレナムからの落下水で比較的クエンチしやすい。
- 下部の発熱体は、スぺーサにより水の落下の影響でクエンチすることもあるが、殆んどの場合温度が上昇する。
- 単一発熱体の場合には、全体の温度が、ほぼ同時に上昇し始める。
- 保護筒内の水は、温度上昇に要する時間を遅らせる。

それぞれの放出形式に共通なこととして、本実験シリーズでは、発熱体電力が低かったために、膜沸騰がおこることなく、単に発熱体表面上の液騰が蒸発してしまつた時に温度が上昇し始めた。従つて、厳密な意味でのDNBがあつたとはいえず、今後、より高い熱流束での実験が必要である。

### 3.5 放出オリフィス前後差圧と放出タンク液位、温度

ブローダウン時の放出口径を調節するオリフィスの直上流の圧力、及びオリフィス前後の差圧を測定した。また、放出オリフィスを通過する二相流を放出タンク内の水中に放出し、液位変化を計測した。これらの測定量は、放出水量の推定の基礎データとして用いることができる。

Fig. 3.5.1は、下部放出のRUN1101についての結果である。下部放出オリフィス直上流圧力は、放出開始と同時に、テスト部圧力まで降下し、その後はテスト部圧力と同じ変化をする。一方上部放出オリフィス直上流の圧力は、放出開始時に圧力が一時的に上昇する。これは遮断弁を閉じてから放出弁を開くまでに時間遅れがあり慣性による圧力上昇があるためである。この圧力上昇は、パルス的にもとに戻り、テスト部圧力と同じ圧力になる。また、オリフィス前後差圧は、始めの6秒間はオリフィス上流圧力よりも、ほぼ2 ataだけ低い圧力を示している。これは、オリフィスの下流側にある放出弁前後で、約2 ataの圧力差があることを示している。放出開始後6秒から以降は、放出弁前後の圧力差は解消し、オリフィスで臨界流となる。放出タンク内の液位は、放出開始後6秒間は、ほぼ直線的に増加し、6秒を過ぎると一時減少し、再びゆるやかに増加する。この一時的な減少は、放出弁内の臨界流の解消及びテスト部内の上下差圧がゼロになる時刻と対応することから、放出中の放出配管内の圧力が液位が落ち込んだ分だけ大気圧より高かつたものが、この時点で大気圧に戻つたと考えられる。従つて、その後のゆるやかな上昇は、放出蒸気の凝縮によるものである。放出タンク内の液温は、ゆるやかに上昇し、飽和温度近くまで上昇する。上部オリフィスの前後差圧が一時的に負圧を示しているのは、オリフィスと上部放出弁間のたまり水が、オリフィスを通してテスト部へ流れていくことを示している。RUN1102についての結果は、Fig. 3.5.2に示すように、RUN1101と定性的には、ほぼ同じ傾向を示している。オリフィス前後差圧が、テスト部圧力の変化に応じて変動しているが、放出弁前後差圧は、ほぼ一定で約2 ataを示している。Fig. 3.5.3は、RUN1201の結果である。このRUNでは、上部オリフィス直上流の圧力が、放出開始前後約4秒間テスト部圧力よりもかなり高く保たれる。その他のデータは、他のRUNと定性的には同様である。上部オリフィス前後差圧の変動が激しいのは、保護筒の水がないので、テスト部内の沸騰による冷却材の流動の影響が放出オリフィスにまで及んでいることを示している。その為、上部オリフィス、放出弁間の部分の冷却材が流出しにくく、圧力が高いと考えられる。単一発熱体の場合のRUN2104の結果をFig. 3.5.4に示し、圧力の高い場合のRUN3101, 3105, 3106の結果をFig. 3.5.5, 3.5.6, 3.5.7にそれぞれ示す。RUN2106についての定性的傾向は、下部放出に共通なものであるが、放出タンク液位の上昇が他と比べかなりゆるやかである。これは、放出配管の放出

タンク内の水中への挿入の仕方が不足していたことが原因で、十分な蒸気の凝縮がなかったことを意味している。RUN 3101及びRUN 3105では、下部放出タンク液位及び液温の測定ができなかった。また、この2つのRUNでは、上部オリフィス上流の圧力と下部放出オリフィス上流の圧力が、放出後約2.5秒から逆転し、逆向きの流れのあることを示している。Fig. 3.5.7で示すRUN 3106は放出オリフィス口径を5mm $\phi$ としたものであるが、この場合にも放出弁前後の差圧が約1 ataあり、圧力損失のあることがわかる。液位の上昇は非常にゆるやかであり、蒸気の凝縮が不十分であることを示している。

Fig. 3.5.8からFig. 3.5.13に上部放出の場合の放出水量に関するデータを示す。Fig. 3.5.8はRUN 1103で、比較的発熱対電力の小さい場合である。下部放出の場合と同様に、上部オリフィス直上流の圧力は、パルス状に上昇する。また上部オリフィス前後差圧は、上部オリフィス上流側圧力よりも約2 ata低いことは、下部放出の場合と同じである。放出タンク液位、液温共に下部放出の場合と殆んど差がない。下部オリフィス前後差圧が一時負圧になるのは、逆流のあることを示している。総じて、下部放出の場合との差は小さい。Fig. 3.5.9に示すRUN 1104では、下部オリフィス上流が非常に高くなることを除き、定性的にはRUN 1103と同じ傾向である。下部オリフィス直上流圧力が非常に高いのは、下部では、圧力測定器が下向きに取付けてあるので圧力測定端付近にボイドのたまりができた可能性が強く、60秒付近にも同じような現象がある。同様な圧力上昇は、Fig. 3.5.11に示すRUN 1202、Fig. 3.5.13に示すRUN 2106にも現われている。Fig. 3.5.10及びFig. 3.5.12に示すRUN 1113、RUN 2103には、このような圧力上昇は、上部オリフィス近くにだけある。オリフィス前後差圧の挙動、放出タンク液位、液温の挙動は、上部放出のいずれのRUNについても傾向はほとんど変わらず、下部放出との差も少ない。

同時放出の場合のRUN 1105の結果をFig. 3.5.14に示す。上下部の放出口径は5mm $\phi$ で、上部放出の場合、下部放出の場合より小さい。放出口径が放出弁の内径よりも、上部放出の場合に比べ小さいために、上部オリフィス前後差圧は、上部オリフィス直上流圧力は短時間で等しくなる。従って、上部放出弁内の圧力損失は放出初期の約1秒を除いて無視できる。一方下部放出オリフィス直前の圧力は、上部放出の場合と同様に非常に高いのは、圧力測定端近くのボイドだまりの影響と思われる。放出タンク液位の増加は、上部側で早く下部側で遅い。Fig. 3.5.15に示すRUN 1106は、RUN 1105とほとんど同様な結果を示している。また、Fig. 3.5.16及びFig. 3.5.17に示すRUN 1203と2101ではいずれも、放出開始直後にオリフィス直上流圧力が急上昇するが、間もなくオリフィス前後差圧と同じになる。放出タンク液温は、上部側で低く下部側で高い。これは放出水のうち、多くの部分が下部側に押し出されるためである。

以上の結果から、放出時のオリフィス近傍での現象について次のようなことがわかる。

#### 下部放出

- ・ 上部オリフィス直上流の圧力は遮断弁を閉じる際にパルスの的に急上昇する。
- ・ 下部オリフィス前後差圧は、下部オリフィス直上流圧力より常に約1~2 ata小さい。従って放出弁前後で大きな圧力損失がある。
- ・ 上部オリフィスを通して、放出直後に逆流がある。
- ・ 放出タンク液位は始めのうちは直線的に増加する。

#### 上部放出

- 下部オリフィス直上流圧力が、ボイドのたまりの影響で、非常に高くなることがある。
- 上部オリフィス直上流圧力は、下部放出の場合と同様に、パルス状に高くなる。
- 放出オリフィス前後差圧は、オリフィス直上流圧力よりも常に、約1～2 ata低い。従って、下部放出の場合と同じく、放出弁内で大きな圧力損失がある。
- 下部放出の場合との定性的な差は小さい。

#### 同時放出

- 上部放出と同じく、下部オリフィス直上流圧力の急上昇がある。
- 上部オリフィス直上流圧力は、放出直後パルス状に上昇する。
- 口径が小さいと放出弁の圧力損失はほとんど無視できる。
- 放出タンク液位、液温は、下部側で変化が大きい。

Table 3.1.1 Experimental Conditions

RUN NO.	INITIAL CONDITIONS		FLOW RATE (l/min)	POWER INPUT (KW/rod)	DISCH. ORIFICE		NO. OF RODS	PROTECTION WATER	COMMENTS
	TS. PRESS. (atg)	TS. INLET TMP. (°C)			TOP (mm)	BOTTOM (mm)			
1100			280	0	5	5	7	yes	isothermal test
1101	7.4	150	280	5.8	0	10	7	yes	
1102	6.8	143	280	9.8	0	10	7	yes	
1103	6.9	147	280	8.9	10	0	7	yes	
1104	7.1	140	280	9.1	10	0	7	yes	
1105	7.1	146	280	13.0	5	5	7	yes	
1106	6.6	138	280	12.2	5	5	7	yes	
1107	6.9	152	280	13.0	1	10	7	yes	
1108	6.9	146	280	13.0	10	1	7	yes	
1109	7.0	138	280	12.6	5	0	7	yes	
1110	6.9	137	280	12.8	5	5	7	yes	
1111	6.5	150	280	13.0	5	5	7	yes	
1112	6.6	149	280	***	0	10	7	yes	power recording failed
1113	7.0	152	280	12.2	10	0	7	yes	
1201	7.0	148	280	12.0	0	10	7	no	
1202	7.2	152	280	12.2	10	0	7	no	
1203	7.9	152	280	13.3	5	5	7	no	
2101	7.2	151	280	50.0	5	5	1	no	
2103	7.2	152	280	50.0	10	0	1	yes	
2104	6.8	152	280	50.0	0	10	1	no	
2106	12.1	171	280	50.0	10	0	1	no	
3101	22.3	200	280	65.7	0	10	1	no	steel TS. Cosine power
3105	21.5	200	280	65.7	0	10	1	no	steel TS. Cosine power
3106	21.5	200	280	85.0	0	10	1	no	steel TS. Cosine power

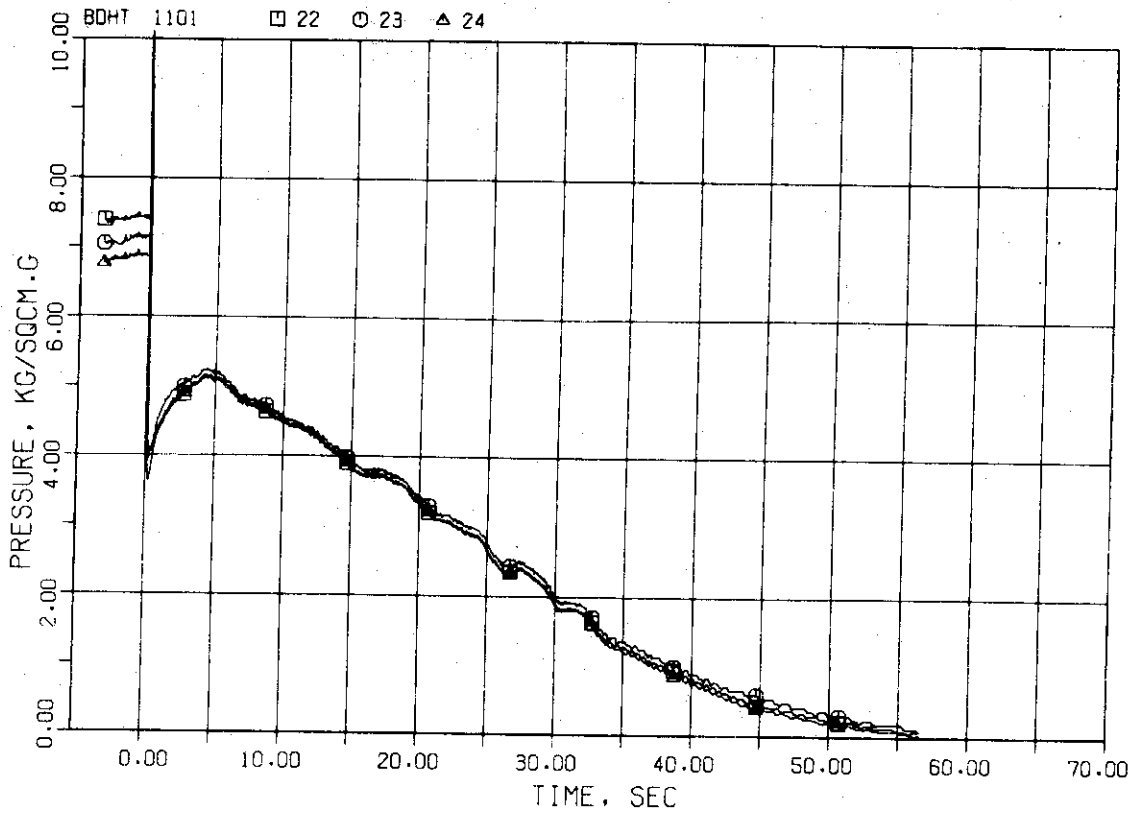


Figure 3.1.1. Typical Pressure Transients in the Test Section

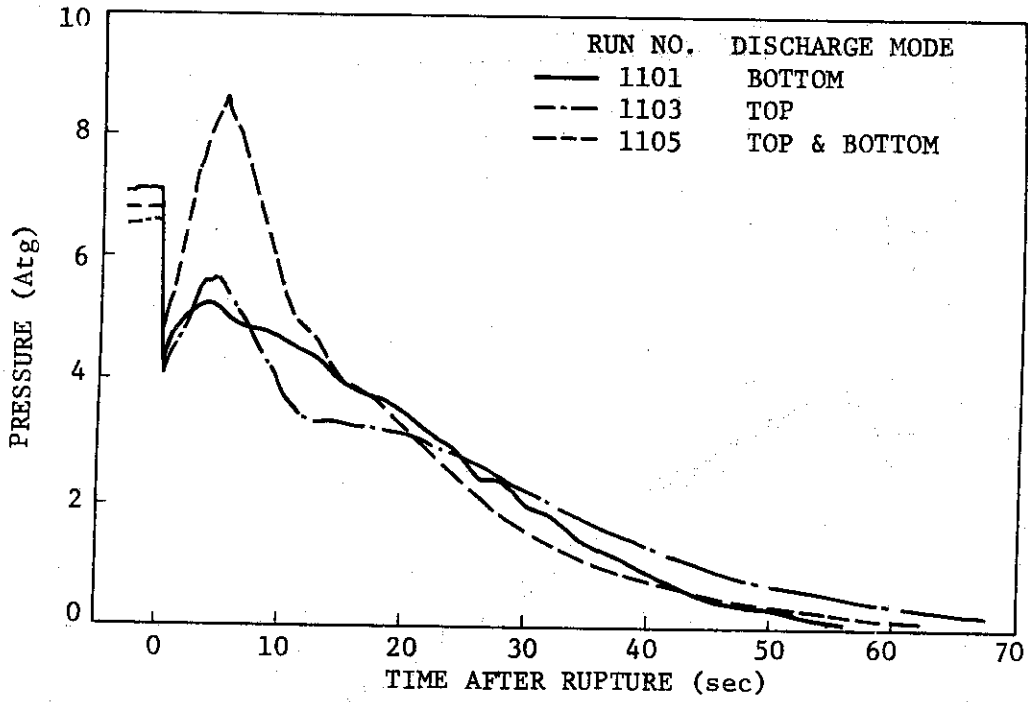


Figure 3.1.2. Effect of Discharge Mode on Test Section Pressure.

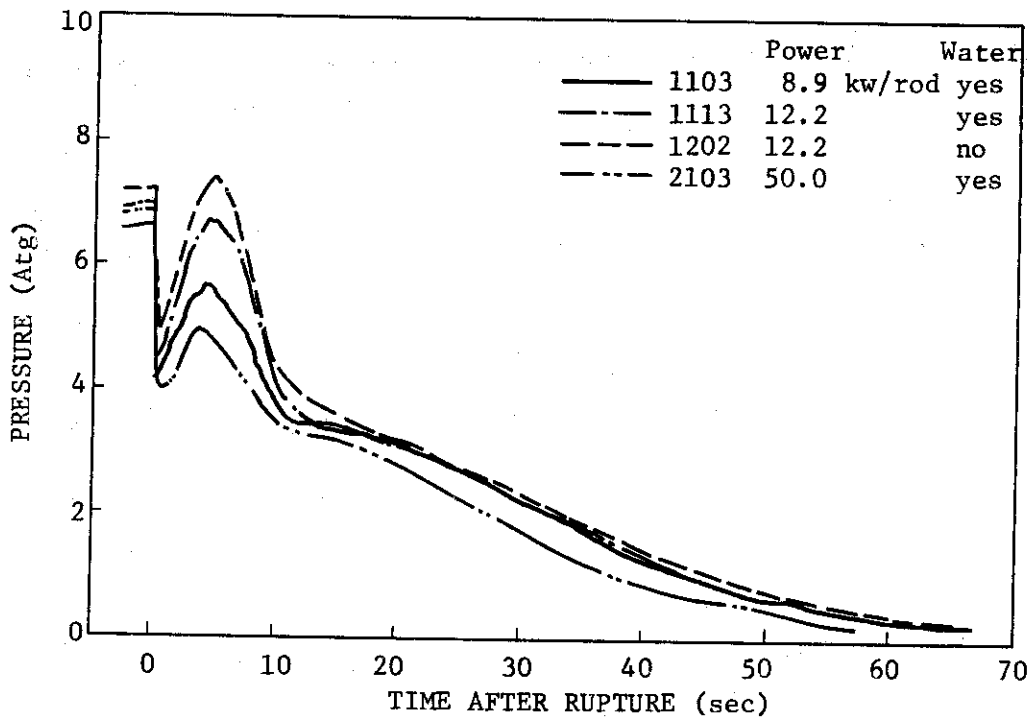


Figure 3.1.3. Pressure Transient of Top Discharge.

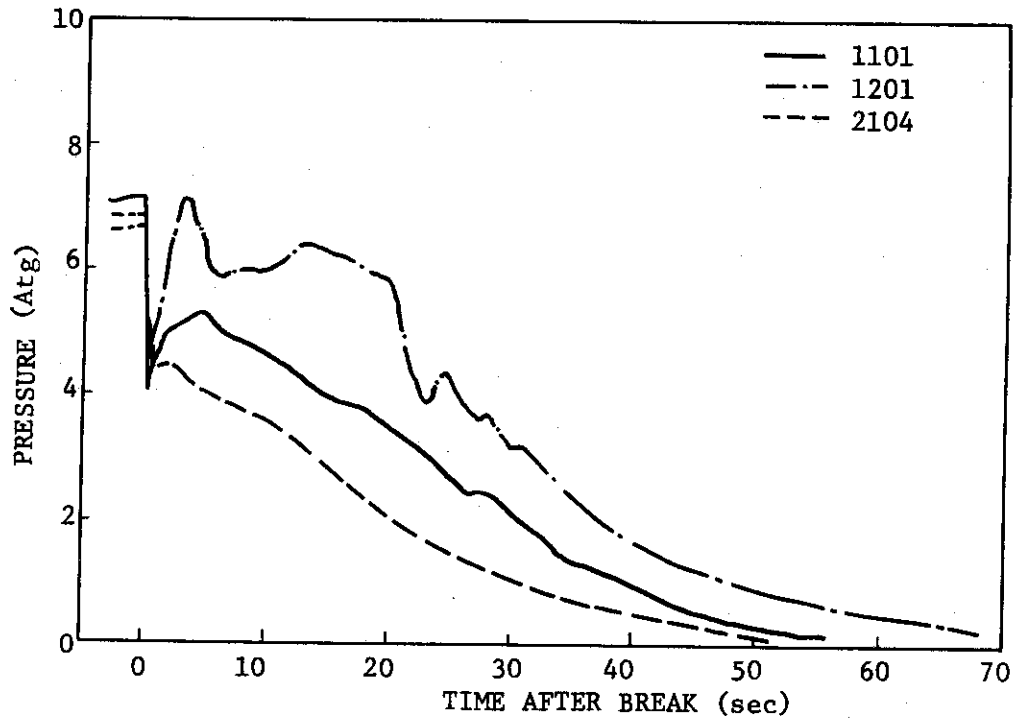


Figure 3.1.4. Pressure Transient of Bottom Discharge.

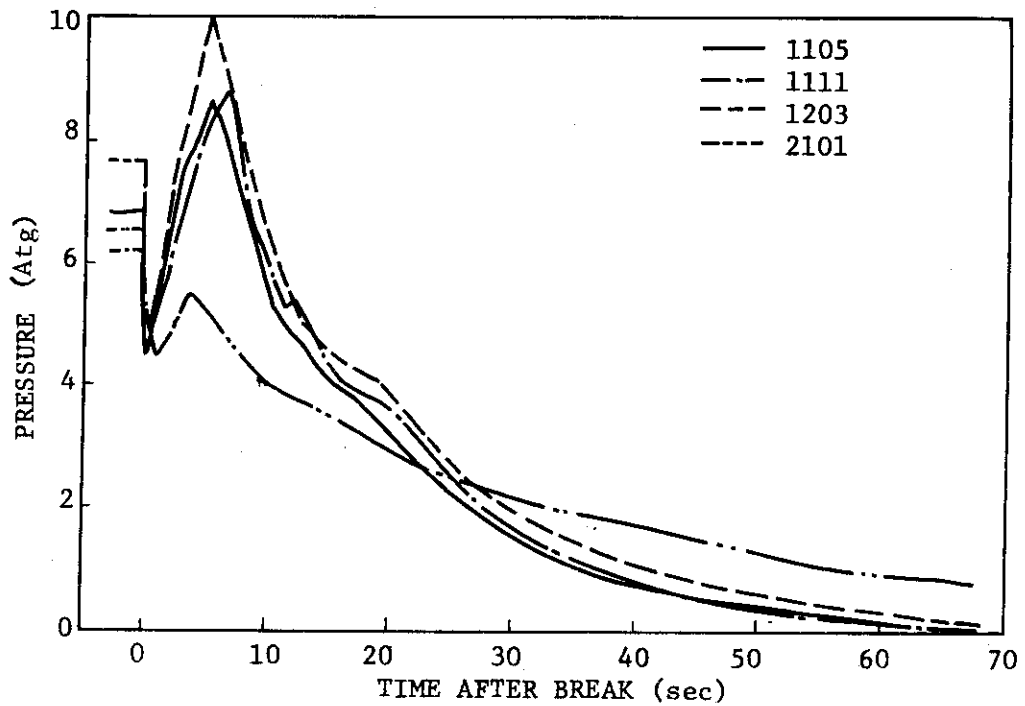


Figure 3.1.5. Pressure Transient of Simultaneous Discharge.



