

SWAT-1 放出系非予熱
条件下での熱過渡試験
—大リーグ・ナトリウム—水反応試験(第13報)—

1979年9月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

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

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

1 9 7 9 年 9 月

SWAT-1 放出系非予熱条件下での熱過渡試験

—大リーグ・ナトリウムー水反応試験（第13報）—

田辺 裕美 *
 高橋 憲二郎 *
 錦見 正和 *
 大後 美道 **
 佐藤 稔 *

要 旨

高速増殖炉の蒸気発生器内で大リーグ・ナトリウムー水反応事故が発生した場合、予熱されていない放出系配管で生じる可能性のある熱衝撃・配管閉塞の問題について、大リーグ・ナトリウムー水反応試験装置 SWAT-1 を用いて実証試験を行なった。

以下にその結果を示す。

- 1) 注水試験は4回実施し、「もんじゅ」 SGとSWAT-1反応容器との内径比換算で伝熱管破断数 DEG 以上の大注水率のもの2回、同 1 DEG 以下の小注水率のもの2回であった。
- 2) 放出系配管内での流動様相は、大注水率の場合、初期にナトリウム単相流に近い低ボイド率流が 0.2~0.3 秒続いてその後ボイド率 0.9 程度の高ボイド率流に変わる。これに対し低注水率の場合は、初期 1~2 秒にナトリウムの層状流が見られ、その後水素ガス単相流となる。
- 3) 大注水率の場合、極く初期を除けば熱流束の最大値は 1×10^6 [Kcal/m²·h]、熱伝達率の最大値は 3×10^4 [Kcal/m²·h·°c] である。小注水率の場合は更に小さい値となる。
- 4) 热応力による歪量は、大注水率の場合 800~1,500 μ Strain 程度で上記熱伝達率を用いた計算結果と良く一致する。
- 5) ナトリウム凍結によって配管閉塞の起こり得る可能性は SWAT-1 試験装置の体系ではほとんど考えられない。

* 大洗工学センター 蒸気発生器開発部 蒸気発生器安全性試験室

** 現在 高速増殖炉開発本部

SWAT-1 試験参加者

装置製作及び 注水試験担当	山田 敏男	(蒸気発生器安全性試験室)
	高橋 憲二郎	(")
	佐々木 和一	(")
	渡辺 智夫	(")
試験計画担当	田辺 裕美	(蒸気発生器安全性試験室)
	錦見 正和*	(")
	大後 美道	(")
	佐藤 稔	(")

* 現在 高速増殖炉開発本部

Sep., 1979

Thermal Transient Tests of Non-preheated Pressure
Relief Line of SWAT-1

— Large Leak Sodium-Water Reaction Test (No.13) —

Hiromi Tanabe*

Kenjiro Takahashi*

Masakazu Nishikimi*

Yoshimichi Daigo**

Minoru Sata*

Abstract

When a large leak sodium-water reaction accident occurs in a steam generator of LMFBR, pressure relief piping might be received thermal shock or blocked by frozen sodium, if it is not preheated. Then, the thermal transient tests were performed using the large leak sodium water reaction test rig SWAT-1.

The results are summarized as follows;

- 1) Four tests were executed. The water injection rate of two tests was equivalent to that of several DEG (double-ended guillotine) failure of heat transfer tubes considering the difference of evapourator inner diameters between 'Monju' and SWAT-1, and in other two tests the injection ratio was equivalent to less than that of 1 DEG.
- 2) Flow pattern in the pressure relief piping of two large injection rate tests was as follows, void fraction was as low as that of sodium single-phase flow in its early stage of 0.2 ~ 0.3 sec., and rapidly increased to about 0.9. In case of the small injection rate tests, the stratified flow had continued for 2 ~ 3 sec., it was followed by bydrogen gas single-phase flow.
- 3) In the large injection rate tests the maximum value of heat flux was about 1×10^6 [kcal/($m^2 \cdot h$)], and that of heat transfer coefficient was 3×10^4 [kcal/($m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$)] except in its very initial stage. In case of the small tests, they were lower.
- 4) In the large injection rate tests, stain of outer piping surface was about

* Steam Generator Safety Section, Steam Generator Devision, O-arai Engineering Center, PNC.

** Present Affiliation; Fast Breeder Reactor Development Project, PNC.

$800 \sim 1,500 \times 10^{-6}$, which agrees with the calculation using above value as heat transfer coefficient.

5) Possibility of blockage by frozen sodium is seemed to be very little in SWAT-1 test rig.