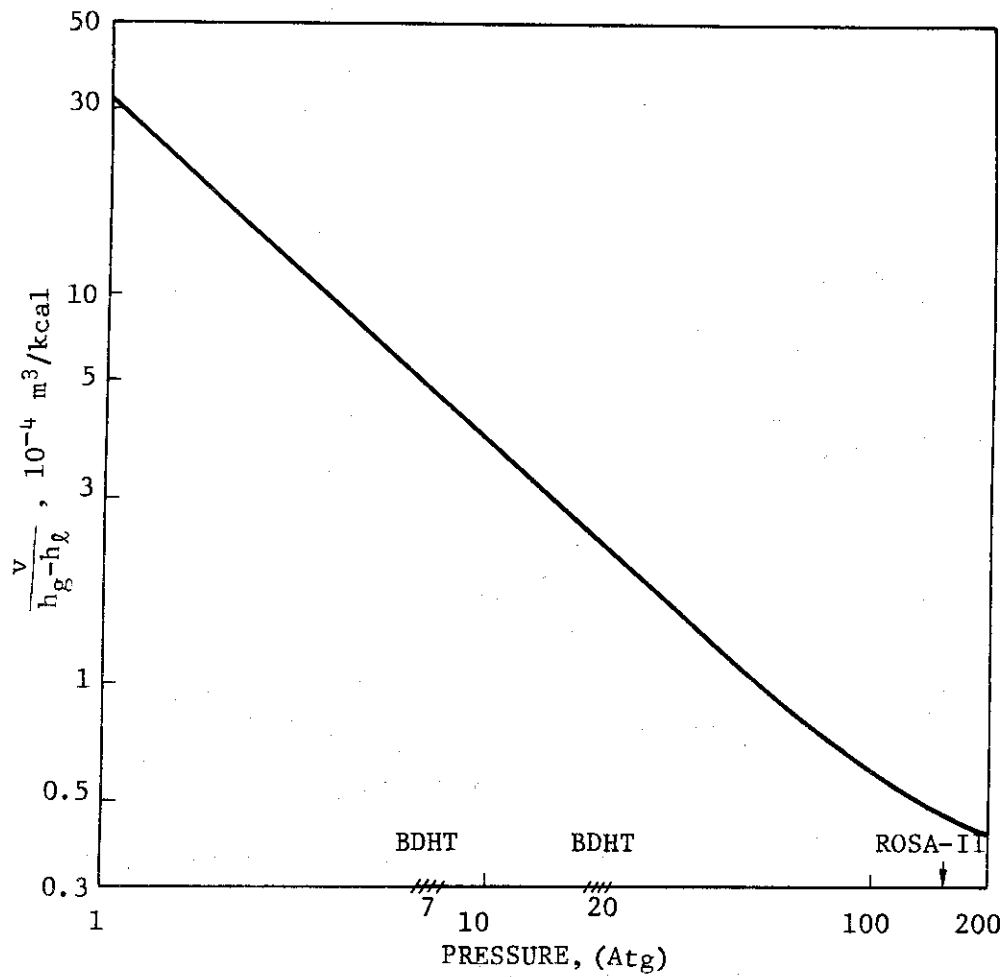


Figure 3.1.6. Specific Vapor Volume per Unit Latent Heat

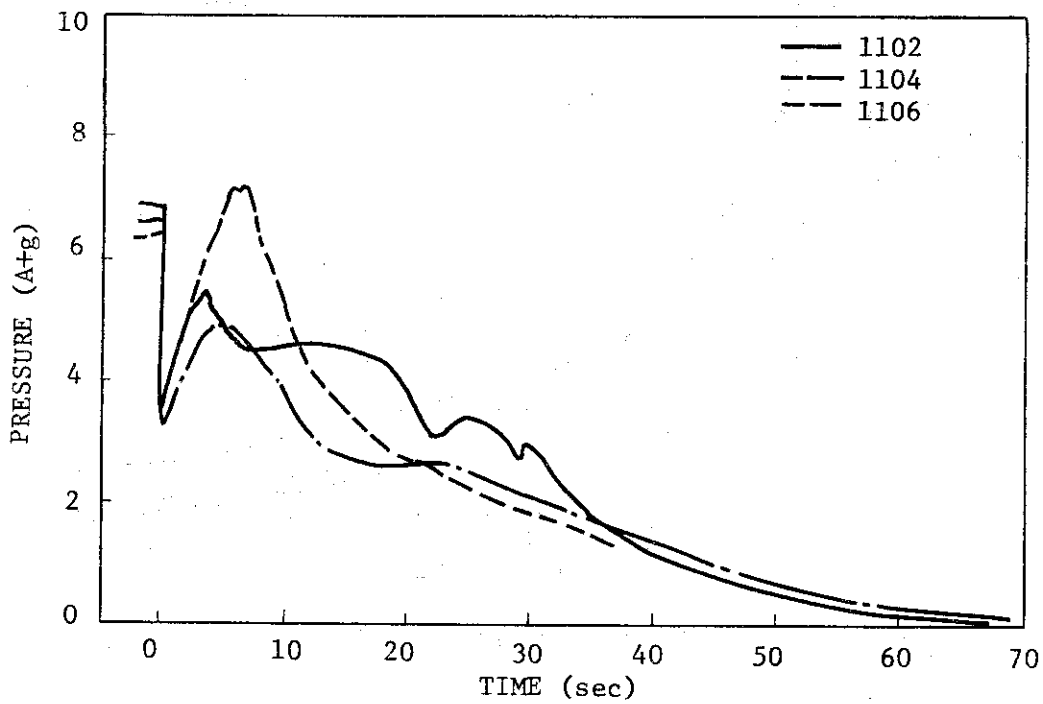


Figure 3.1.7. Pressure Transient of Bottom Discharge with Lower Initial Temperature.

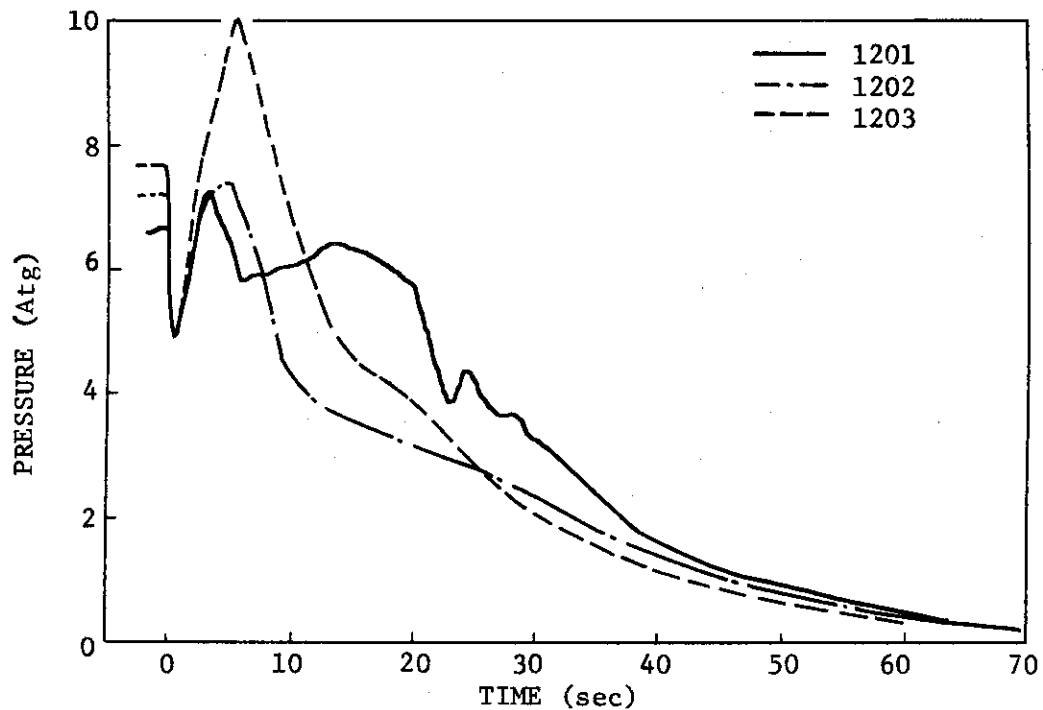


Figure 3.1.8. Pressure Transient of Bottom Discharge with Protection Water.

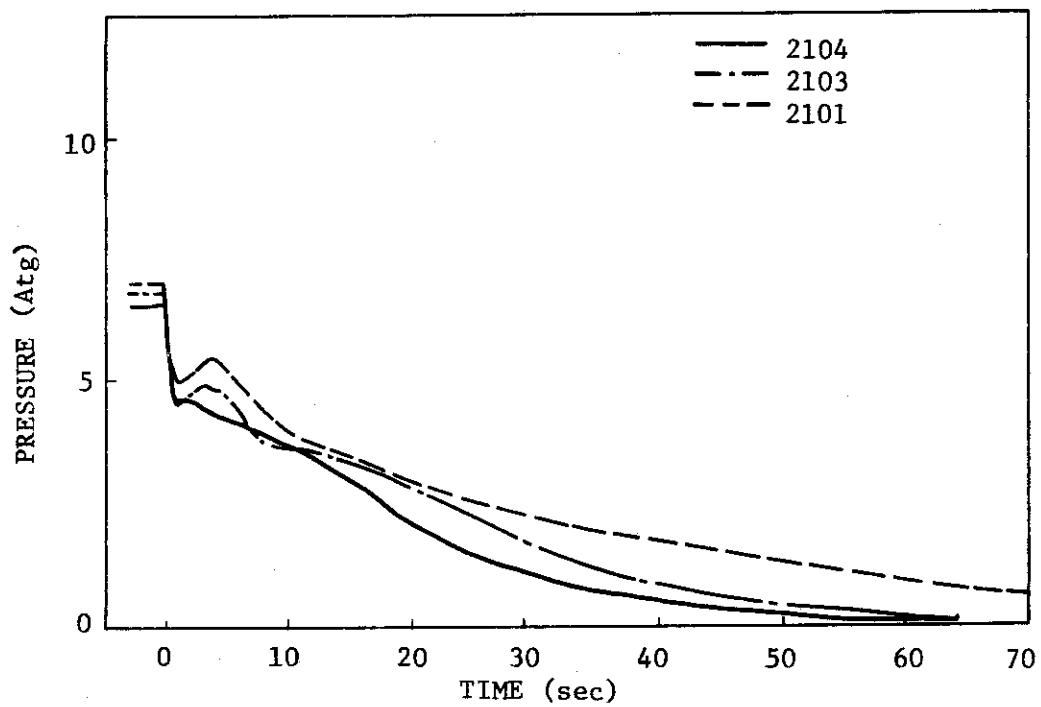


Figure 3.1.9. Pressure Transient of Bottom Discharge with Single Heated Rod.

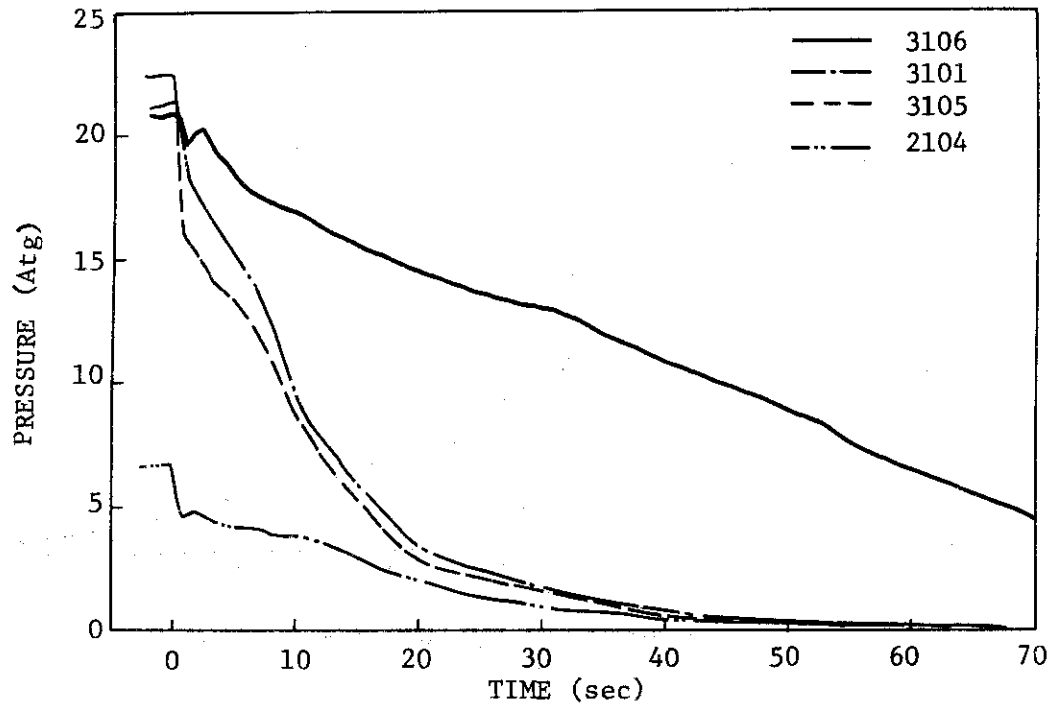


Figure 3.1.10. Effect of Initial Pressure on Test Section Pressure Transient: Bottom Discharge.

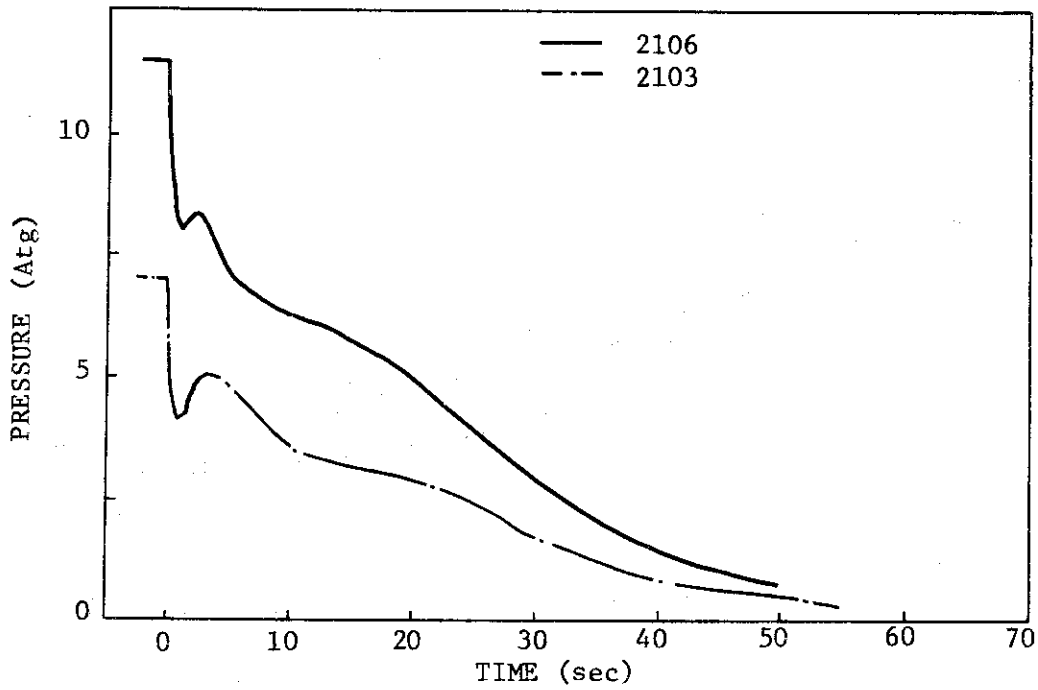


Figure 3.1.11. Effect of Initial Pressure on Test Section Pressure Transient: Top Discharge.

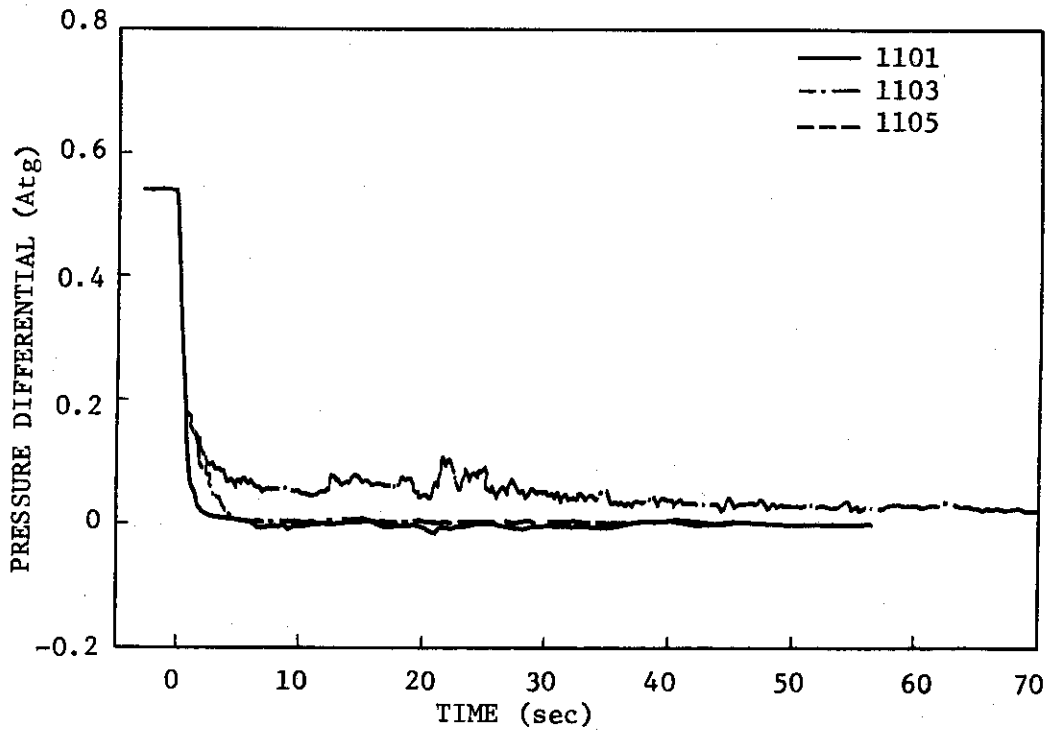


Figure 3.2.1. Effect of Discharge Mode on Pressure Differential in the Test Section

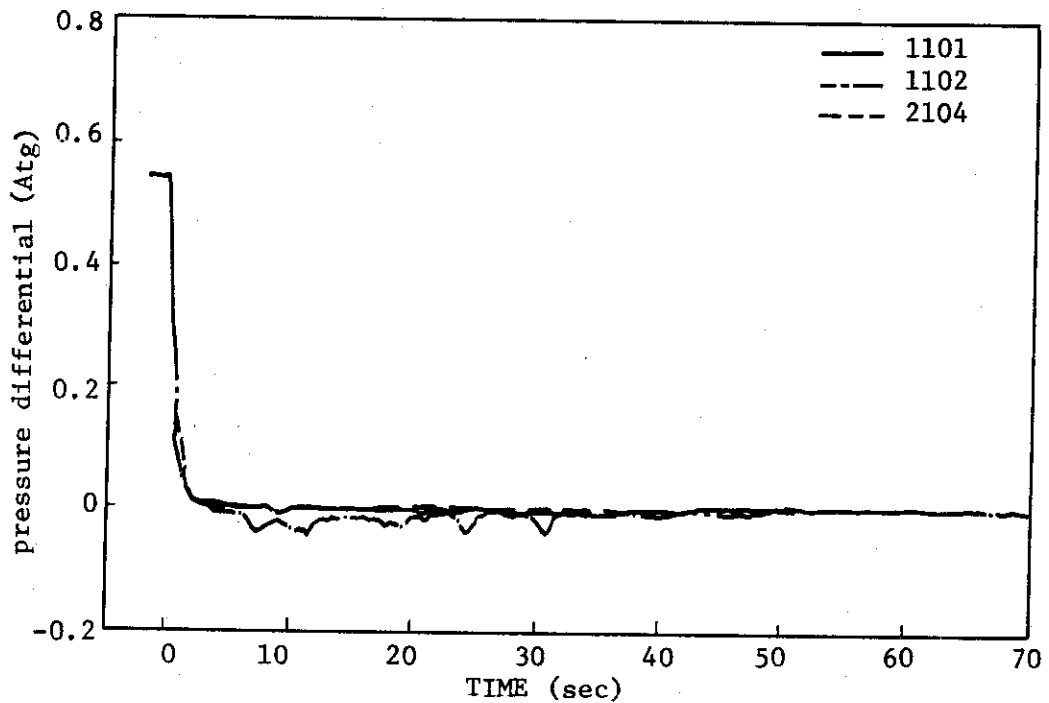


Figure 3.2.2. Effect of Vapor Generation on Pressure Differential in the Test Section: Bottom Discharge

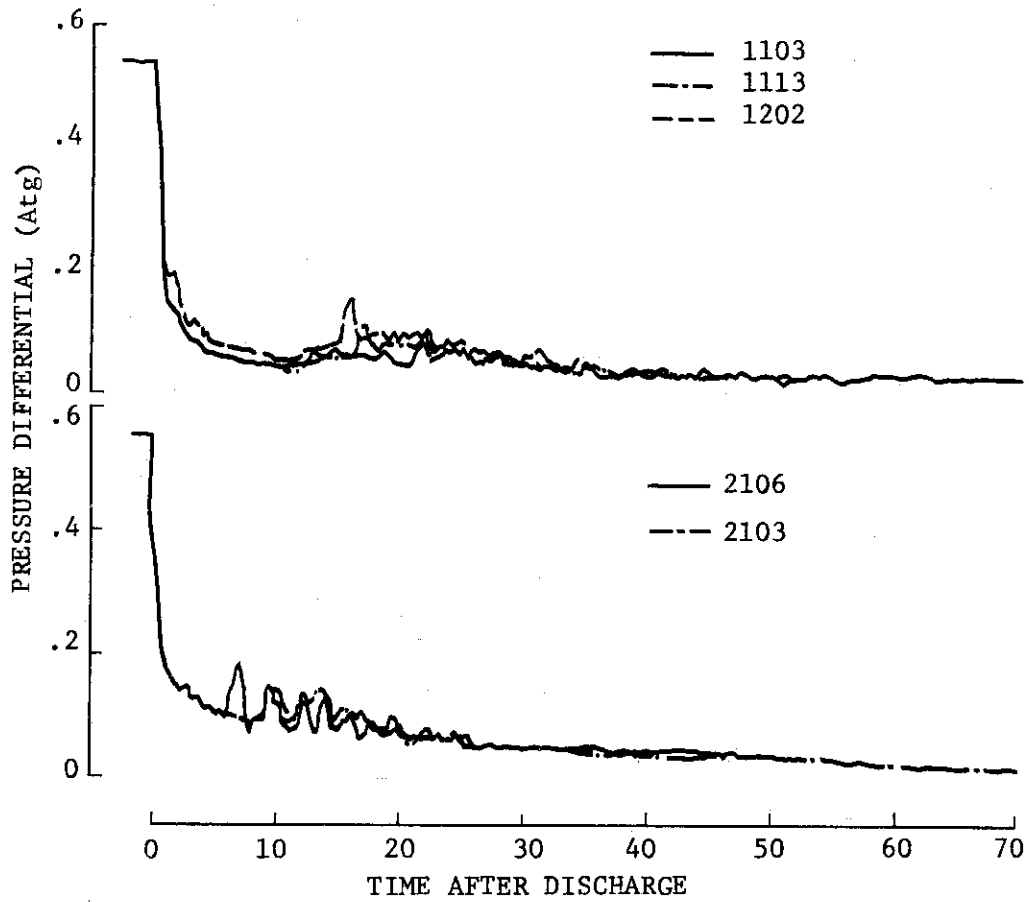


Figure 3.2.3. Effect of Vapor Generation on Pressure Differential in the Test Ssction: Top Discharge.

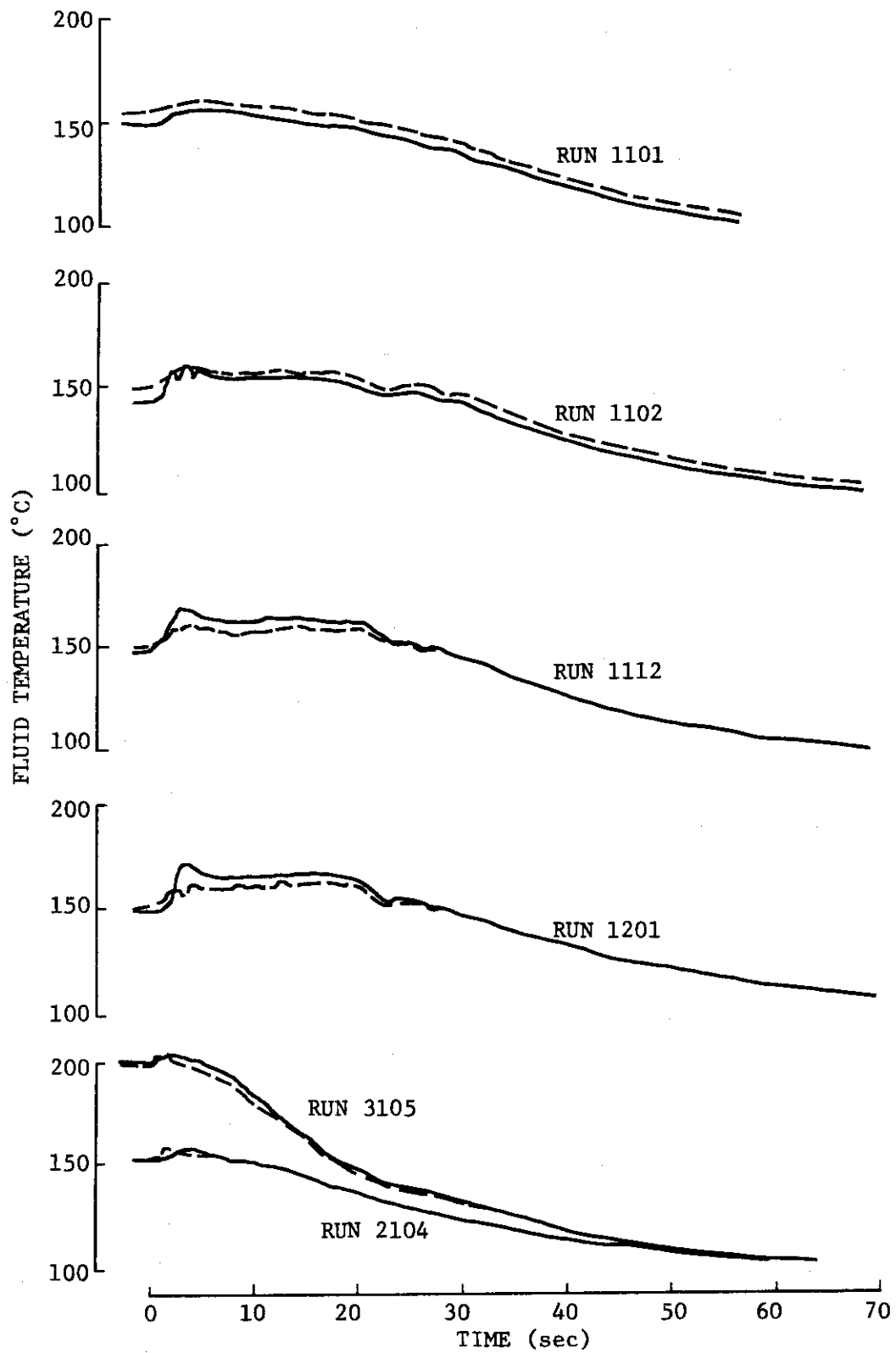


Figure 3.3.1. Test Section Temperature of Bottom Discharge.

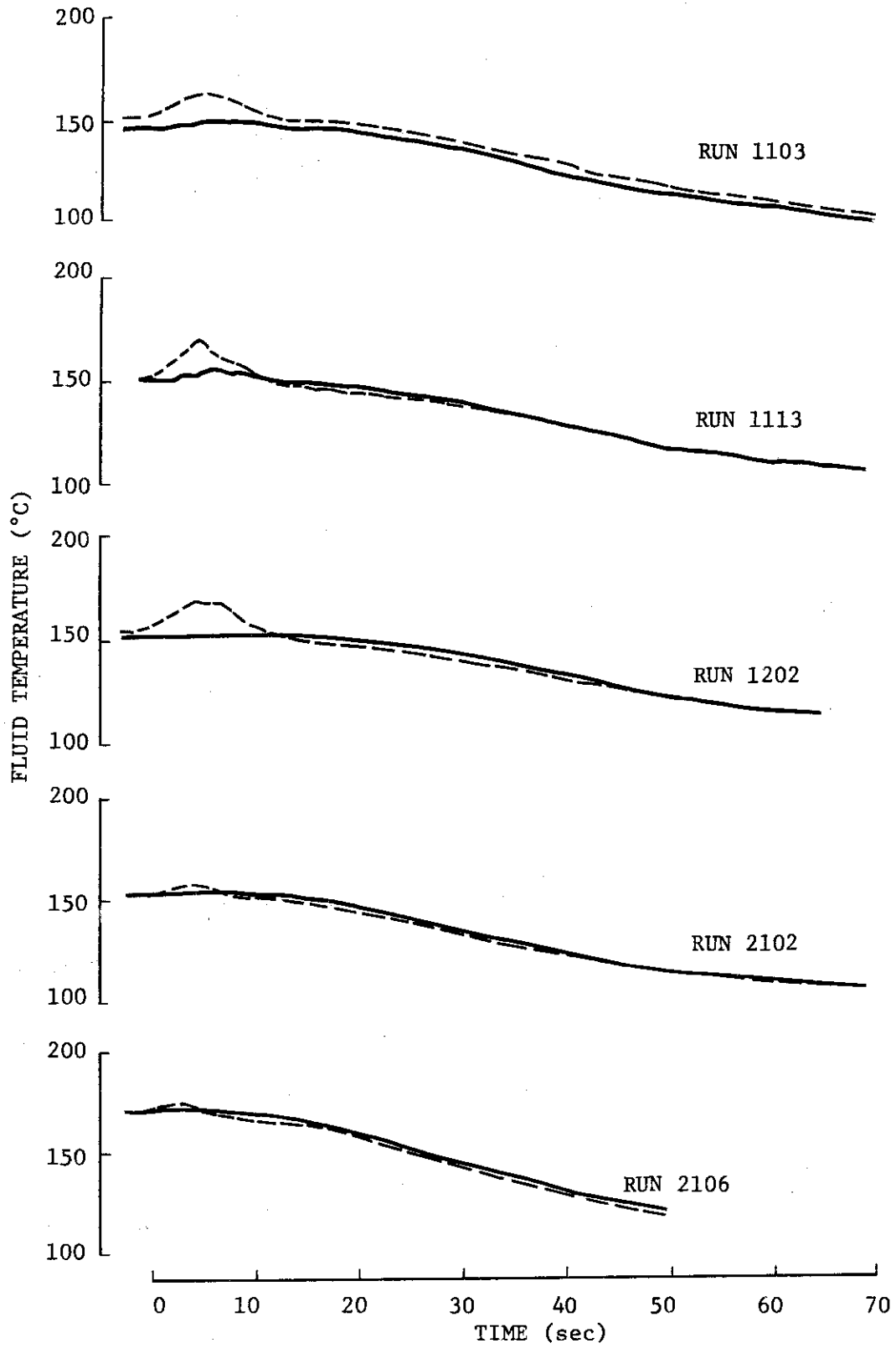


Figure 3.3.2. Test Section Temperature of Top Discharge.

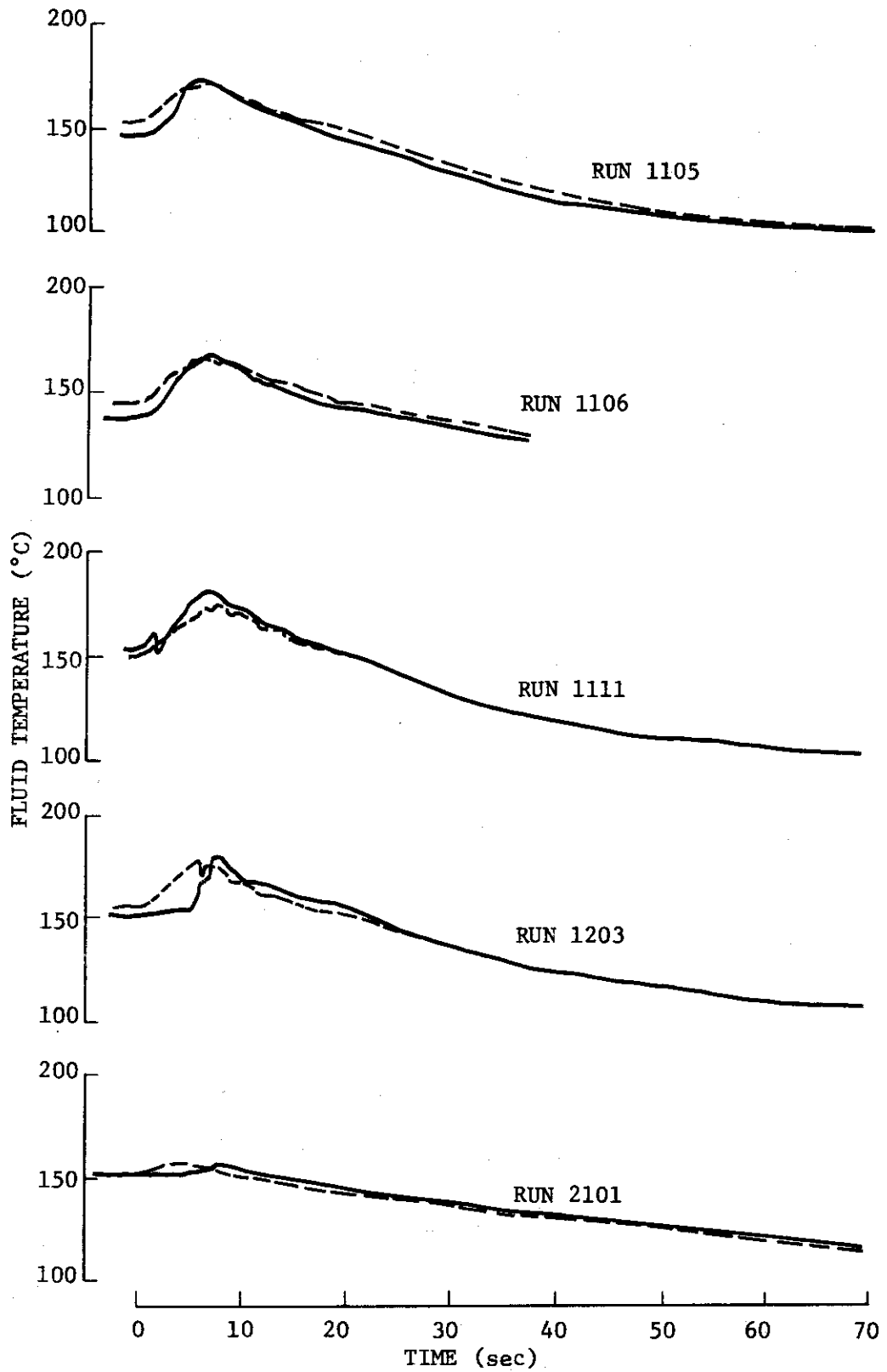


Figure 3.3.3. Test Section Temperature of Simultaneous Discharge.



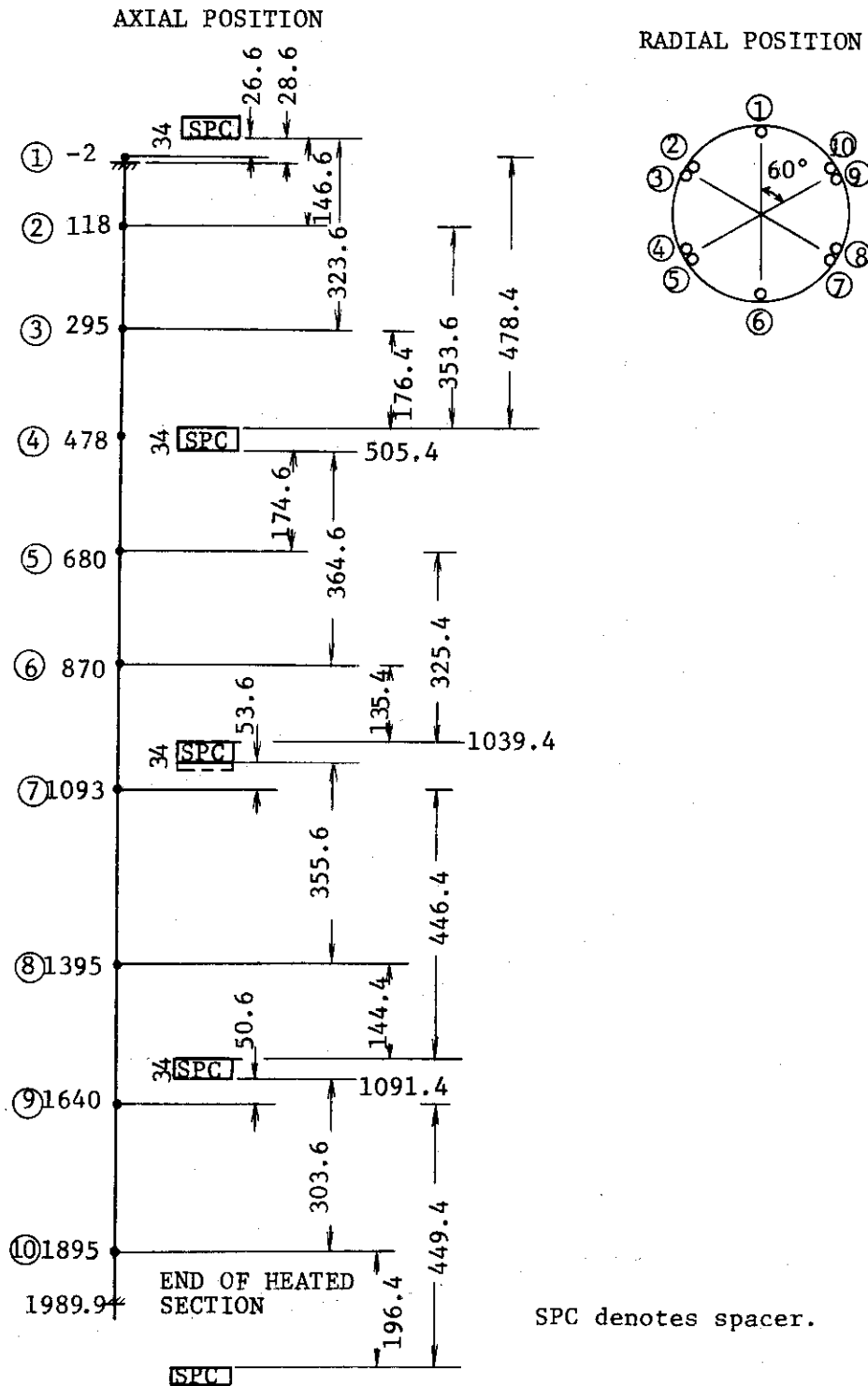


Figure 3.4.1. Thermocouple Position of Heater Rod

Table 3.4.1 Major Dimensions of Heater Rod

Rod outer diameter	10.7 mm
Heated length	2000 mm
Arrangement & pitch	triangular with the pitch of 15.3 mm
Method of Heating	indirect heating by electric heater
Sheath material	Stainless steel or inconel
Insulator	BN
Heater element	NiCr
Maximum power density	180 watt/cm <sup>2</sup> (uniform axial power distribution) 139.6 watt/cm <sup>2</sup> (cosine axial power distribution)
Manufacturers	Watlow, Nimblox