目 次

1. はじめに	1
2. 試験概要	2
2.1 試験の目的	2
2.2 測定項目	2
2.3 試験装置	2
2.4 計測系	3
2.5 試験条件	5
3. 試験結果	6
3.1 Run - 91	6
3.2 Run - 92	8
3.3 Run - 93	10
3.4 Run - 94	12
4. 試験結果の検討と解析	14
4.1 放出系配管内の流動様相	14
4.2 热伝達率の推定	16
4.3 热応力	19
4.4 ナトリウム凍結の可能性	20
5. おわりに	21
6. 参考文献	22
Appendix. 1. 歪ゲージ温度補償較正試験	173
Appendix. 2. 反応容器の圧力から放出系配管内流速を求める手法	177
Appendix. 3. 非定常熱伝達率計算コードINLAPの概要	179
Appendix. 4. 非定常熱伝導・熱衝撃力計算手法	186

図・表リスト

Fig. 2.3.1	SWAT-1 装置概要	23
Fig. 2.3.2	反応容器.....	25
Fig. 2.3.3	SWAT-1 放出系配管組立図.....	27
Fig. 2.3.4	収納容器.....	29
Fig. 2.4.1(a)	反応容器内計測センサ配置図 (Run - 9 1).....	30
Fig. 2.4.1(b)	反応容器内計測センサ配置図 (Run - 9 2).....	31
Fig. 2.4.1(c)	反応容器内計測センサ配置図 (Run - 9 3).....	32
Fig. 2.4.1(d)	反応容器内計測センサ配置図 (Run - 9 4).....	33
Fig. 2.4.2	T. C., 抵抗式ナトリウム・ボイド計取付詳細図	35
Fig. 3.1.1	Water Injection Valve Openning & Volume Flow Rate.....	41
Fig. 3.1.2	Water Heater Conditions.....	42
Fig. 3.1.3(a), (b)	Pressures in Water Injection Line.....	43
Fig. 3.1.4	Temperatures in Water Injection Line.....	45
Fig. 3.1.5(a)~(c)	Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line..	46
Fig. 3.1.6	Sodium Level in Reaction Vessel.....	49
Fig. 3.1.7	Velocity derived from Initial Pressure Rising.....	50
Fig. 3.1.8	Sodium Velocity derived from Sodium Detection Time....	51
Fig. 3.1.9	Void Fraction in Pressure Relief Piping.....	52
Fig. 3.1.10(a), (b)	The Results of Sodium Void Sensor.....	53
Fig. 3.1.11	Drag force in Pressure Relief Piping.....	55
Fig. 3.1.12(a)~(c)	Thrust Loads on Pressure Relief Piping.....	56
Fig. 3.1.13	Temperatures in Reaction Vessel.....	59
Fig. 3.1.14(a)~(d)	Temperatures in Pressure Relief Line.....	60
Fig. 3.1.15	Strains on Pressure Relief Piping.....	64
Fig. 3.1.16	Displacement of Pressure Relief Piping.....	65
Fig. 3.2.1	Water Heater Conditions and Water Injection Valve Openning.....	67
Fig. 3.2.2	Temperature and Pressure in Water Injection Line.....	68
Fig. 3.2.3(a)~(d)	Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line..	69
Fig. 3.2.4(a), (b)	Sodium Level in Reaction Vessel.....	73
Fig. 3.2.5	Pressure Spike Propagation Velocity in Pressure Relief Line.....	75
Fig. 3.2.6	Velocity derived from Sodium Void Sensors.....	76
Fig. 3.2.7	Void Fraction in Pressure Relief Line.....	77
Fig. 3.2.8(a)~(b)	The Results of Sodium Void Sensor.....	78