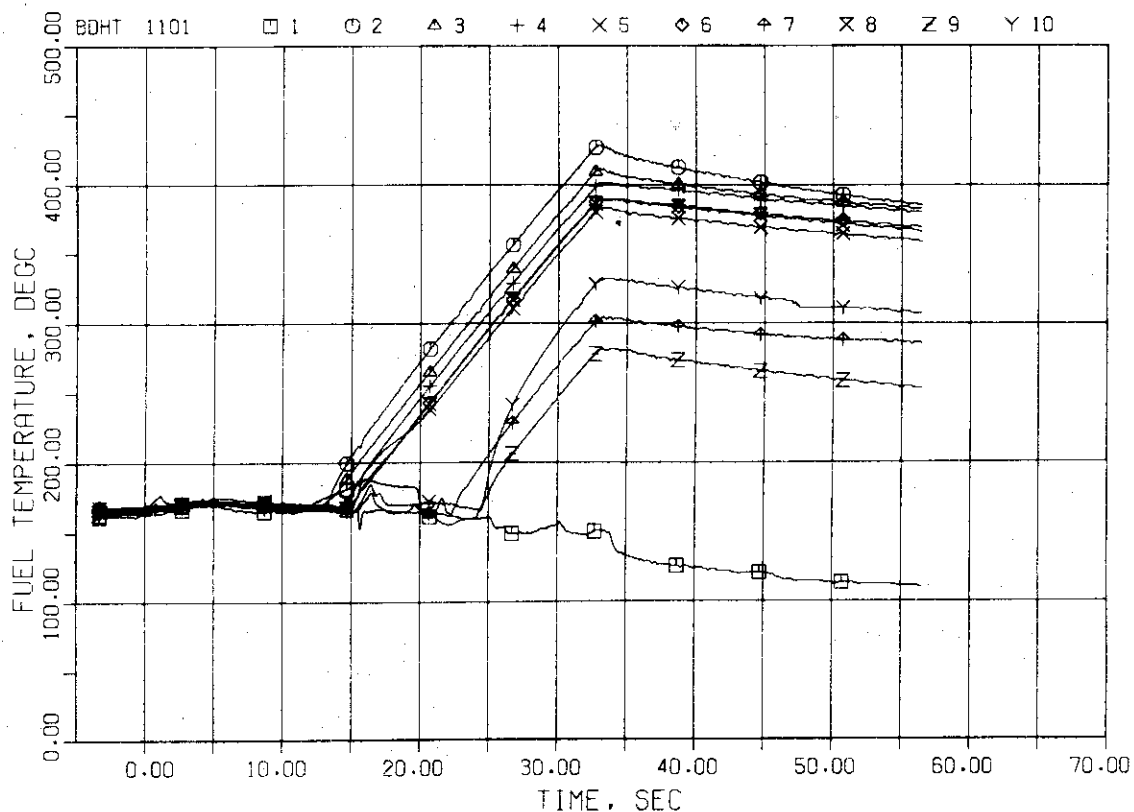


Figure 3.4.2. Rod Temperature of Bottom Discharge: RUN 1101

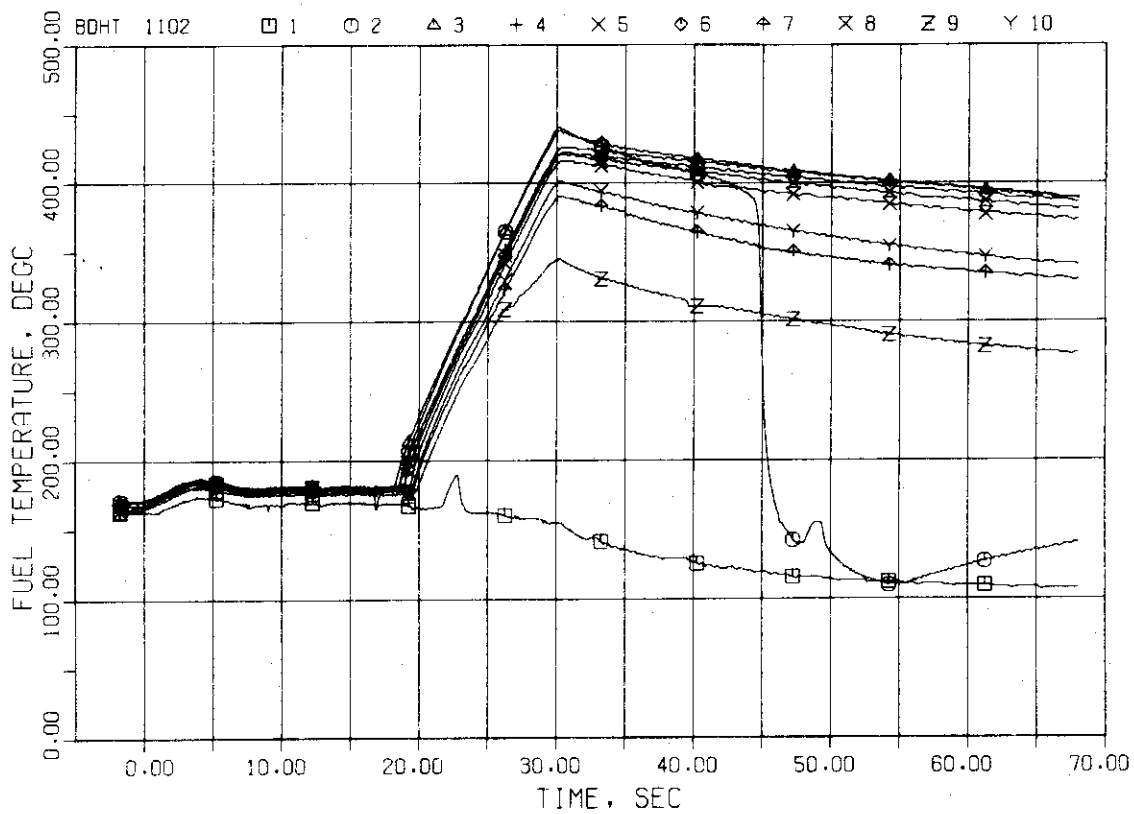


Figure 3.4.3.. Rod Temperature of Bottom Discharge: RUN 1102

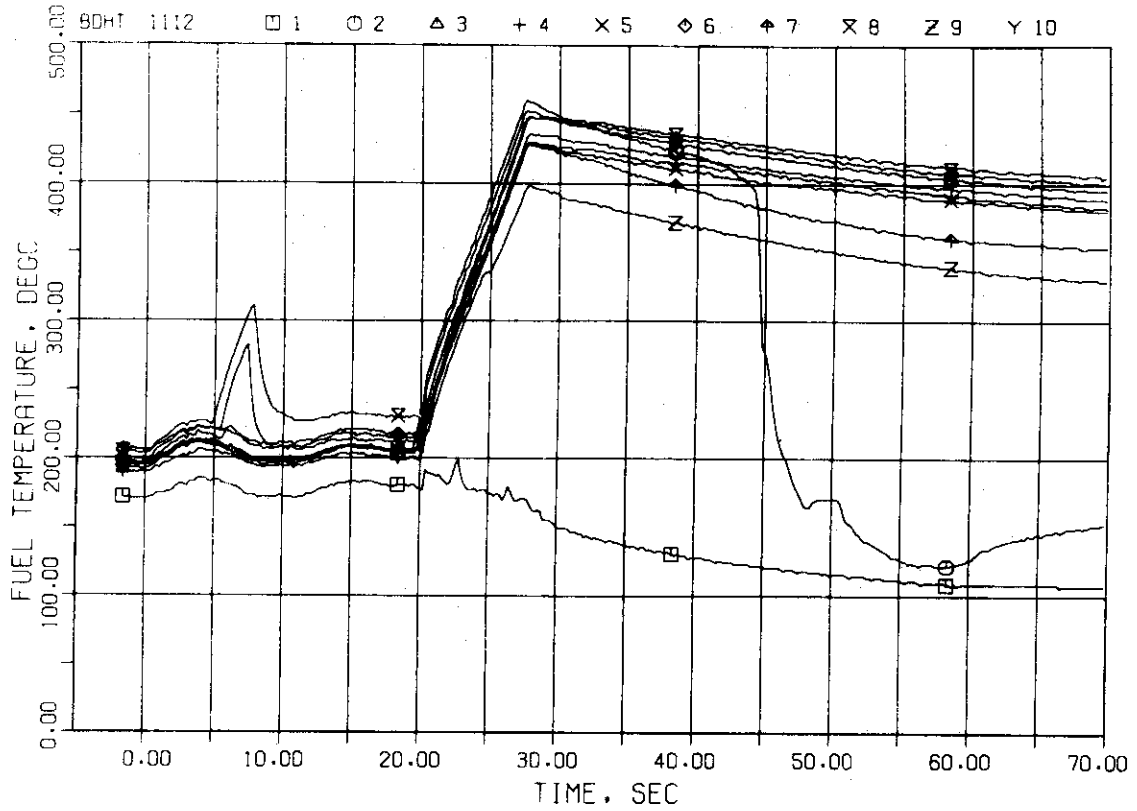


Figure 3.4.4. Rod Temperature of Bottom Discharge: RUN 1112

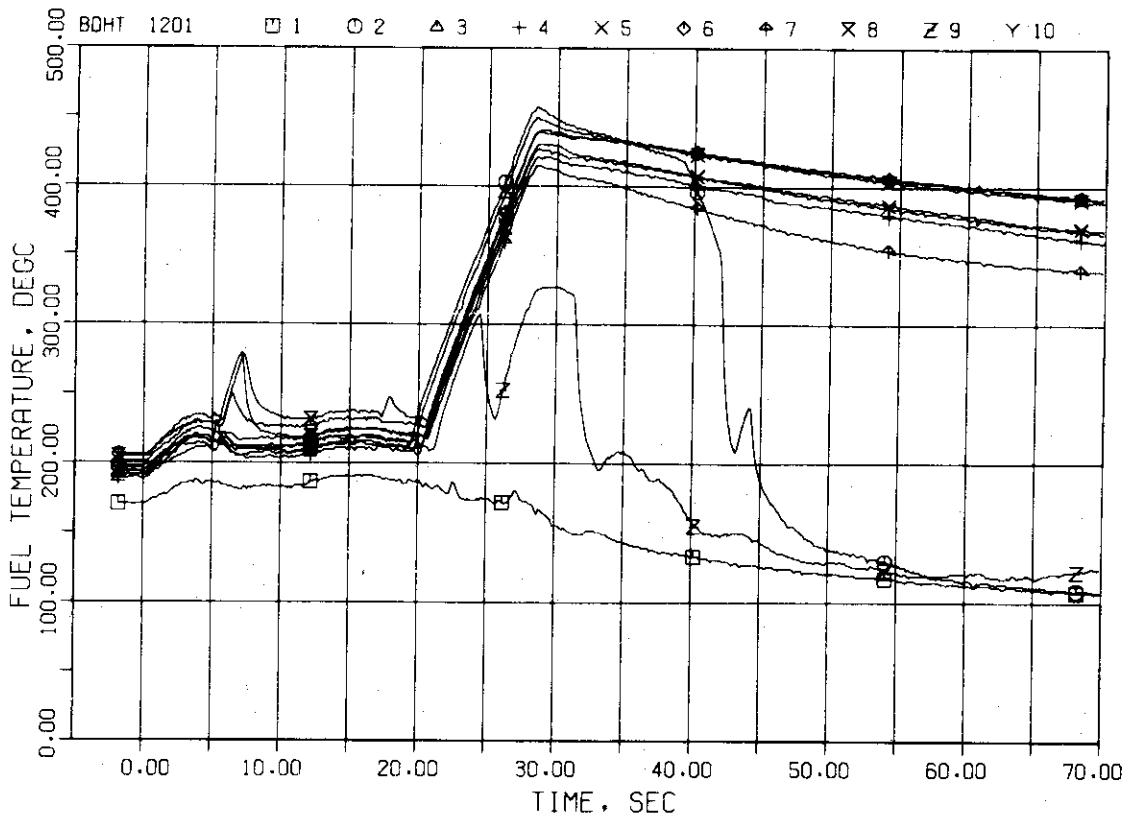


Figure 3.4.5. Rod Temperature of Bottom Discharge: RUN 1201

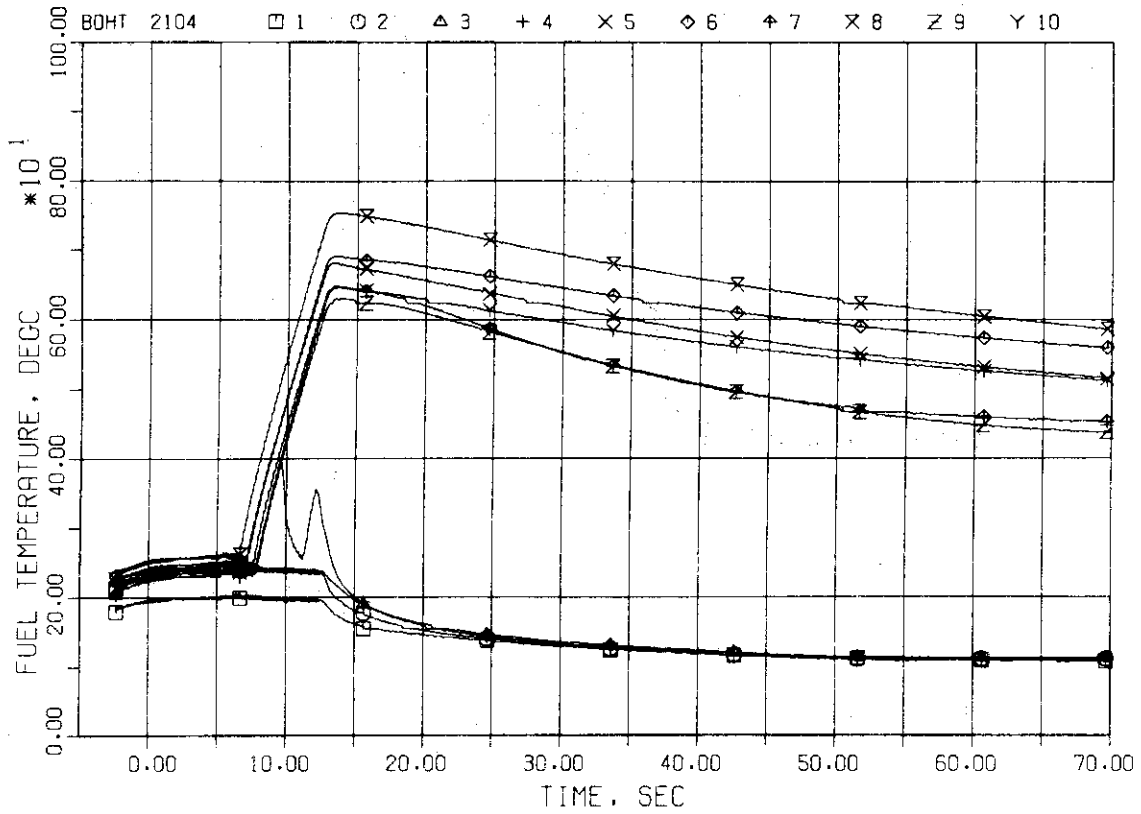


Figure 3.4.6. Rod Temperature of Bottom Discharge: RUN 2104

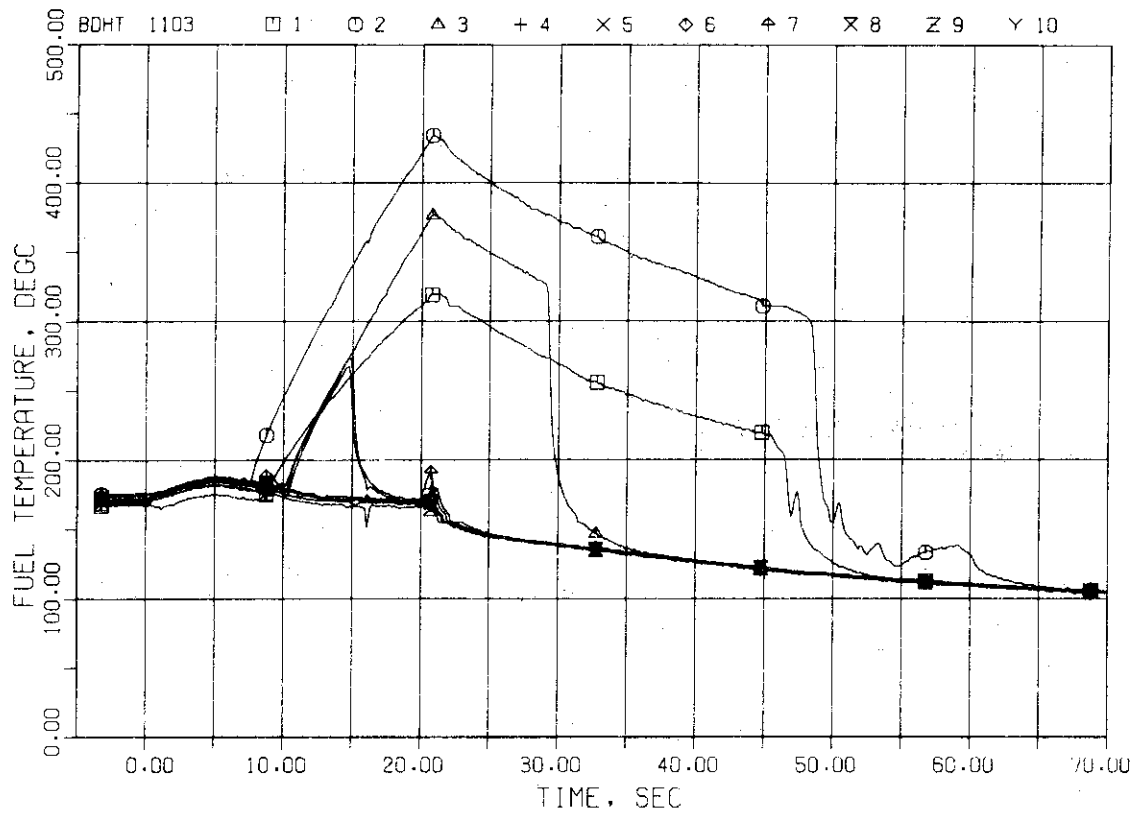


Figure 3.4.7. Rod Temperature of Top Discharge: RUN 1103

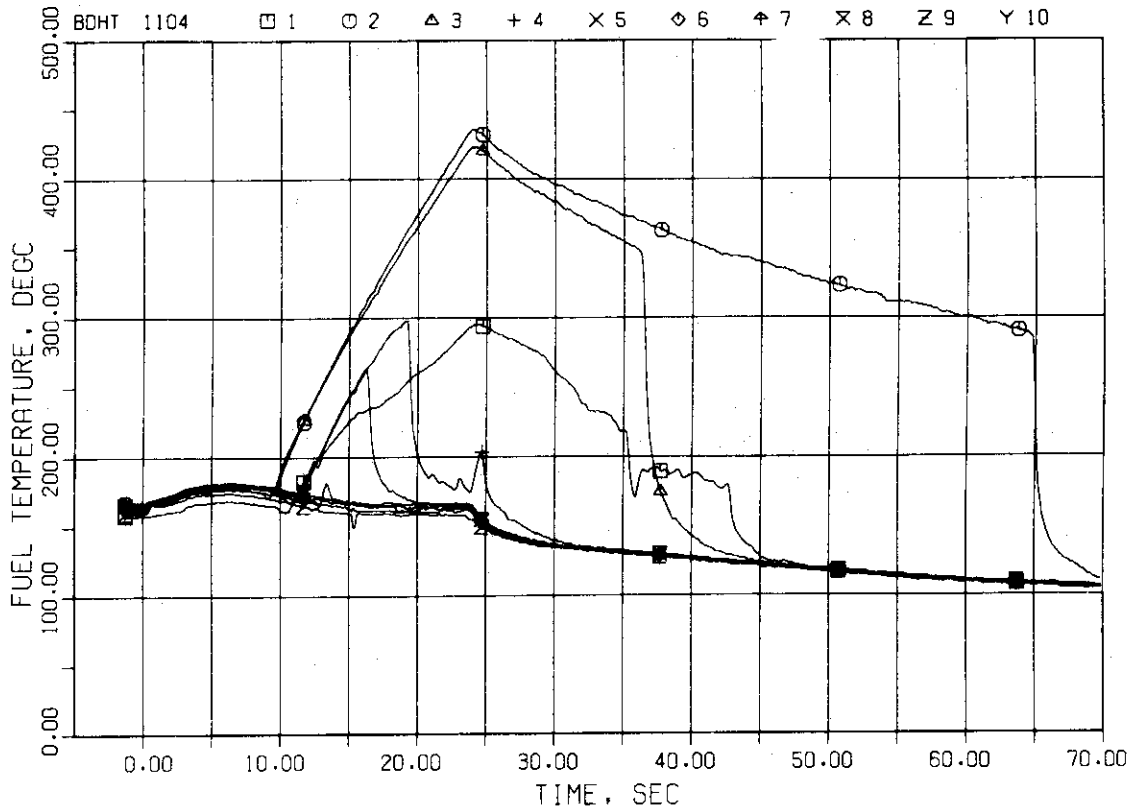


Figure 3.4.8. Rod Temperature of Top Discharge: RUN 1104

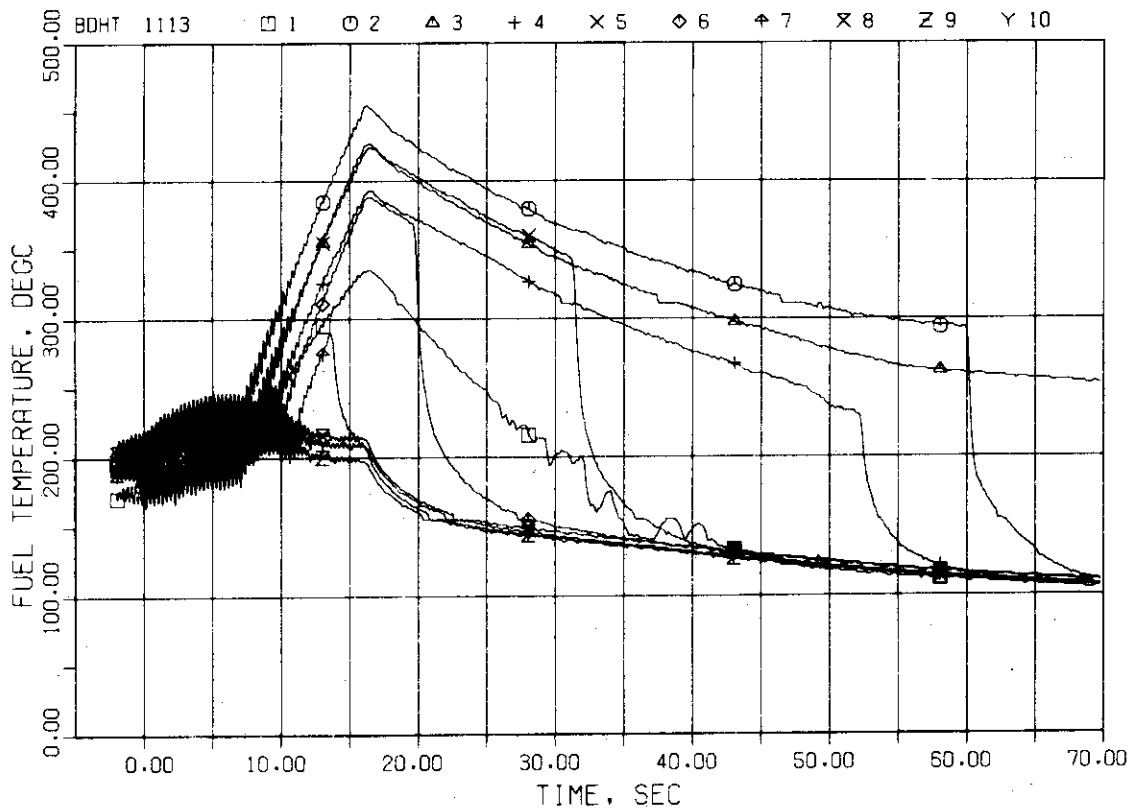


Figure 3.4.9. Rod Temperature of Top Discharge: RUN 1113

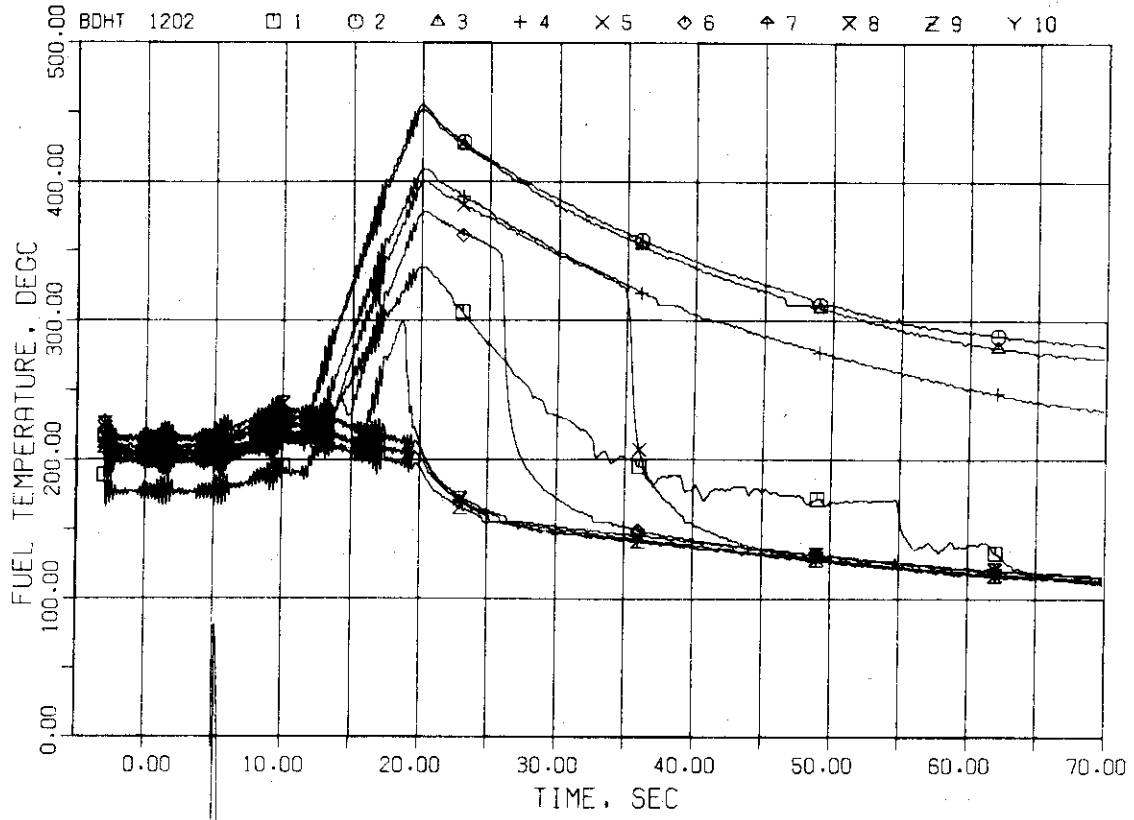


Figure 3.4.10. Rod Temperature of Top Discharge: Run 1202

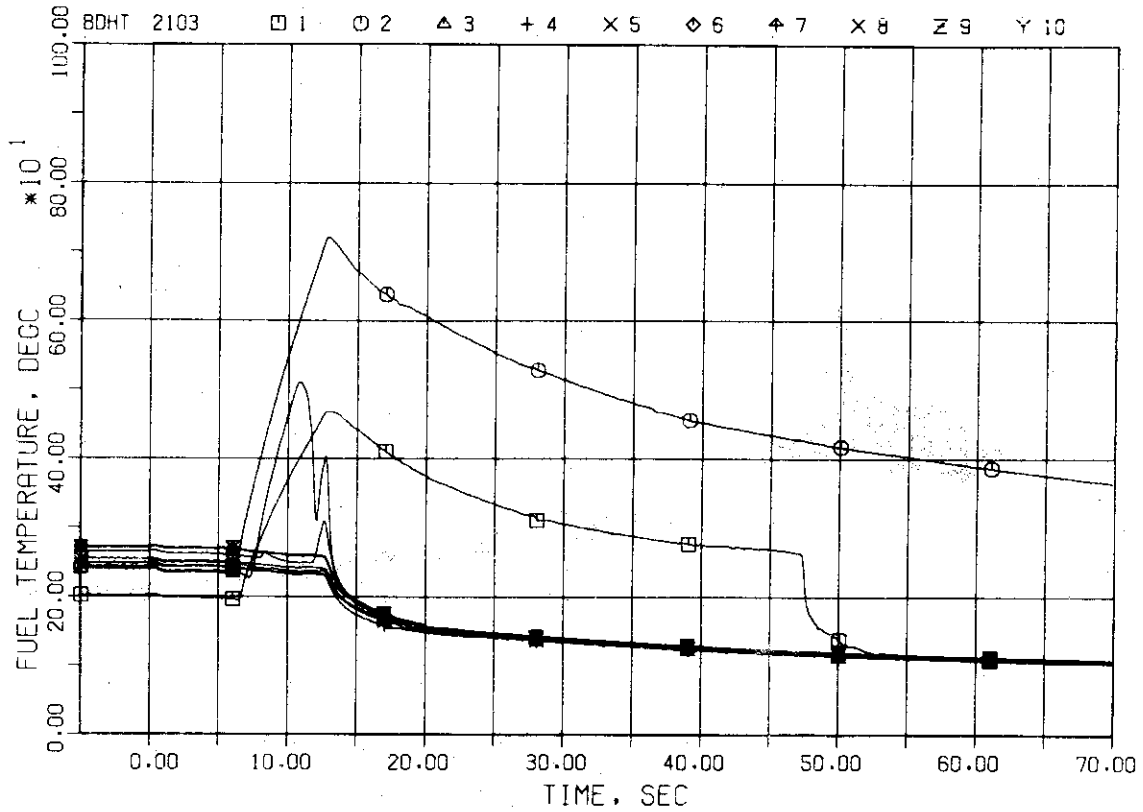


Figure 3.4.11. Rod Temperature of Top Discharge: RUN 2103

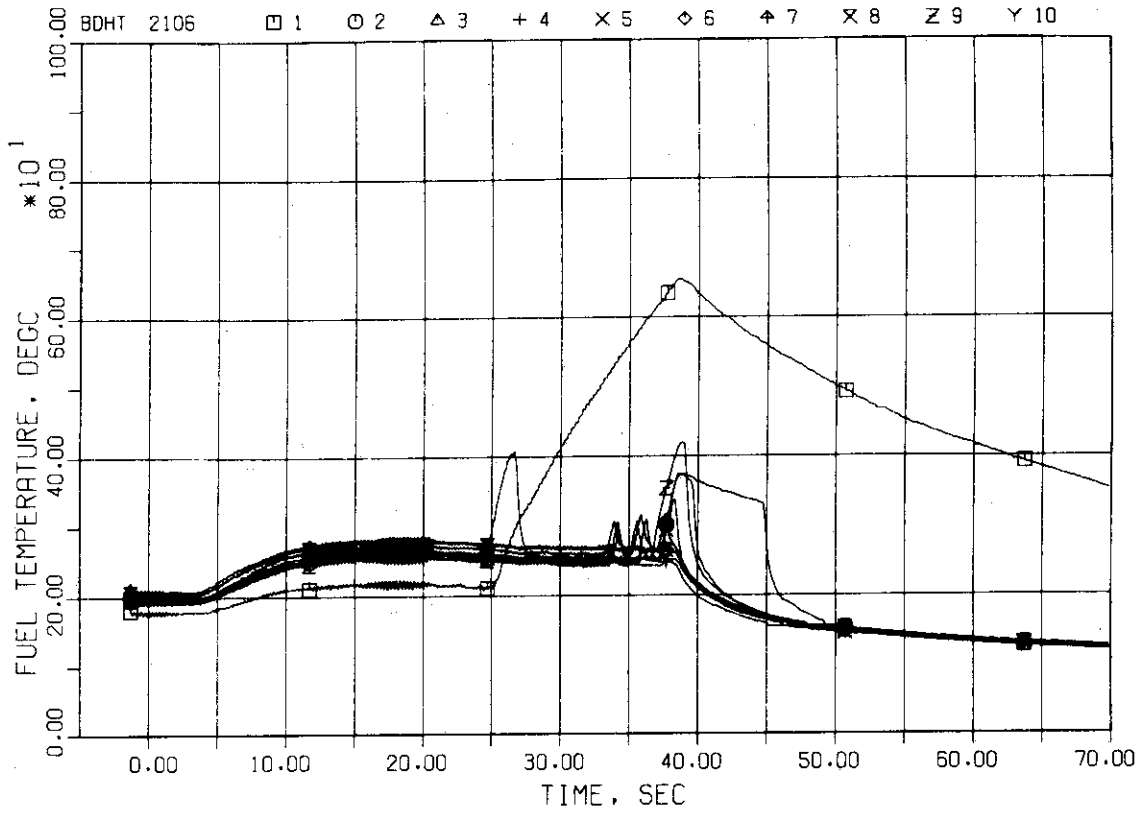


Figure 3.4.12. Rod Temperature of Top Discharge: RUN 2106

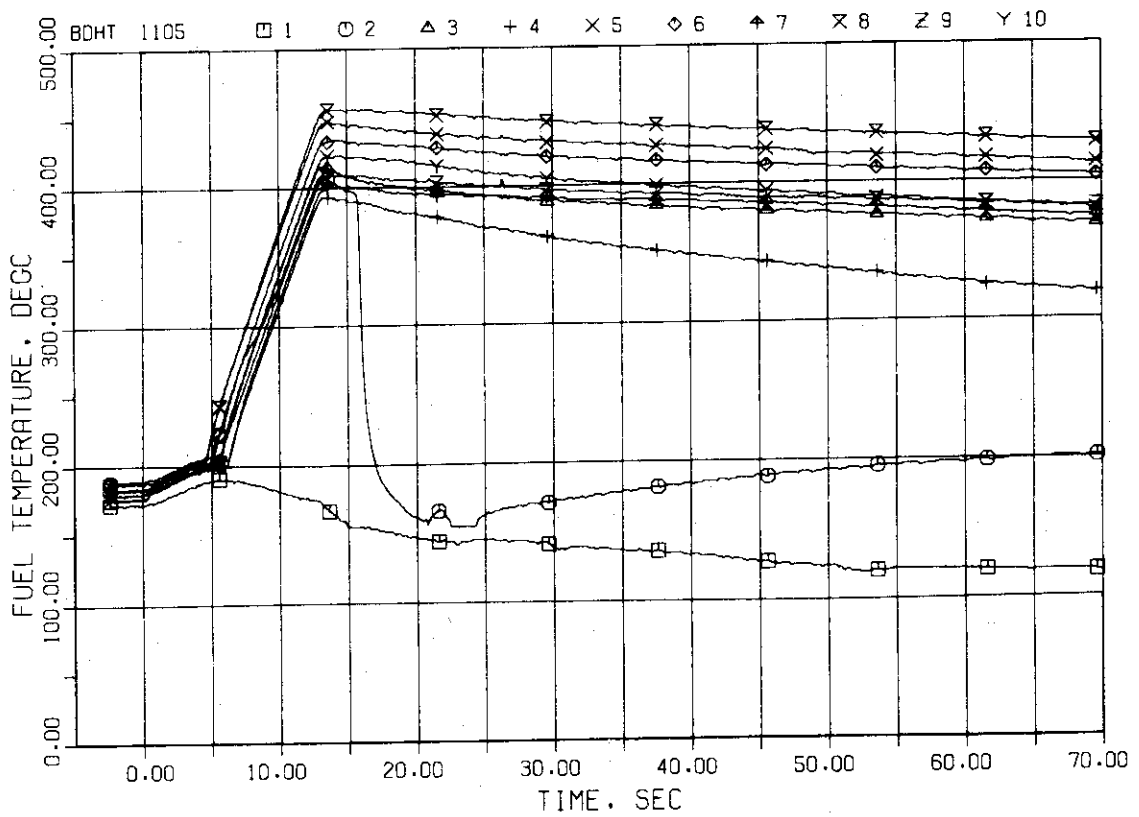


Figure 3.4.13. Rod Temperature of Simultaneous Discharge: RUN 1105



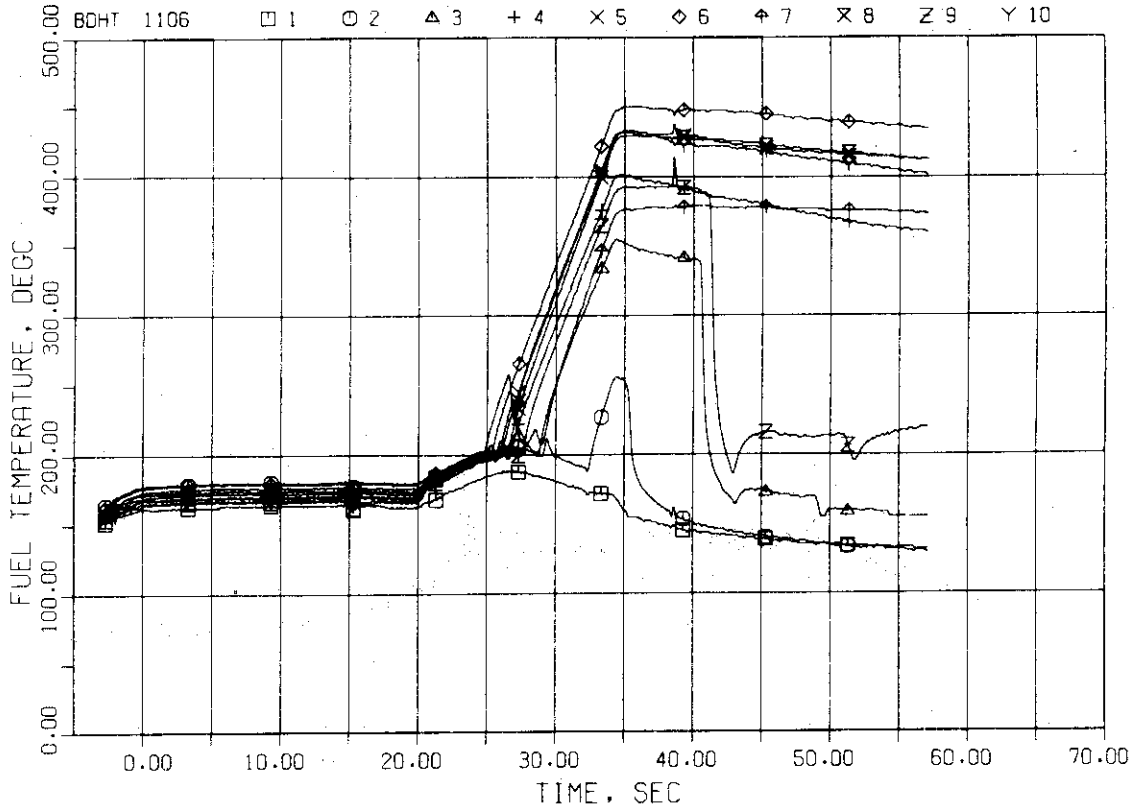


Figure 3.4.14. Rod Temperature of Simultaneous Discharge: RUN 1106

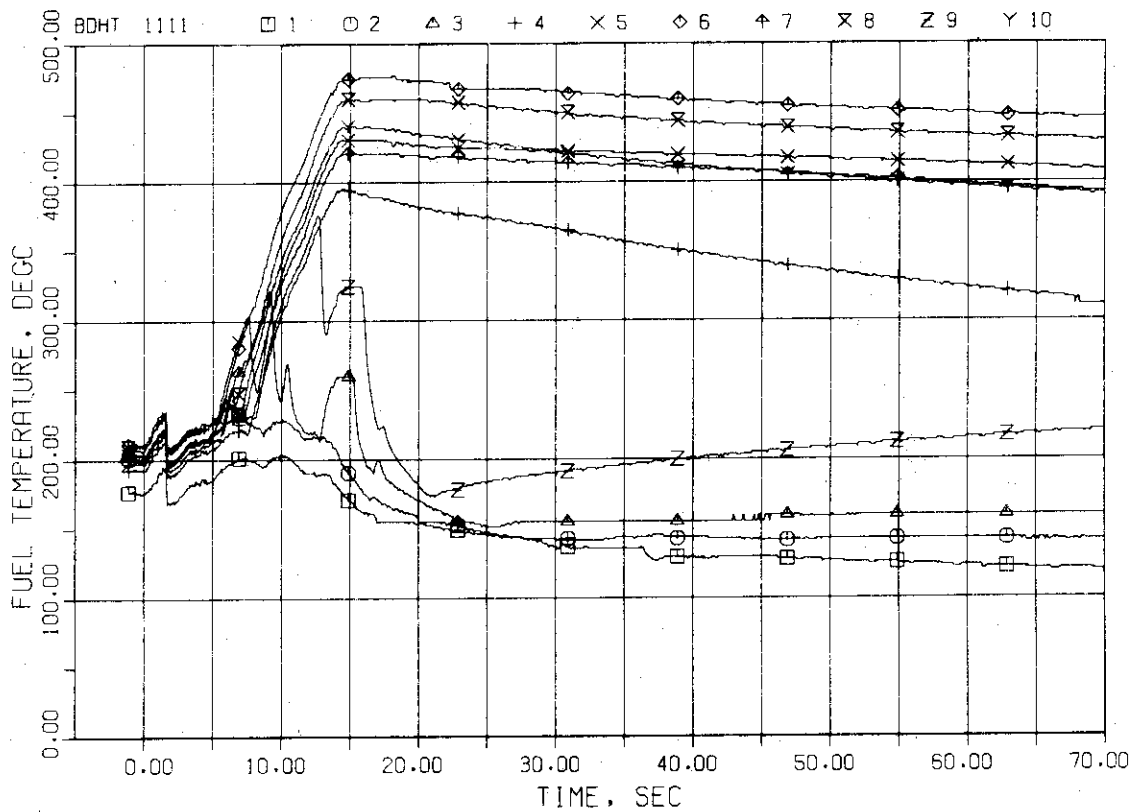


Figure 3.4.15. Rod Temperature of Simultaneous Discharge: RUN 1111

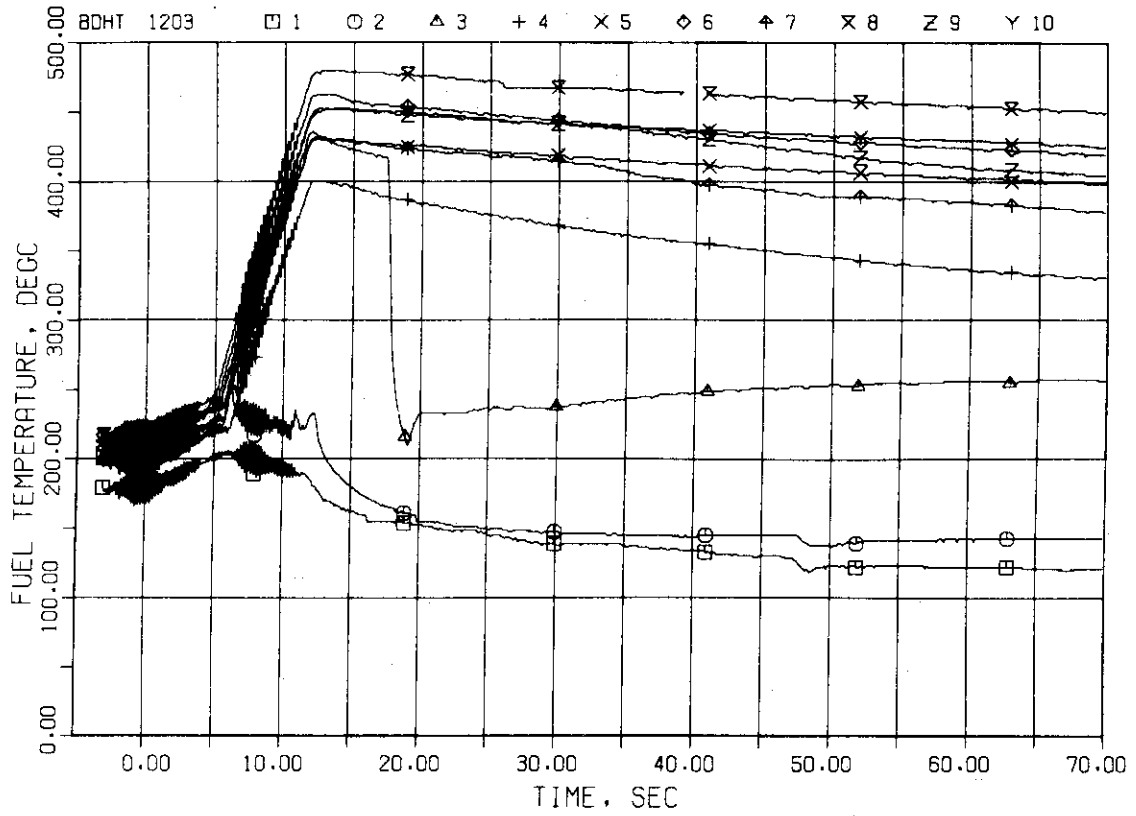


Figure 3.4.16. Rod Temperature of Simultaneous Discharge: RUN 1203

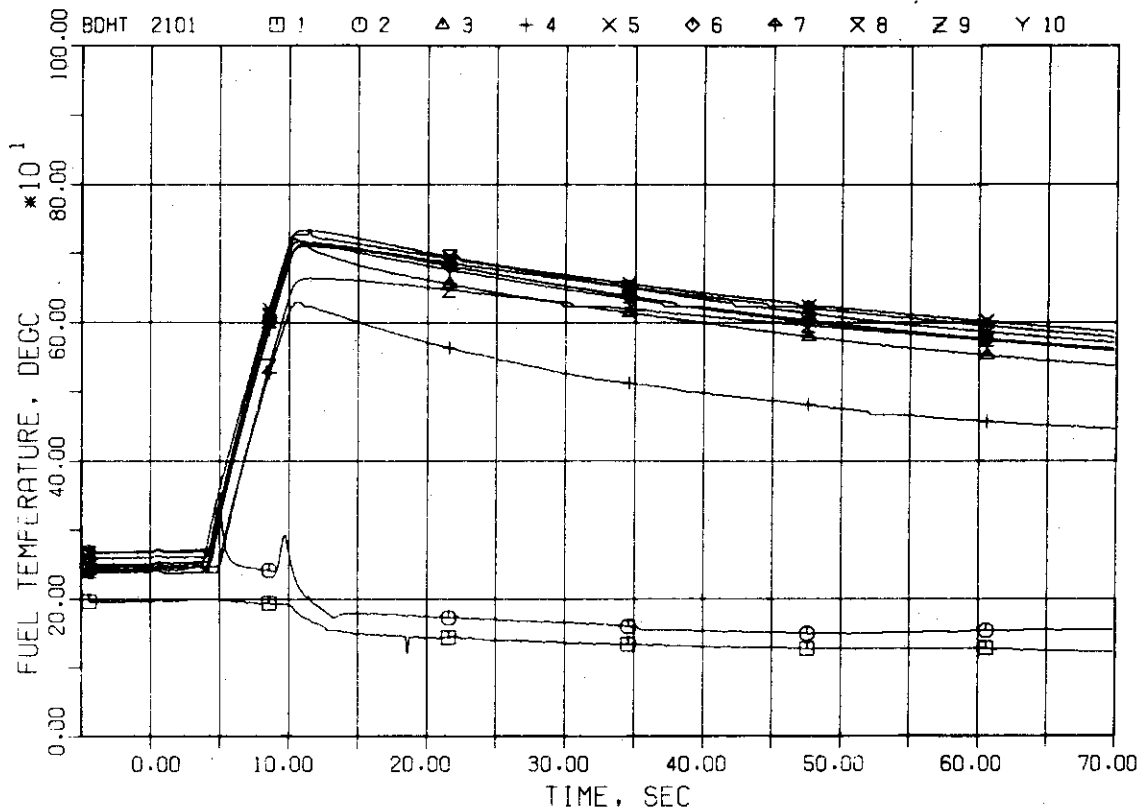


Figure 3.4.17. Rod Temperature of Simultaneous Discharge: RUN 2101

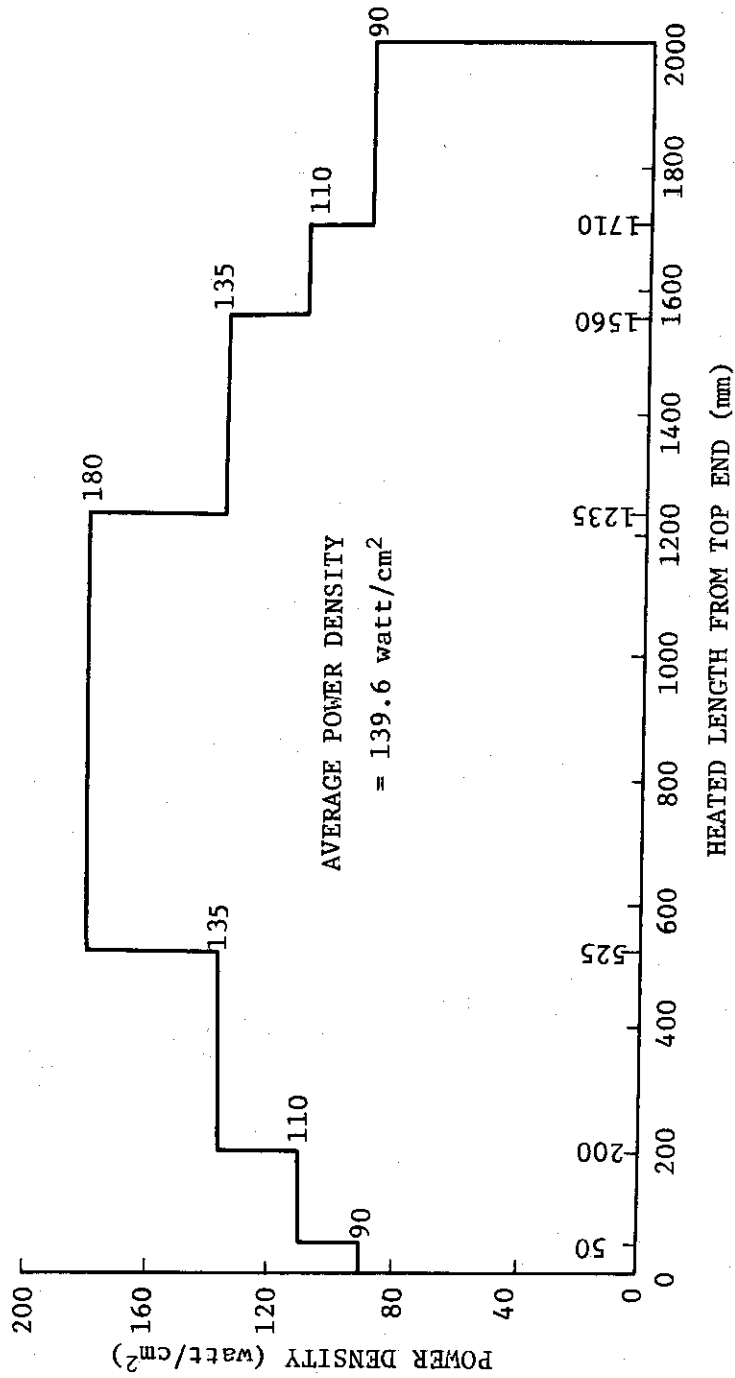


Figure 3.4.18. Power Profile of the Cosine Power Rod

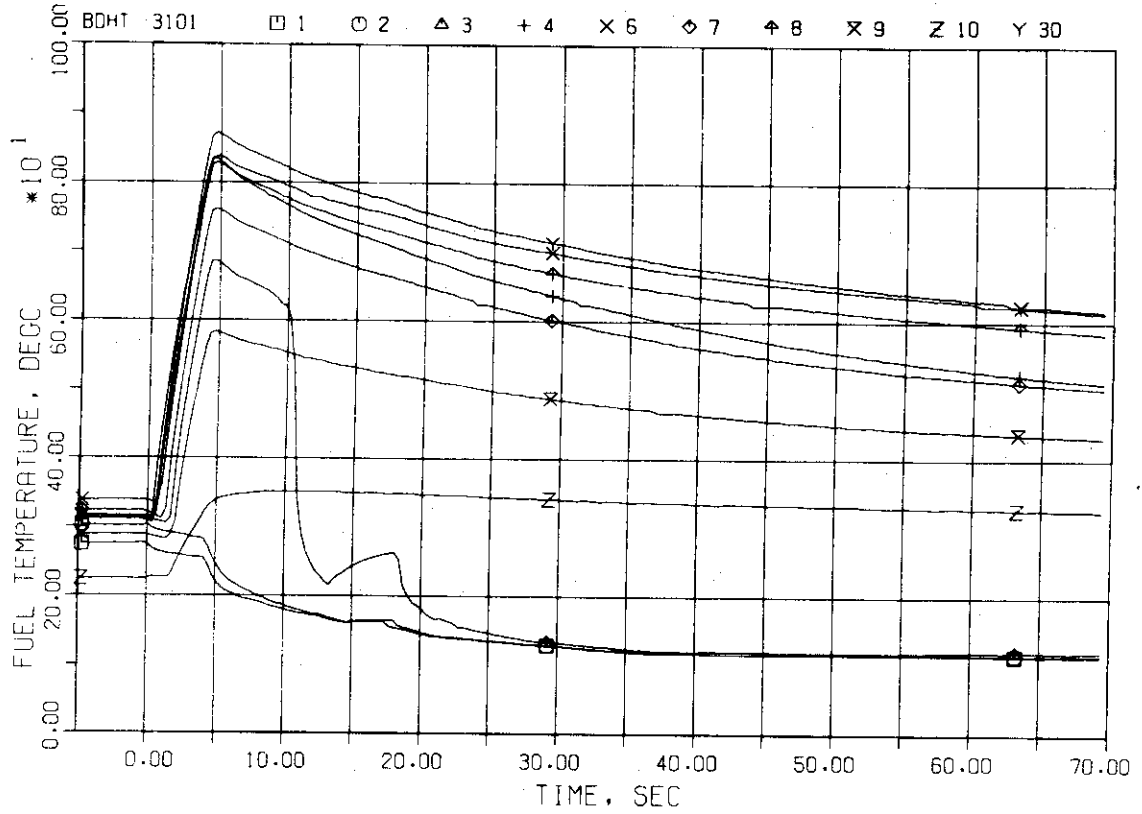


Figure 3.4.19. Rod Temperature of the Cosine Power Rod: RUN 3101

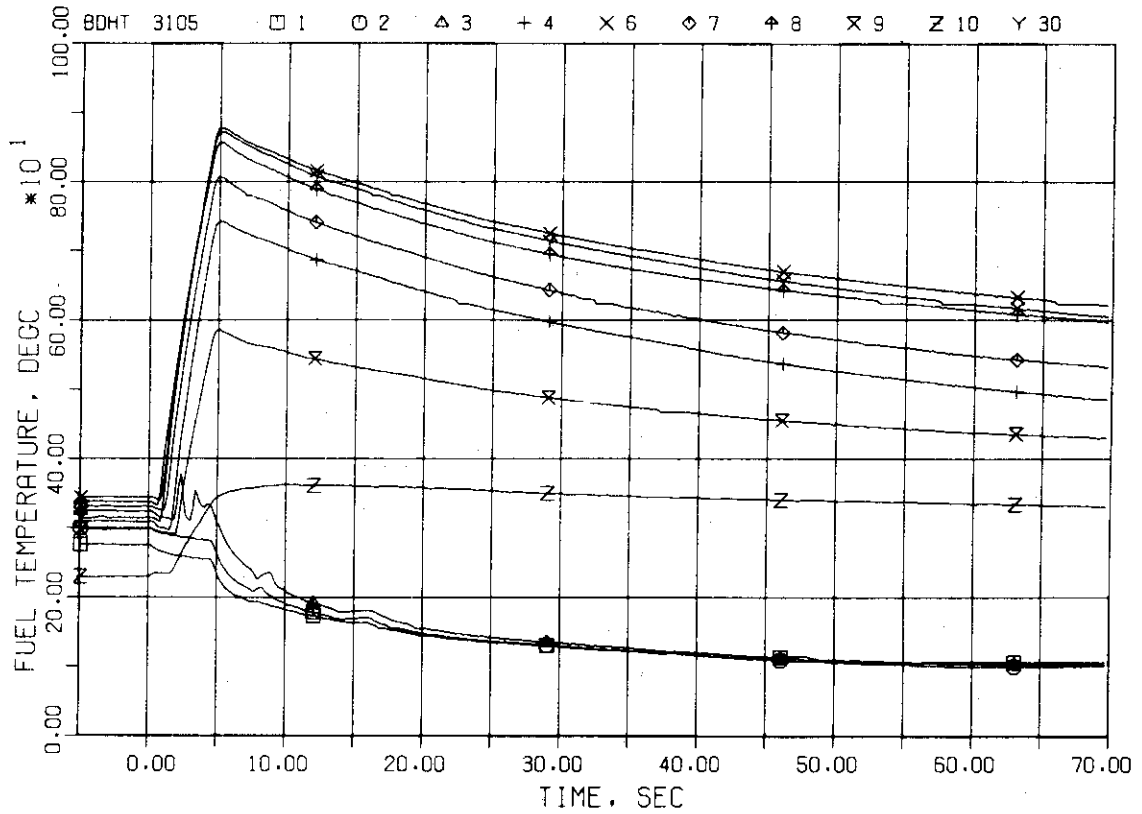


Figure 3.4.20. Rod Temperature of the Cosine Power Rod: RUN 3105

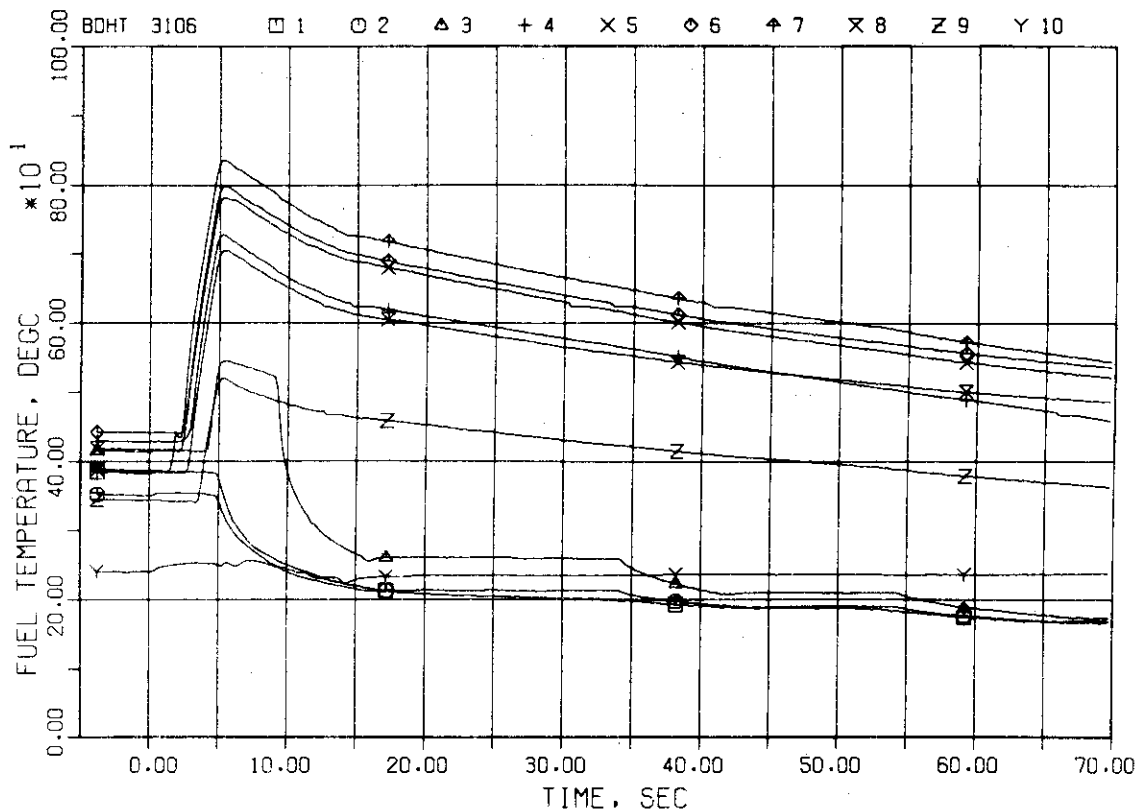


Figure 3.4.21. Rod Temperature of the Cosine Power Rod: RUN 3106

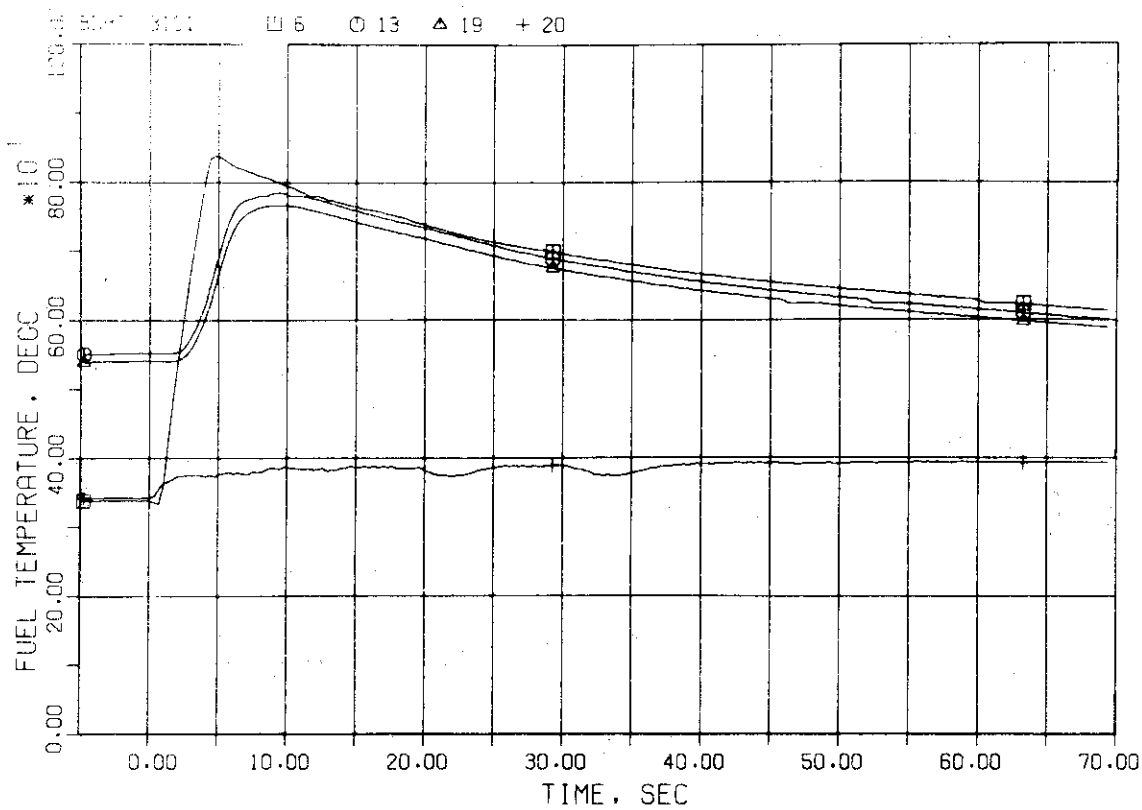


Figure 3.4.22. Rod Center Temperature: RUN 3101

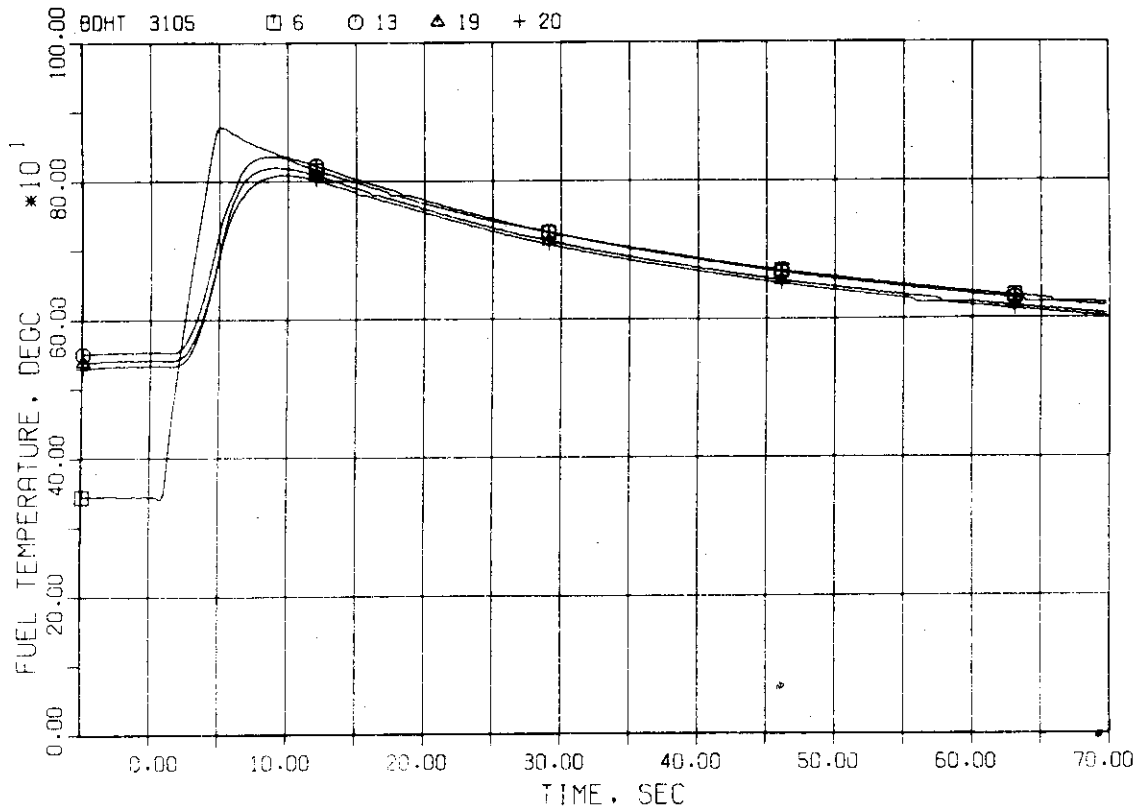


Figure 3.4.23. Rod Center Temperature: RUN 3105

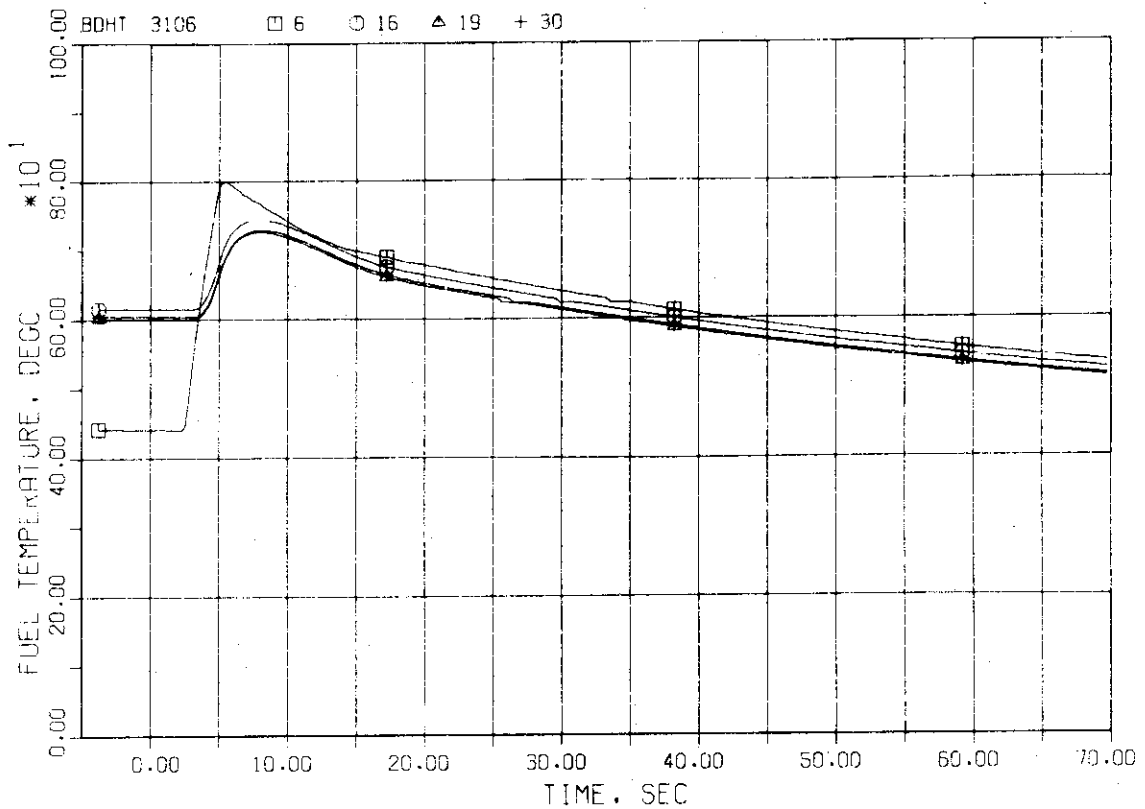


Figure 3.4.24. Rod Center Temperature: RUN 3106

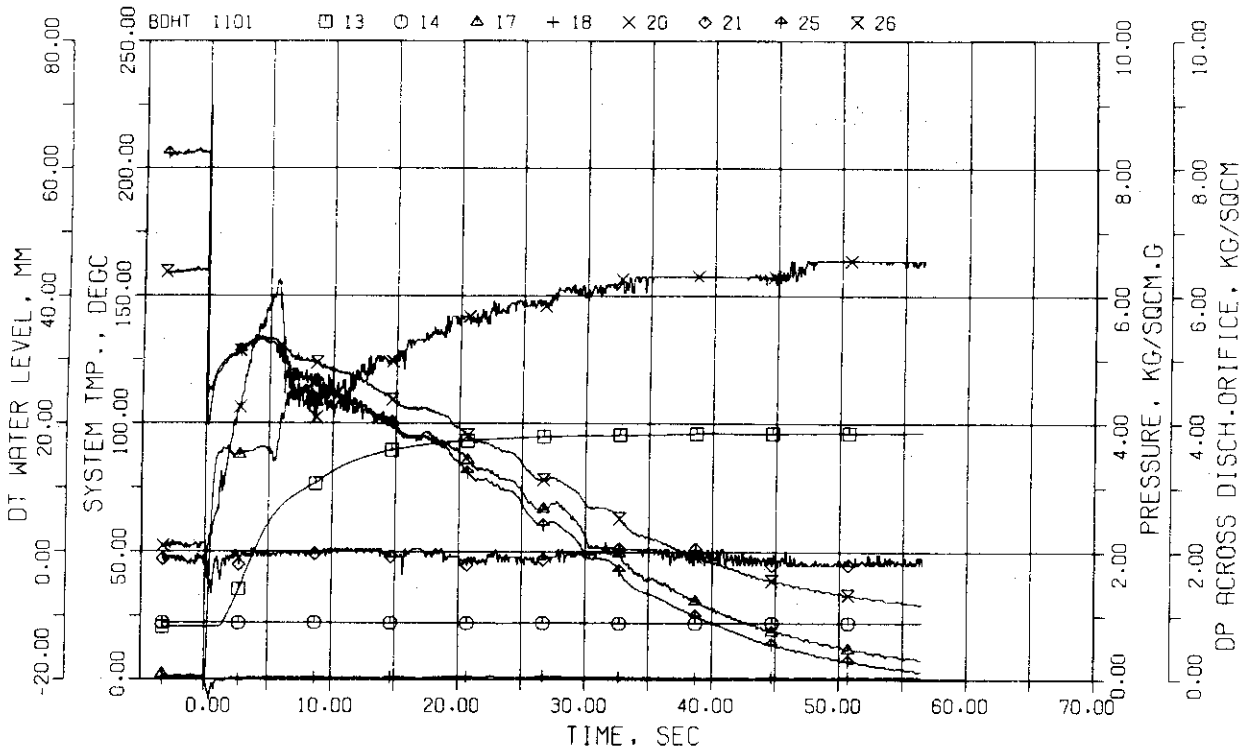


Figure 3.5.1. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1101

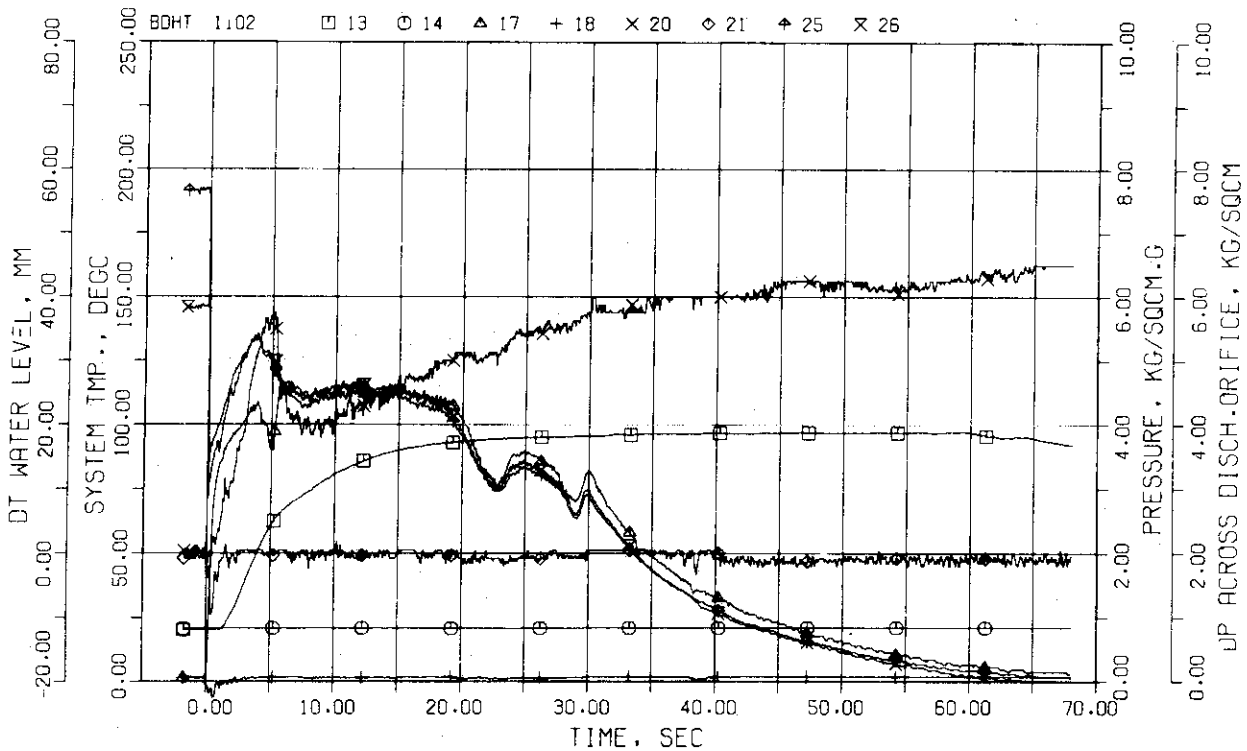


Figure 3.5.2. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1102

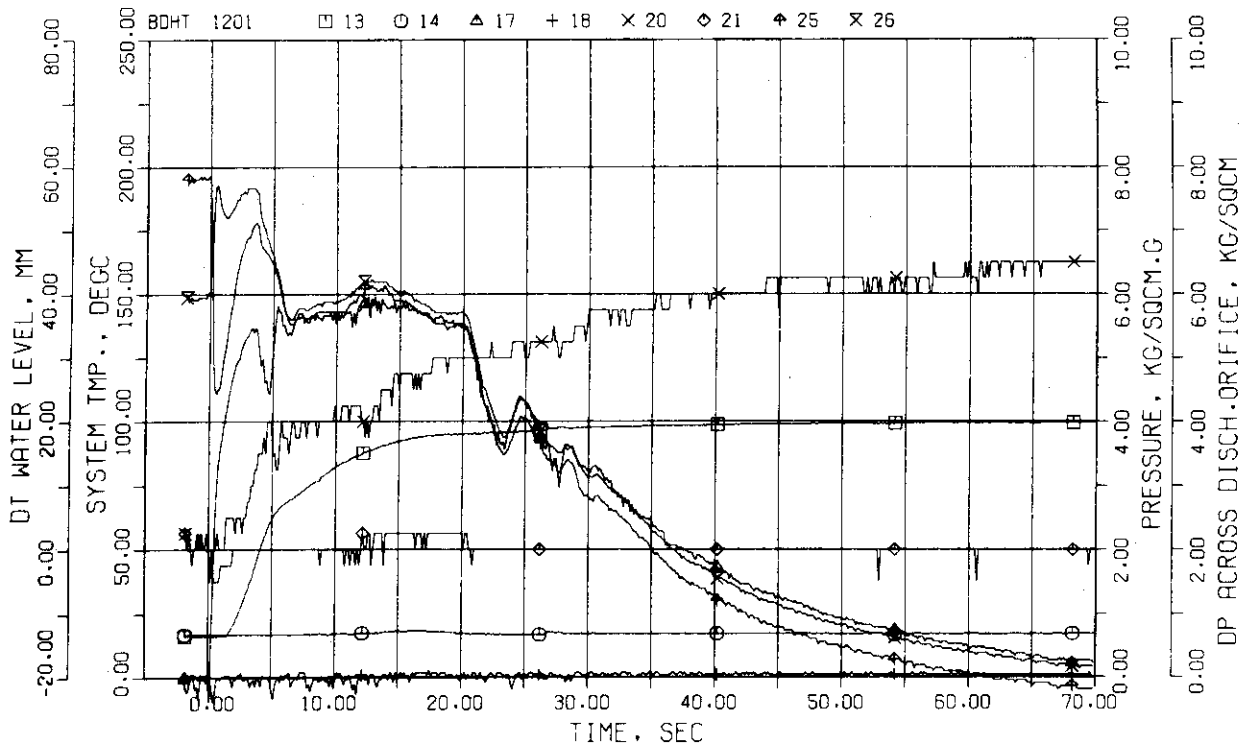


Figure 3.5.3. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1201

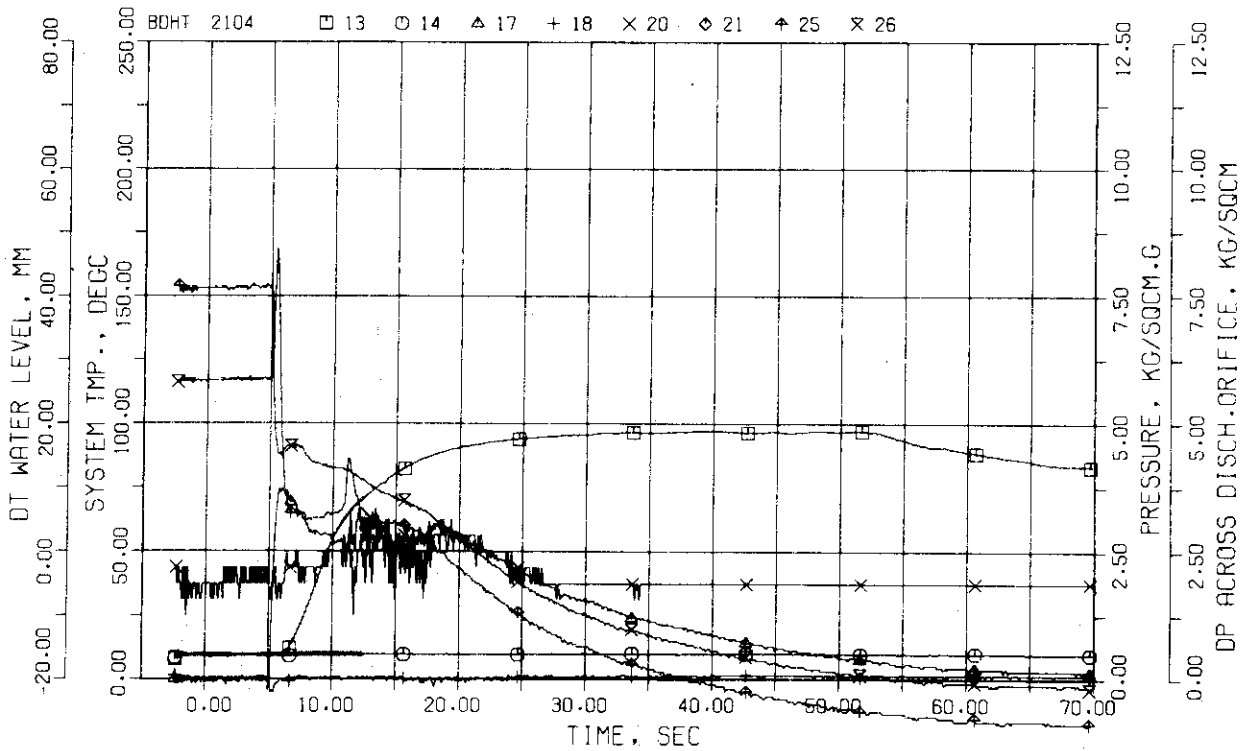


Figure 3.5.4. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 2104



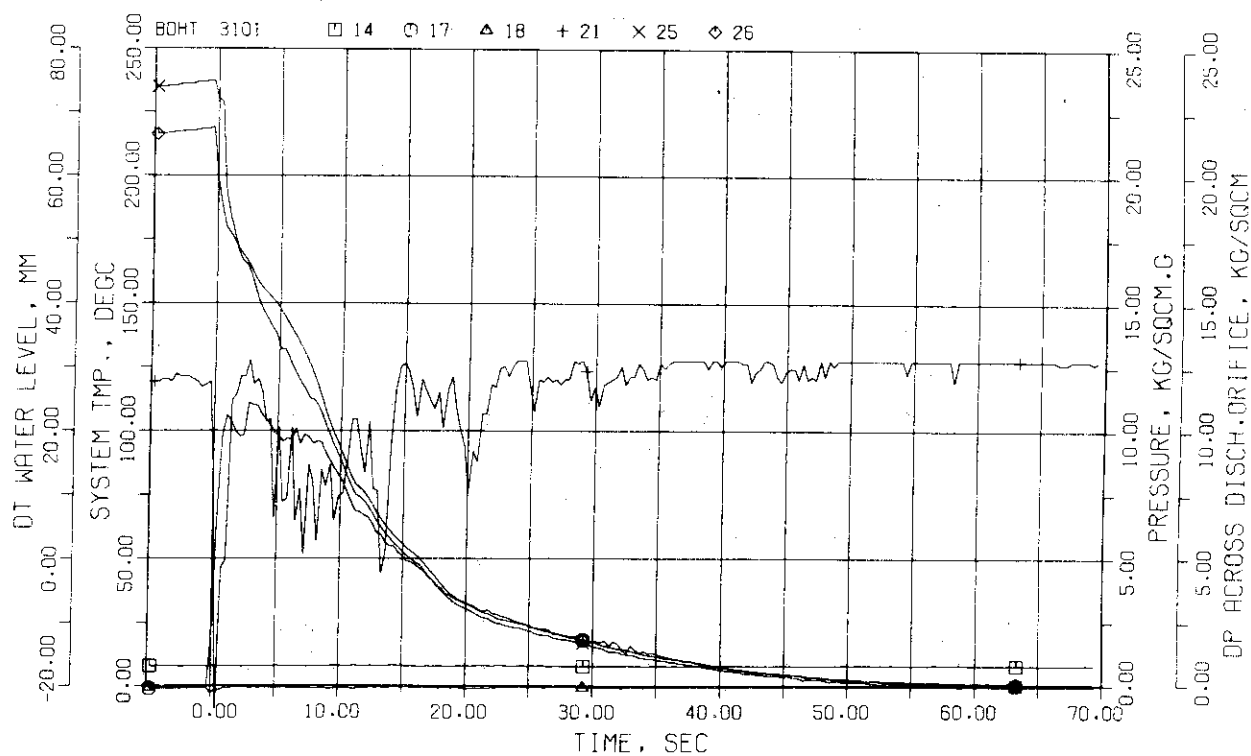


Figure 3.5.5. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 3101

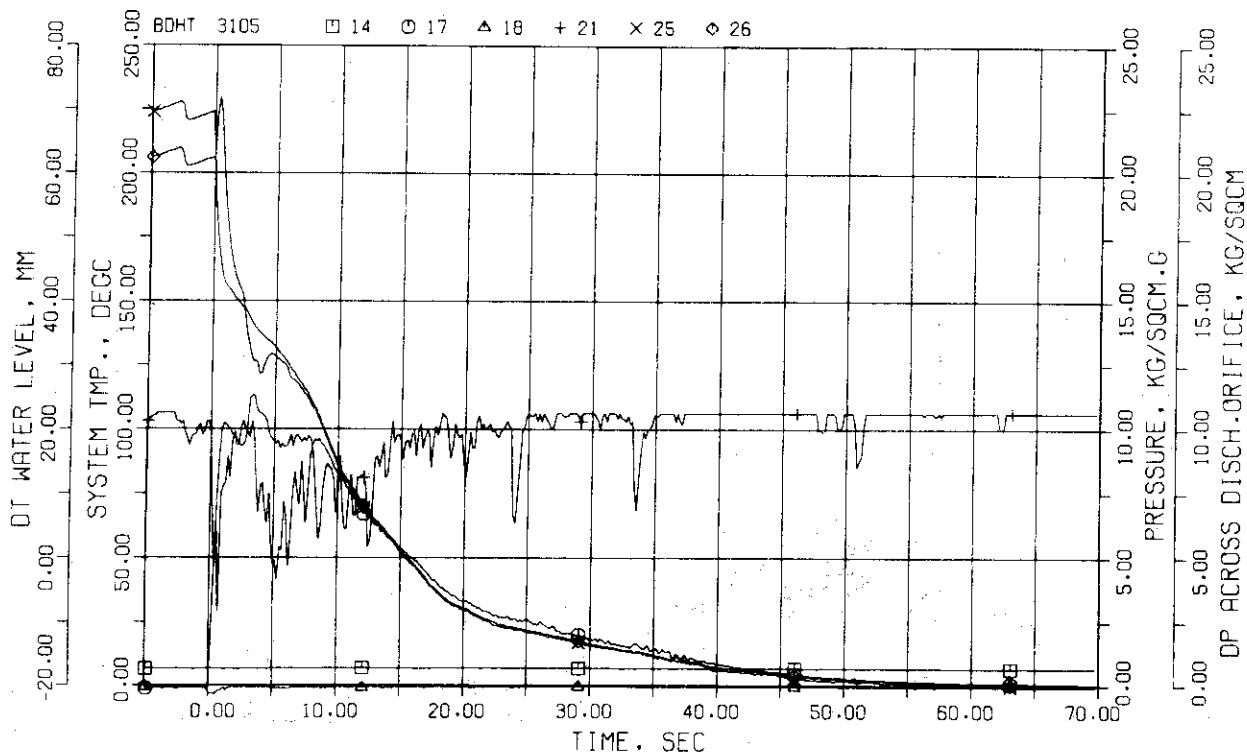


Figure 3.5.6. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 3105

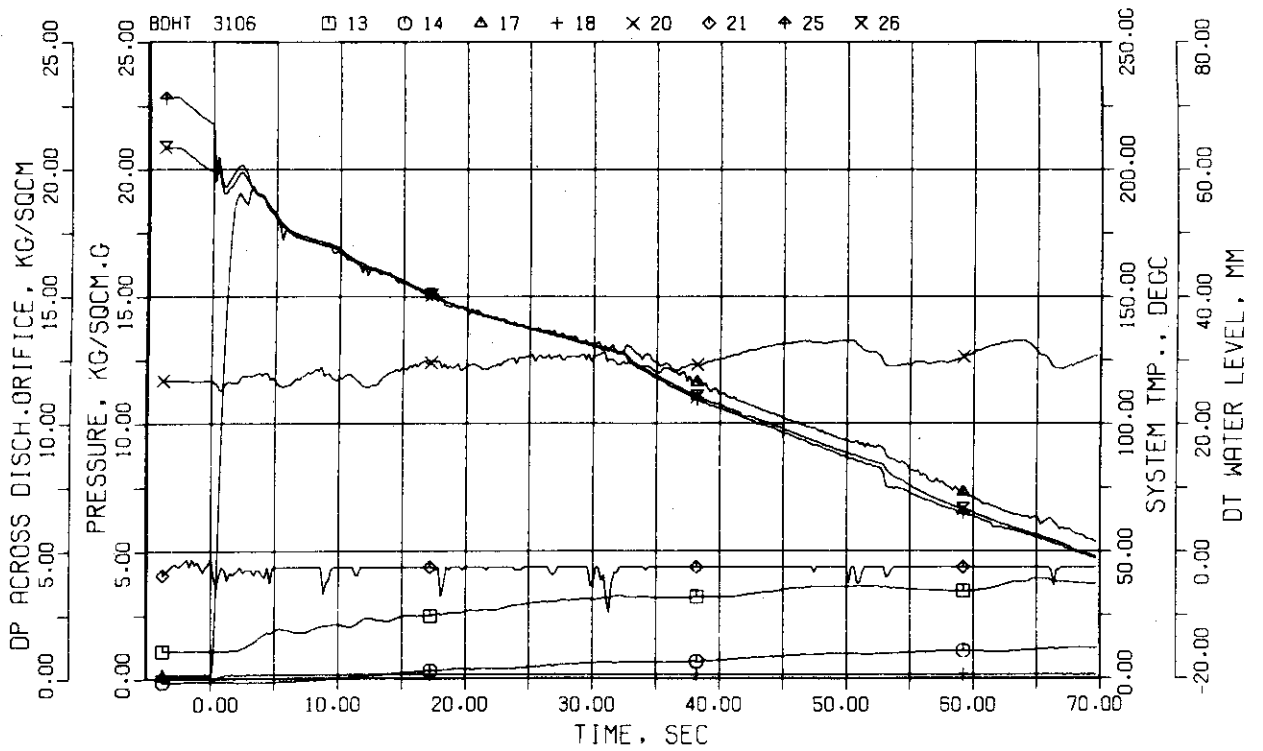


Figure 3.5.7. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 3106

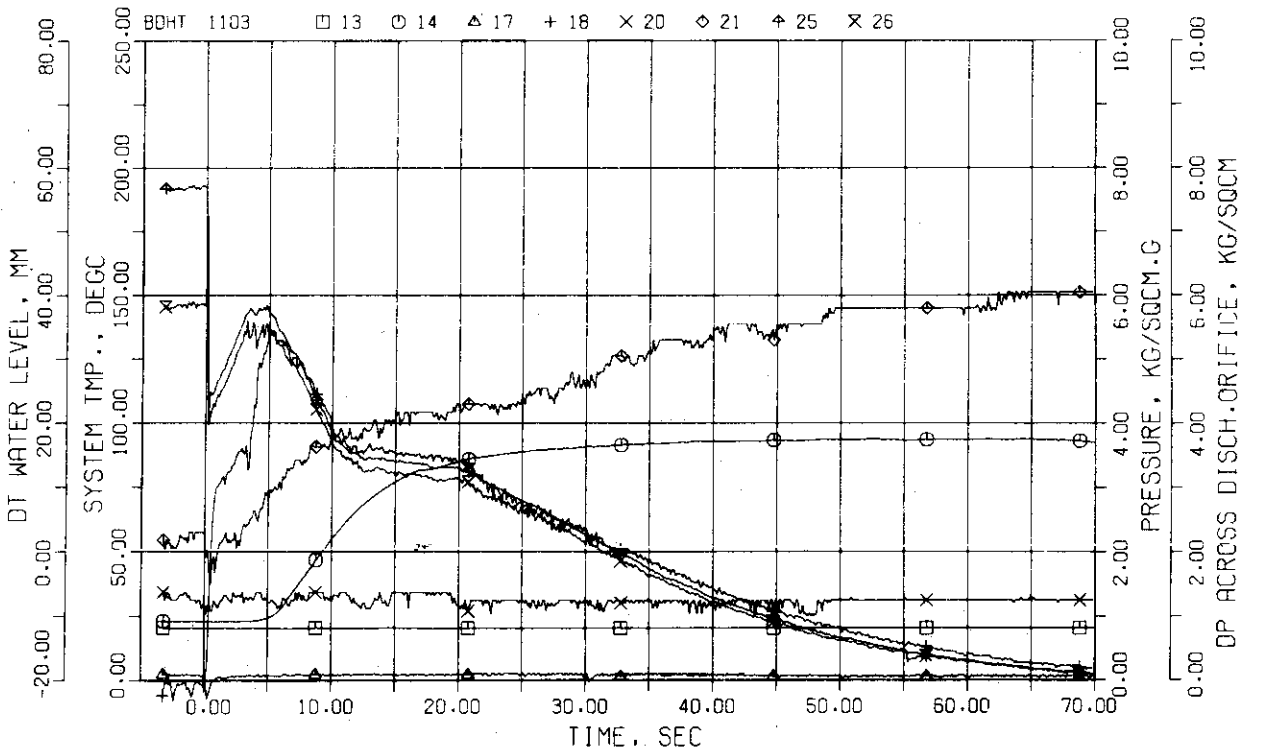


Figure 3.5.8. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1103

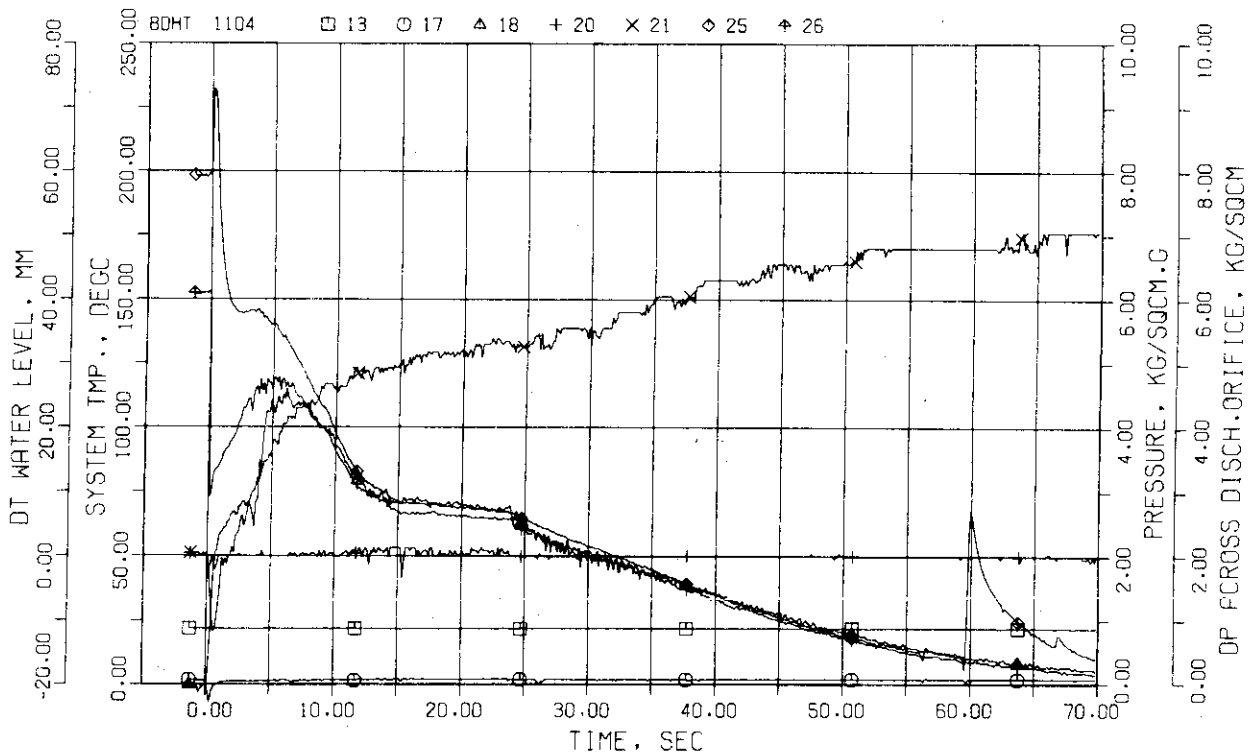


Figure 3.5.9. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1104

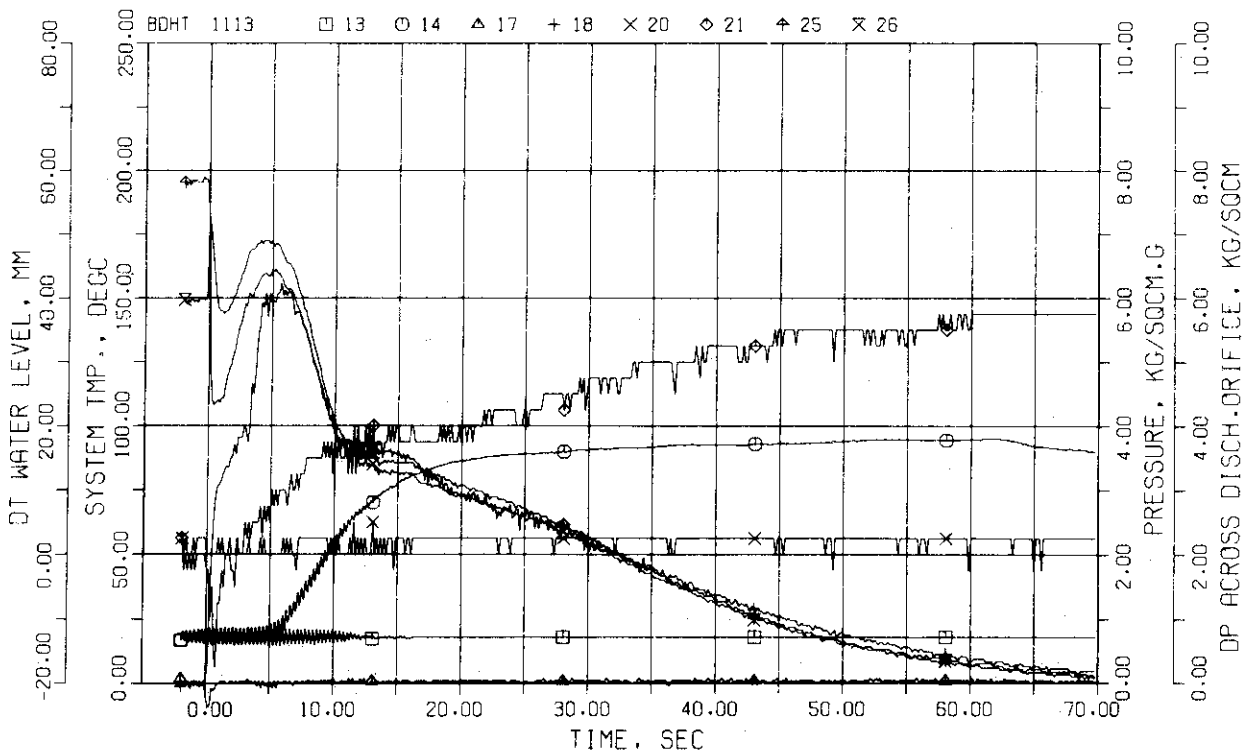


Figure 3.5.10. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1113

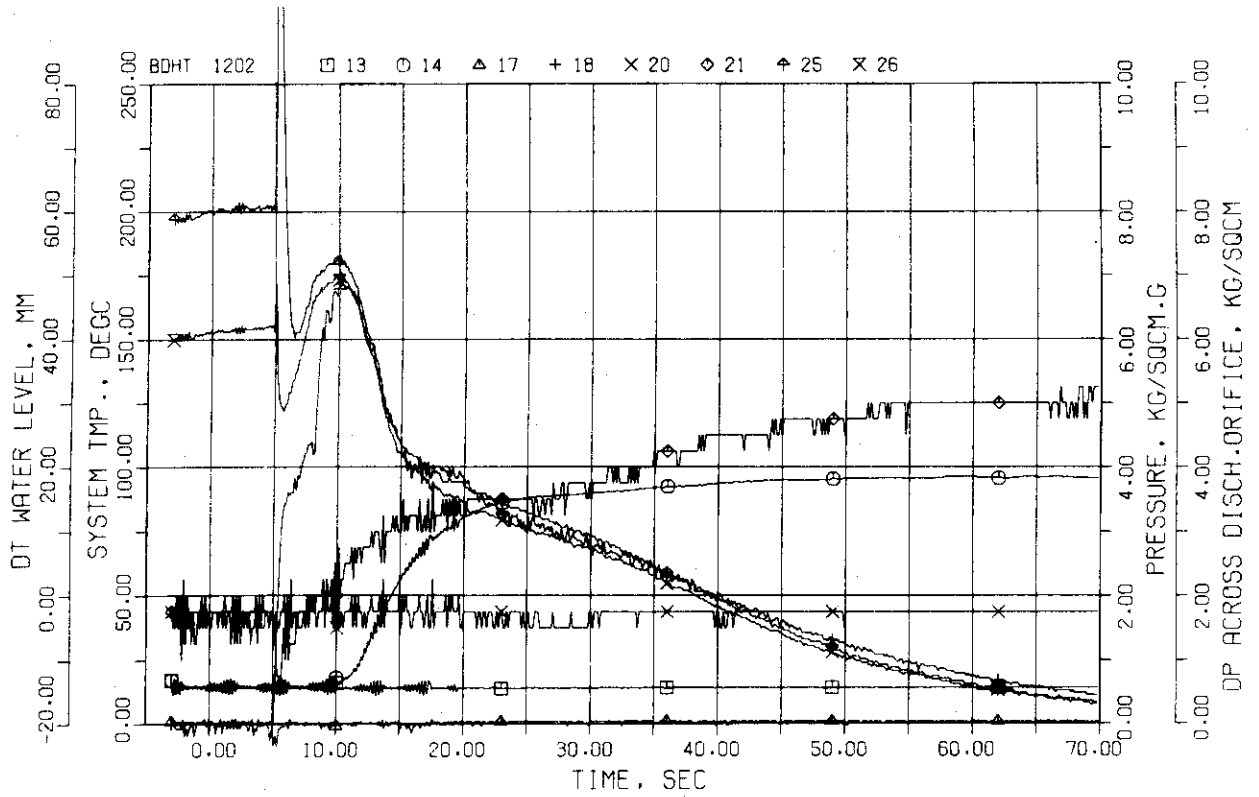


Figure 3.5.11. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1202

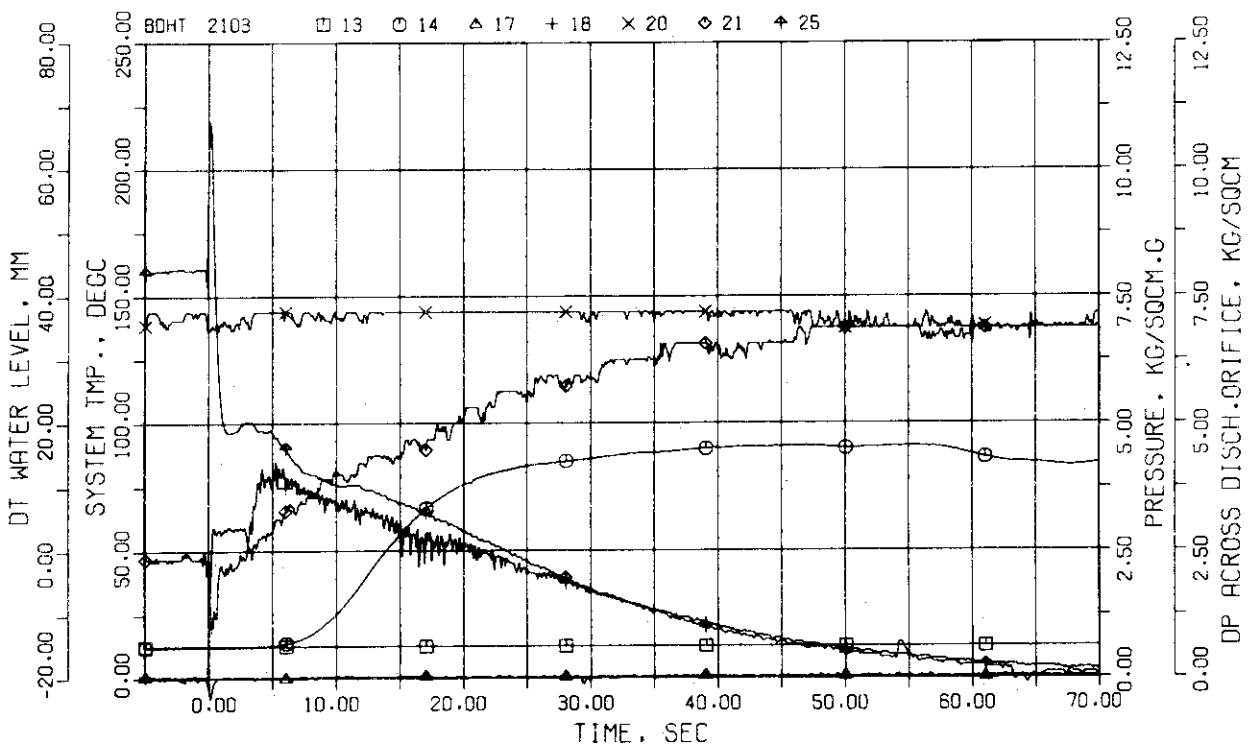


Figure 3.5.12. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 2103

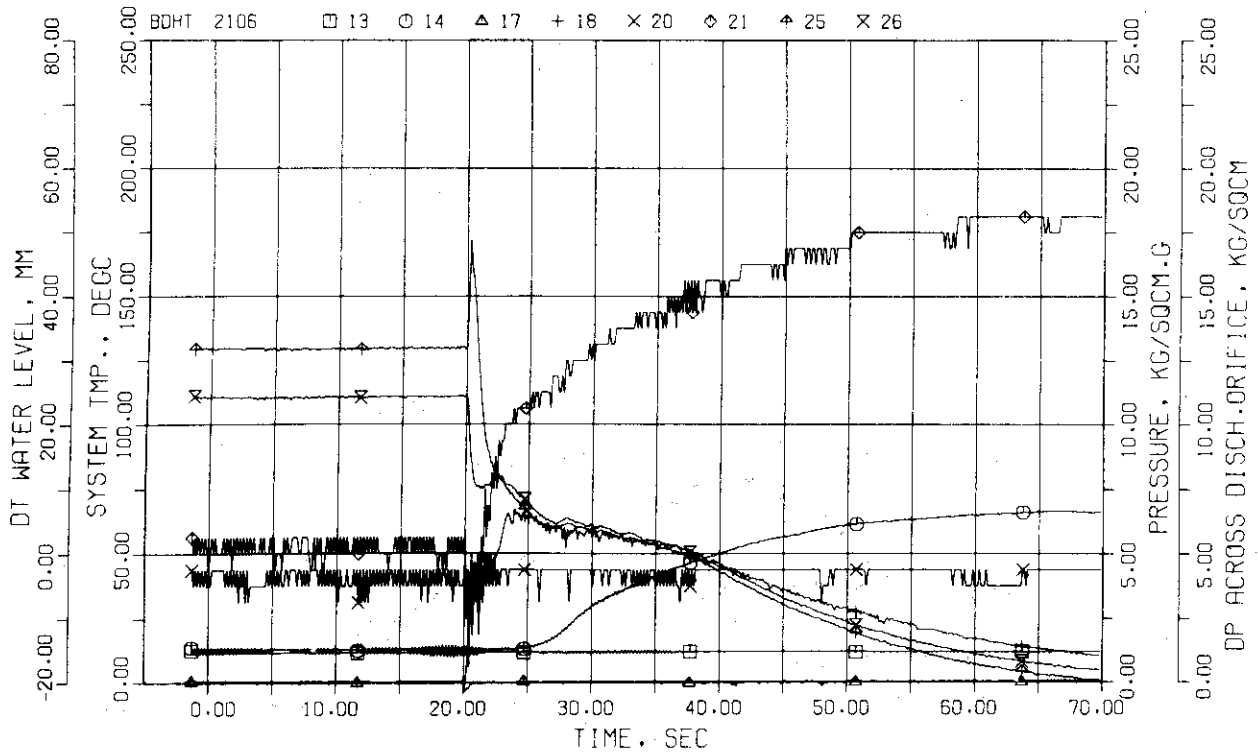


Figure 3.5.13 Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 2106

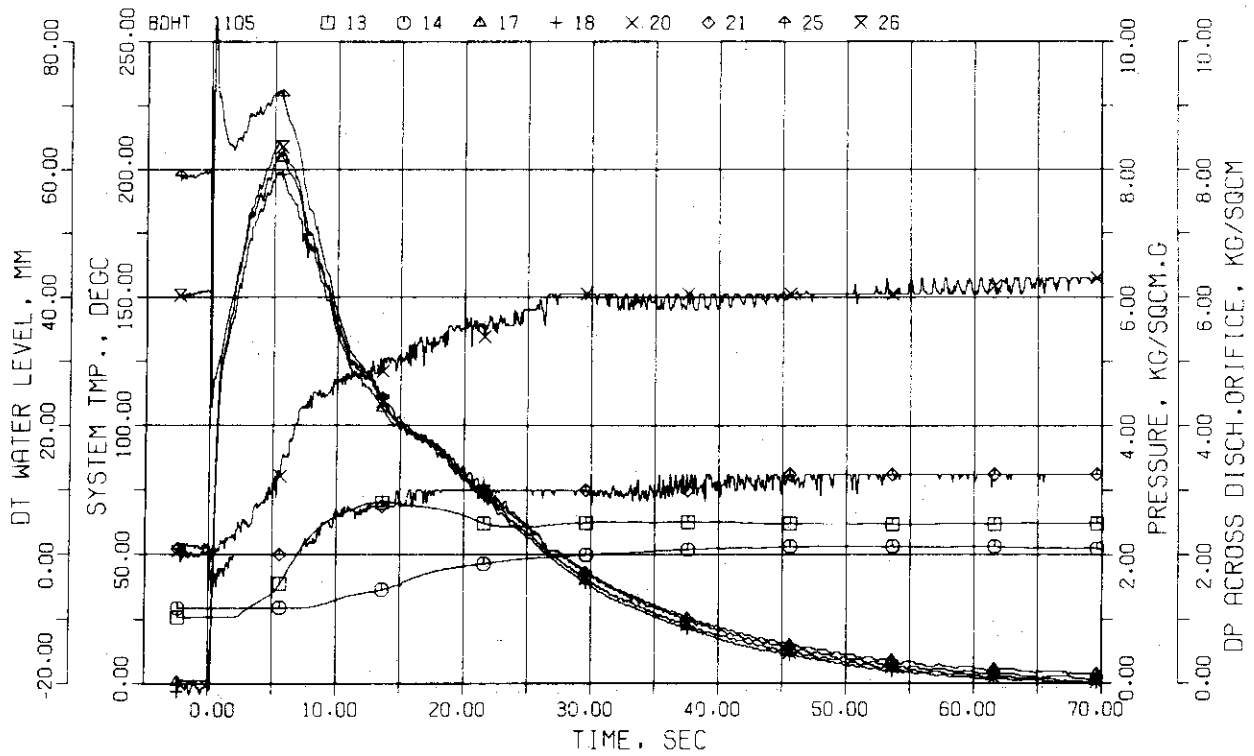


Figure 3.5.14. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1105

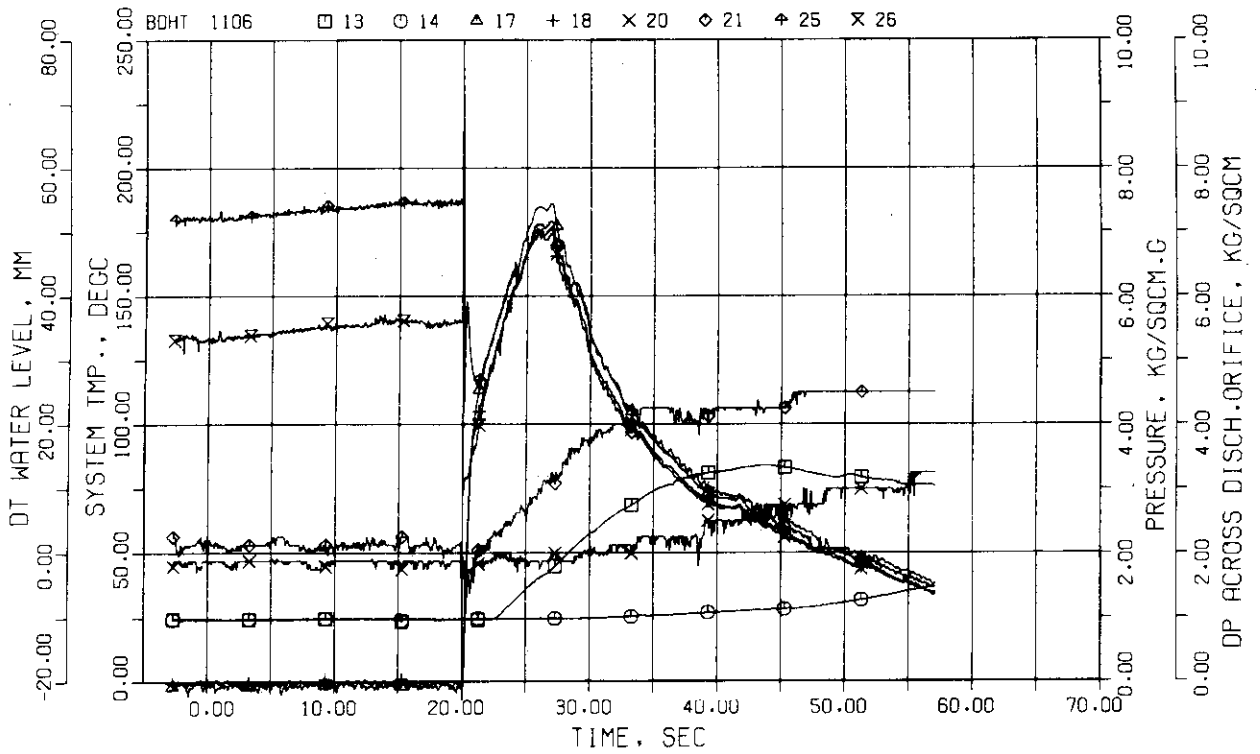


Figure 3.5.15. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1106

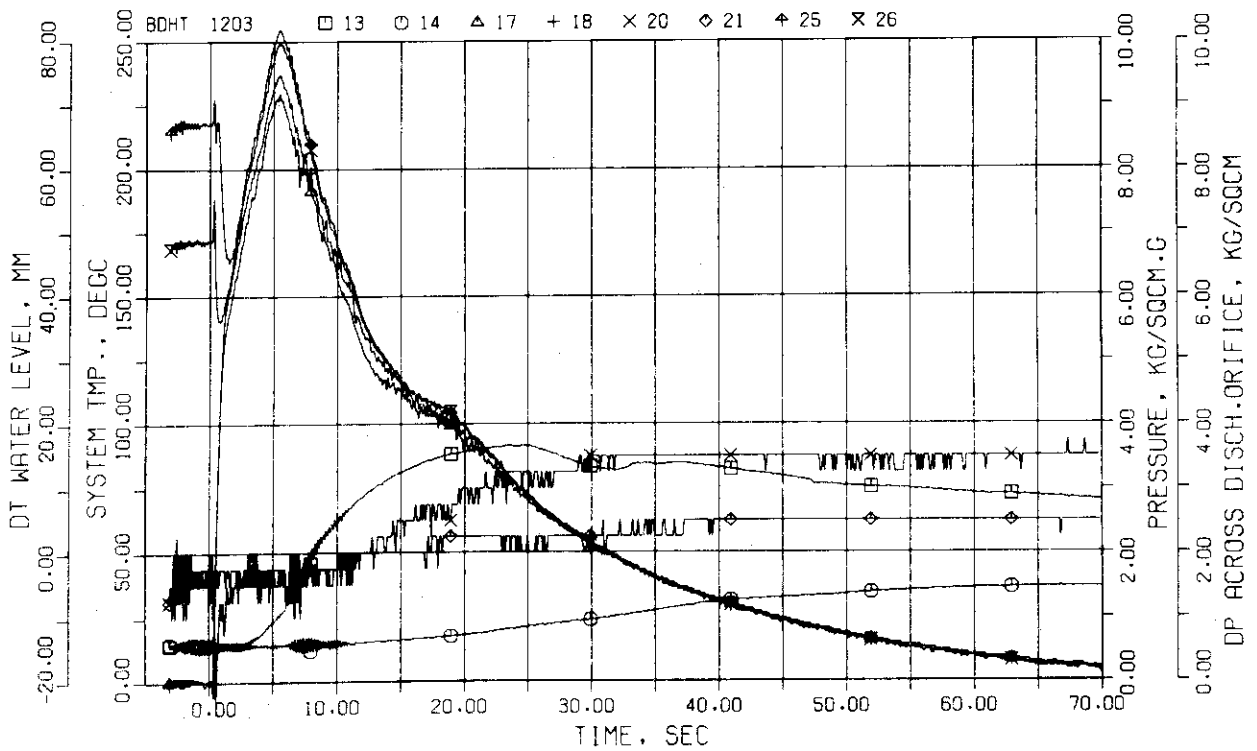


Figure 3.5.16. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
RUN 1203

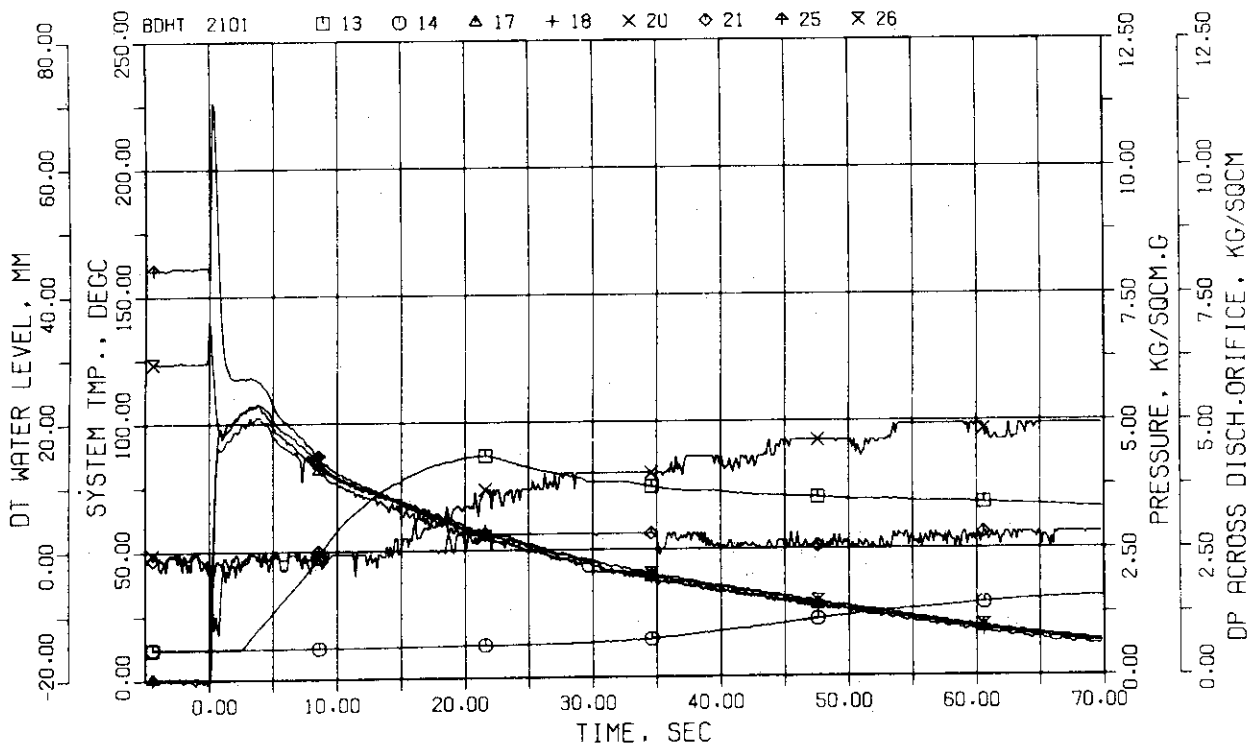


Figure 3.5.17. Transient Conditions at the Discharge Orifice:  
 RUN 2101

## 4 実験データと観察結果の対応

本実験シリーズでは、RUN 3101, 3105, 3106を除き、透明テスト部を用いて、ブローダウン時の冷却材の流動状態を観察した。観察には、モニターTVを用いビデオテープによる再生も可能である。前節では、実験データを項目別に定性的に検討したが、本節では、これらのデータと冷却材の流動状態の観察結果を対応させて放出形式毎に検討する。