Fig. 3.2.9	Drag Force in Pressure Relief Line.....	80
Fig. 3.2.10(a)~(d)	Thrust Loads on Pressure Relief Piping.....	81
Fig. 3.2.11	Temperatures in Reaction Vessel.....	85
Fig. 3.2.12(a)~(h)	Temperatures in Pressure Relief Line.....	86
Fig. 3.2.13	Temperatures in R.T.....	94
Fig. 3.2.14	Strains on Pressure Relief Piping.....	95
Fig. 3.2.15	Displacement of Pressure Relief Piping.....	96
Fig. 3.3.1	Water Injection Valve Openning & Volume Flow Rate.....	97
Fig. 3.3.2	Water Heater Conditions.....	98
Fig. 3.3.3(a)~(b)	Pressure in Water Injection Line.....	99
Fig. 3.3.4	Temperatures in Water Injection Line.....	101
Fig. 3.3.5(a)~(b)	Peressure in Reaction Vessel and Pressure Relief Line.....	102
Fig. 3.3.6	Velocity derived from Initial Pressure Rising.....	104
Fig. 3.3.7	Sodium Level in Reaction Vessel.....	105
Fig. 3.3.8	Velocity derived from Sodium Void Signals and Temperatures.....	106
Fig. 3.3.9	Void Fraction in Pressure Relief Piping.....	107
Fig. 3.3.10(a)~(b)	The Results of Sodium Void Sensor.....	108
Fig. 3.3.11	Drag Force in Pressure Relief Line.....	110
Fig. 3.3.12(a)~(c)	Thrust Loads on Pressure Relief Piping.....	111
Fig. 3.3.13	Temperatures in Reaction Vessel.....	114
Fig. 3.3.14(a)~(d)	Temperatures in Pressure Relief Piping.....	115
Fig. 3.3.15	Temperatures in RT.....	119
Fig. 3.3.16(a)~(b)	Strains on Pressure Relief Piping.....	120
Fig. 3.3.17	Displacement of Pressure Relief Piping.....	122
Fig. 3.4.1	Water Injection Valve Openning & Volume Flow Rate....	123
Fig. 3.4.2	Water Heater Conditions.....	124
Fig. 3.4.3	Pressures in Water Injection Line.....	125
Fig. 3.4.4	Temperatures in Water Injection Line.....	126
Fig. 3.4.5(a)~(d)	Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line.	127
Fig. 3.4.6	Pressures Spike Propergation Velocity.....	131
Fig. 3.4.7	Sodium Level in Reaction Vessel.....	132
Fig. 3.4.8	Velocity Derived from the Sodium Void Signals.....	133
Fig. 3.4.9	Void Fraction in Pressure Relief Line.....	134
Fig. 3.4.10(a)~(b)	The Results of Sodium Void Sensor.....	135
Fig. 3.4.11	Drag Force in Pressure Relief Line.....	137

Fig. 3.4.12(a)~(d)	Thrust Load on Pressure Relief Piping.....	138
Fig. 3.4.13(a)~(b)	Temperatures in Reaction Vessel.....	142
Fig. 3.4.14(a)~(h)	Temperatures in Pressure Relief Line.....	144
Fig. 3.4.15(a)~(b)	Temperatures in RT.....	152
Fig. 3.4.16	Strains of Pressure Relief Piping.....	154
Fig. 3.4.17	Displacement of Pressure Relief Piping.....	155
Fig. 4.1.1	Velocity in Pressure Relief Line Estimated by Pressure Gages.....	157
Fig. 4.1.2	Velocity in the Pressure Relief Piping derived from Void Sensor.....	158
Fig. 4.2.1	Heat Transfer Coefficient and Heat flux Calculated by INLAP from T603, T606, and T607 in Run 91.....	159
Fig. 4.2.2	Heat Transfer Coefficient and Heat flux Calculated by INLAP from T612, T615 and T616 in Run 91.....	160
Fig. 4.2.3	Heat Transfer Coefficient and Heat flux Calculated by INLAP from T612, T615 and T616 in Run 92.....	161
Fig. 4.2.4	Heat Transfer Coefficient and Heat flux Calculated by INLAP from T603, T606 and T607 in Run 93.....	162
Fig. 4.2.5	Heat Transfer Coefficient and Heat flux Calculated by INLAP from T612, T615 and T616 in Run 93.....	163
Fig. 4.2.6	Heat Transfer Coefficient and Heat flux Calculated by INLAP from T603, T606 and T607 in Run 94.....	164
Fig. 4.2.7	Temperature Decrease along the Relief Line on Run 91..	165
Fig. 4.2.8	Temperature Decrease along the Relief Line on Run 92..	166
Fig. 4.2.9	Temperature Decrease along the Relief Line on Run 93..	167
Fig. 4.2.10	Temperature Decrease along the Relief Line on Run 94..	168
Fig. 4.3.1	Calculated Temperature Distribution in the Pipe Wall on Run 91.....	169
Fig. 4.3.2	Comparison between Test Results and Calculation on Strain of Pressure Relief Piping on Run 91.....	170
Fig. 4.3.3	Comparison between Test Results and Calculation on Strain of Pressure Relief Piping.....	171
Fig. A.1.1(a)~(b)	歪ゲージ温度とみかけの歪量との関係	175

Table. 2.4.1 計測器使用一覧表	37
Table. 2.4.2 計測フローチャート	38
Table. 2.5.1 試験条件及び主な結果	39
Table. 4.1.1 注水率による流動様相の違い	156
Table. 4.2.1 INLAP から求めた熱伝達率の値	156
Table. A.1.1 調正試験の結果	174
Table. A.2.1 計算に用いたデータ	178