### 4.1 下部放出

RUN 1101及びRUN 1102は比較的発熱体電力が小さく前節でみたように、両者のデータ間の定性的な差は少なかった。流動様式についても同様に違いは小さい。このRUNでは、放出弁を開けて放出を開始するとほとんど同時にテスト部の中央より下部付近に多数のボイドが発生し、上部にある冷却材を押し上げる。押し上げられた冷却材は放出に伴って落下し、ほぼ一斉にテスト部から流出する。この間が、放出開始から約3秒間の圧力上昇期に対応する。それ以後の温度上昇開始までの間はテスト部の上部プレナムから、水が激しい勢いでテスト部に流入し下向き2相流を形成し、しばらく持続する。この間発熱体表面がうすい液膜で覆われた環状流様となりこの液膜が蒸発すると温度の上昇が始まる。上部プレナムから流入する水の大部分は、RUN 1101, 1102の場合には、保護筒内の水に接しているガラス管の内壁をつたわって流れ落ちる。また、スぺーサの部分では、蒸気は通りやすく水が流れにくいので多少のたまり水が存在する。この水は時折流れ落ちて発熱体を冷やすことがある。RUN 1102にある23秒と30秒の時点の圧力変動は、上部プレナムから、かなり多量の水が流れ落ちてきたことに対応する。尚ガラス管に近い、外側の発熱体には、ガラス管内壁をつたって流れ落ちる液膜からの水滴により冷却され、表面に落下液膜を形成してクエンチし易い。このような流動状態はRUN 1201でも、1101, 1102と同様で、始めの3秒間は、下部セクションを中心に気泡が発生し、上部セクションあるいは上部プレナム冷却材を押し上げる。この冷却材が下部セクションの流体の流出に伴って落下し、圧力は減少し始める。ほぼ圧力が一定の期間である5秒から20秒までは、テスト部内はほぼ準定常的な下向き2相流で、環状流である。従って発熱体の冷却は、発熱体表面を流れる液膜を通して行なわれる。その後、上部からの冷却材の補給が減少し、除熱が不十分となるために、液膜が蒸発して発熱体温度が上昇する。圧力が減少中でも上部プレナムからテスト部へ間接的に、水が流れ落ちてくるために一時的な圧力回復がある。単一発熱体のRUN 2104の流動状態についても他のRUNとの違いは、殆んどない。

以上の観察結果から、下部放出の場合の流動状態はこの実験範囲では、初期サブクール、電気入力発熱体本数にあまり影響を受けず、似たような流動状態であることがわかる。下部放出中の現象を次のようにまとめることができる。

#### ① 未飽和減圧期

放出弁開放と同時に系内の圧力が初期液温に対応する飽和温度まで減少する。この間の流動状態は遮断弁を閉じることによって流れは止まるが、気泡発生には至らない。

#### ② 圧力上昇期



テスト部の下部を中心に、沸騰が始まり気泡が生成される。この気泡は合体して上部の水を押し上げ、系全体の圧力が上昇する。この水を蒸気が支えきれなくなると、水は落下し、再び発生気泡により上方へ吹き上げられる。この上下運動をくり返しなが、放出が進行する。

### ③ 減圧初期

テスト部内の水は、放出がすすむと、下向きに流れ出し、ほぼ一斉に流出する。スラグ流状の流れである。

### ④ 準定常期

上部プレナムからの冷却材の補給が、安定した下向き環状2相流を形成する。発熱体表面には、下向きの液膜流れができる。蒸気が定常的に発生し圧力はほぼ一定である。

### ⑤ 温度上昇期

上部プレナムから冷却材の流入が減ると、液膜が蒸発してしまい、温度が上昇し始める。温度制限値を越えた時に電源を切るので、蒸気発生は蓄積熱によるものだけとなる。

### ⑥ 減圧終期

テスト部内の残存水、蒸気が流出する。間欠的に上部プレナムからテスト部へ流入する水により、一時的に圧力が急減したり、発熱体を冷やしてクエンチすることがある。

## 4.2 上部放出

RUN 1103, 1104の上部放出は、比較的発熱体電力が少ない上部放出である。放出開始と同時に、気泡が最上段のセクションに発生し、テスト部全域がバルク沸騰様になる。放出開始から約3秒間、発生する気泡のために圧力が高くなるが、気泡が合体して上向き蒸気流が形成されると、最上段のセクションの水が蒸気流に持ち去られて殆んどなくなるために、発熱体が露出して、温度が上昇する。この時第2セクション以下では、スラグ流状の流動様式を示す。第2セクションでは、このスラグ流により水が持ち去られたり、蒸発につれてセクション内の水が減ると発熱体が露出して温度が上昇を始める。しかし、中央より下では、バルク沸騰が持続し間欠的に第2セクションへ水を吹き上げる。この状態が放出開始後RUN 1103では放出開始から10秒から20秒までの間、RUN 1104では、15秒から25秒までの間続き、準定常的な上向き2相流の状態を示す。電源を切ると、残存水は減圧沸騰と、蓄積熱によるバルク沸騰で次第に減ってくる。保護筒に水を入れない、RUN 11202の場合の流動状態は、1103, 1104とほぼ同じで、初期の気泡発生による圧力上昇の後、系内は全体にわたりバルク沸騰になるが、上部セクションを除き上向きスラグ流状の流動様式を示す。上部セクションでは、環状流からミスト状に変わるため、下からの水の補給が充分でない上端近くから、発熱体温度が上昇する。また、各セクションのフローパターンはセクション毎にほぼ相似で、各セクションの下部にあるスパーサー上部に水がたまり、その水が下から吹き上がってくる蒸気により、上の方へ吹き上げられ、蒸気が上方に抜けると、その水が落下する。この流動を振動的に、ブローダウン終了まで継続する。この振動は、発熱体電源を切った後の方がより激しい。単一発熱体の場合の、RUN 2103の流動及び圧力を高くしたRUN 2106の流動も、他のRUNの場合とほぼ同じである。

以上の観察結果をまとめると、上部放出の場合も、下部放出と同様に、この実験シリーズの実験範

圈内では、実験条件の相違によるフローパターン上の違いは、殆んどなく次のような流動状態を示すことがわかる。

① 未飽和減圧期

放出弁開放と同時に系内の圧力が飽和圧まで下がる。冷却材は遮断弁を閉じるので流れが止まるが、見かけ上の変化はない。

② 圧力上昇期

テスト部上部を中心に気泡が発生し始める。気泡は合体し上向きのスラグ流となる。テスト部の下部はバルク沸騰領域にある。

③ 減圧初期

上部のスラグ流により、冷却材が流出し、テスト部全体が、一様なバルク沸騰となる。

④ 準定常期

ほぼ定常的な上向きのスラグ流が形成され、蒸気流が下から上へ吹き抜ける。蒸気流により、水が持ち去られ、上部セクションから順に冷却材が空になってくる。

⑤ 温度上昇期

発熱体が上部から順に露出して、温度が上昇する。

⑥ 減圧終期

テスト部内に残存している水が沸騰しながら、蒸気が発生し、蒸気放出となって圧力が次第に下がる。

### 4.3 同時放出

RUN 1105, 1106 は上下部同時放出である。この場合の流動状態は、上部放出と下部放出の流動の特徴を合わせて持っている。即ち、放出開始と同時に上部放出の場合と同様に上部セクションに発生するが、同時に下部放出と同様に下部セクションにも発生する。従って、気泡は放出と同時にテスト部全体にはほぼ一様に発生し、圧力も上昇する。放出開始後5秒後までこの様な圧力上昇が続き、冷却材は上部では上向き、下部では下向き流れになる。しかし、上向きの蒸気流が冷却材を支えきれなくなると、ほぼ一斉にすべての冷却材が落下し、発熱体が露出して温度が上昇する。その後、上部プレナムや、スパーサ部分にあったわずかな残存水がテスト部内を落下するが、下部放出の場合と違って、自由落下に近い早さである。そのためクエンチもおこりにくい。保護筒に水を入れないRUN 1203の場合も、定性的なフローパターンは、1105, 1106と同様に、放出開始と同時に発生する気泡は、テスト部全体にあって、気泡流となり各セクション毎にバルク沸騰様であるが、すぐに冷却材は、下向きに流れ出てテスト部は空になる。その後テスト部内へは上部プレナムから、自然落下に近い状態で水が流れ落ちてくる。発熱体の温度も、バルク沸騰が消滅し、冷却材が下部へ流れ落ちる時期に一せいに上昇し始める。単一発熱体のRUN 2101の場合でも、流動様式の変化は他の場合と同様であるが、放出初期に発生する気泡が、やや小さめである。

以上のように、同時放出でも実験条件による流動状態への影響は小さい。放出中のフローパターンは、次のようにまとめることができる。

## ① 未飽和減圧期

放出開始と同時に、テスト部の圧力は初期液温に対応する飽和圧力まで低下する。流れは遮断弁を閉じるので止まるが、見かけ上の流動には変化がない。

## ② 圧力上昇期

テスト部全域に汎って気泡が発生し、バルク沸騰様になる。冷却材は、上方と下方へそれぞれ流れるが、上向き流のクオリティは高く、下向き流はクオリティが低い。

## ③ 減圧初期

気泡の占める体積が増しスラグ流状となる。蒸気と水が上下に分離して、蒸気が水を支えきれなくなる時点で、テスト部内は空になる。

## ④ 温度上昇期

発熱体が蒸気中に露出して、発熱体表面の液膜が蒸発する時点で、発熱体温度が上昇し始める。

## ⑤ 減圧終期

テスト部内に残存する水がわずかに上部プレナムから落下することがある。蒸気放出により圧力が低下する。

## 5 実験パラメータの影響

本実験シリーズの実験パラメータは、放出形式初期液温、初期圧力、発熱体出力、発熱体本数、保護筒の水の有無である。これらの影響について、実験及び観察結果から次のようにまとめることができる。

### 放出形式

放出形式のブローダウン現象に及ぼす影響は、主として、ブローダウン初期のテスト部での気泡発生位置が異なることである。上部放出では第1、第2セクションに主として気泡が発生し、下部放出では第3、第4セクションから気泡の発生が始まる。同時放出の場合には、気泡はほぼ全域に汎り発生し始める。ブローダウン開始後圧力上昇があるのは、各放出形式共通である。減圧中の流動は、上部放出では主としてスラグ流様の上向き2相流で、テスト部の下部半分はバルク沸騰領域である。一方下部放出では、環状流様の下向きの2相流が継続する。同時放出の場合には、減圧時のバルク沸騰期間が短かく、冷却材はほぼ一斉に流出する。発熱体温度変化は、上部放出の場合には、上部から露出した順に温度が上昇するが、下部放出では必ずしも露出順ではなく、スペーサに近い部分では温度上昇が遅れる。同時放出では、ほぼ全域一斉に温度上昇が始まる。

以上のように、放出形式の違いによってフローパターンが異なり、その結果として圧力変化過程、温度上昇時刻が違ってくる。

### 初期液温

本実験シリーズでは、初期液温を2通り選んで実験を行ったが、この影響は小さかった。これは、いずれの場合も初期サブクールが大きく、その差が顕著でなかったことが原因である。しかし、初期サブクールの小さいほど、つまり、初期液温の高い場合ほど圧力上昇が大きい傾向があり、気泡発生量が多いことに対応している。

### 初期圧力

初期圧力の違いは、圧力変化過程での蒸気、水の物性値の違いを介して、ブローダウンの差として現われる。観察実験では、2通りのRUN (RUN 2103, 2106) の比較を行っただけであり、その差は明確ではない。しかし、圧力が高いとテスト部内での冷却材の挙動が場所によらずより均質なものに近づく傾向があった。

### 発熱体電力

発熱体電力は、発熱体温度が温度上限値(400℃または600℃)になるまで一定に保った。本実験シリーズの範囲では電力は、比較的低いずれの場合でも、冷却材の補給がなくなった時に、温度上昇が始まった。従って電力の大小による発熱体温度上昇開始時刻に及ぼす影響は少なく、温度上昇開始以後の上昇早さが異なるだけであった。

### 発熱体本数

本シリーズでは、7本の発熱体を使用し、7本共に発熱させた場合と、中心発熱体のみを発熱させた場合の2通りの実験を行った。両者の見かけ上の流動パターンには殆んど差がないが、2次元的な流動要因で、単一発熱の場合には中心発熱体の冷却がやや悪い傾向がある。

保護筒の水

本実験シリーズでは、観察を容易にするために、テスト部周囲の保護筒内に水を入れる場合と、水を入れない場合の実験を行った。その結果、発熱体温度が上昇するまでのブローダウン過程では影響は殆んどなく、発熱体が完全に蒸気相に露出してしまう、ブローダウン終了後に、蒸気相への冷却効果が現われる程度である。

## 6 結 言

軽水炉冷却材喪失事故時のブローダウン中における炉心での冷却材挙動を、より詳細に調べる実験として、ブローダウン伝熱流動実験装置による実験を行ってきた。第1回の実験シリーズは、透明テスト部を用いることにより、冷却材の挙動を観察し、データとの対応をつけることを目的とした。本報告では、これらの実験結果を検討し、観察結果と対応させることにより、ブローダウン中の冷却材の挙動を定性的に把握することを試みた。その結果を次のようにまとめることができる。

- (1) 実炉における破断位置による違いを考慮して、放出形式を変えた実験では、その影響が、冷却材の流動状態の違いとなって現われた。その結果、減圧過程、温度上昇時刻、温度上昇開始位置が異なった。従って、実炉炉心の冷却材挙動についても、破断位置による炉心内の流動状態の違いが、被覆管温度が上昇し始める位置、時刻に影響を及ぼす可能性がある。
- (2) 実炉の破断口が上部プレナムに近い場合に対応する上部放出時には、気泡はテスト部上部を中心に発生し、減圧時には上向きのスラグ流となる。発熱体温度は蒸気により水が運び去られ、上部から順に発熱体が露出することにより上昇する。下部は水の中であってバルク沸騰領域で温度の上昇がない。従って、実炉の場合でも上向き流が維持されると冷却効果は、露出するまで続くと予想される。
- (3) 実炉で破断位置が下部プレナムに近い場合に相当する下部放出時には、テスト部下部を中心に気泡が発生し、テスト部全体がバルク沸騰となる。蒸気が水を支えきれなくなると、下向きの環状流がほぼ定常的に形成され、発熱体上の液膜が消滅すると、発熱体温度が上昇し始める。液膜が最初に消滅するのは、上部セクションから順で、セクション内ではスぺーサから遠い位置が最初である。従って、下向き流が維持されている場合には、液膜の存在が温度上昇時刻を支配する。
- (4) 同時放出では、テスト部全体に気泡が発生し、バルク沸騰をし蒸気と水が上下に分離するように、冷却材が一斉に下向きに流出する。発熱体表面上の液膜は、全域でほぼ同時に消滅し、ほぼ一斉に温度が上昇し始める。上部放出のような定常的な上向き流れや、下部放出のような定常的な下向き流れが存在しないことは、冷却材の補給が少ないことを示し、除熱効果が小さいことを示す。従って、実炉の場合にも、炉心内で流れを分断するような状態で上向き、または下向き流れがない場合に、被覆管温度が最も早く上昇する可能性が強い。

以上の結果から、冷却材喪失に伴うブローダウン中の炉心での流動状態は燃料棒被覆管の温度挙動に大きく影響することが予想され、DNB発生時刻を正確に予想するには、流動状態を含めた解析モデルの開発が必要である。特に、流れの状態の中に、スぺーサ、グリッドの影響、気液間のスリップ、2次元流れの効果を入れる必要性のあることが、今回の実験シリーズの結果からわかった。