1. はじめに

高速増殖炉の SG 内で大リーグ・ナトリウム-水反応事故が発生した場合の諸現象を解析して原型炉「もんじゅ」の安全設計に反映させるため、動燃団・大洗工学センターにおいて蒸気発生器安全性総合試験装置 SWAT-3, 大リーグ・ナトリウム-水反応試験装置 SWAT-1 を用いて数十回の試験が実施され、数多くの有用なデータが得られた。しかし、これらの実験はいずれも放出系は予熱された状態で実施されたものである。⁽¹⁾

今回「もんじゅ」製作準備設計実施に伴なう設計変更の結果、放出系は予熱しない方向での検討が進められており、実験的にもその安全性を検証するようにとの要請が設計側からなされた。従って、SWAT-1 試験装置を用いて放出系配管非予熱条件下での熱過渡試験が計画された。本熱過渡試験はシリーズとして 4 回の注水試験 (Run 91~Run 94) からなり、放出系配管内におけるナトリウム・水素ガスの流動様相、ナトリウムの凍結による配管閉塞の可能性、放出系配管に及ぼす熱衝等の問題について実験的検討を行なった。

熱衝撃・熱疲労の問題は、高速炉においては SG の放出系に限らず一次系・二次系のナトリウム配管等でも注目されるテーマであり動燃団でも各種の試験が実施されている。これらの試験目的の一つとして熱伝達率の最適式を決定する事があるものと思われるが、液体金属 2 相流の円管内流非定常熱伝達については適當な式が存在しないため定常熱伝達に関する式を便宜的に用いているのが現状である。我々の試験でも熱伝達率の決定は重要な試験目的の一つであり、配管内外壁の温度挙動からこれを求めて、従来の実験式との比較を行なった。

以下、2 章に試験の目的、装置・計測系の紹介、試験条件の説明を行ない、3 章、4 章で試験結果及びその検討を行なった。

2. 試験概要

2.1 試験の目的

本試験の目的は「もんじゅ」SGにおいて、放出系が非予熱条件下でも安全に作動する事の確認にある。具体的には次の3項目を掲げる事ができる。

- (1) ナトリウム／反応生成物が放出系配管内で凍結・閉塞を生じない事の確認
- (2) 放出系配管が熱衝撃・熱膨張によって損傷を受けない事の確認
- (3) その他、予想外の現象の発生の有無の確認

2.2 測定項目

本試験に係わる現象は液体金属2相流・熱伝達・材料力学等の複雑な現象であるため、今回のシリーズの試験ではとりあえず次の2項目に目標を絞った。

- (1) 放出系配管内流動様相の明確化

- a. ボイド率挙動・ボイド分布
- b. 流速分布
- c. 圧力挙動
- d. フロー・パターン

- (2) 熱伝達率の値の明確化

- e. 配管内・外壁での温度履歴
- f. 配管の歪・変化

なお、できるだけ単純化された体系で問題をとり扱うため、ベンド・フランジ部等での測定は行なわず直管部のみを測定対象とした。

2.3 試験装置

試験装置は側部放出系配管以外は従来からのSWAT-1装置を用いた。装置概要をFig. 2.3.1に示す。反応容器(Fig. 2.3.2参照)は400mm I.D.で約160kgのナトリウムが充填される。放出系配管は本試験で非予熱条件下の測定に使用する側部放出系配管と万一の安全保護用の頂部放出系配管とからなる。側部放出管はFig. 2.3.3に示すように、5B sch. 40で長さが7,850mmの水平管(勾配1.69/100)で材質はSUS304TPである。配管は3つの部分からなり熱膨張の影響を除きお互いの振動や反応容器・収納容器の揺れの影響は受けないようにそれぞれ伸縮継手で結ばれている。そのうち上流側2つが計測部として使われており、配管外表面は室温下に裸の状態で曝されている。最後の部分は頂部放出管の出口も兼ねており、二重管構造(外:8B, 内:5B)となって外側が予熱されている。

頂部放出管は従来のまま使用し、予熱されており、側部放出管で閉塞が生じた場合などに安

全系として作動するように 7 kg/cm^2 の設定圧のラプチャ板が設置されている。（側部放出系のラプチャ板は設定圧 3 kg/cm^2 ）

収納容器は Fig. 2.3.4 に示したが、耐熱衝撃構造でないため予熱が必要となる。

2.4 計測系

2.2 節で示した各項目を測定するため、反応容器・側部放出系配管・収納容器内にそれぞれ Fig. 2.4.1, Fig. 2.3.3, Fig. 2.3.4 で示すような計測器を設置した。但し、反応容器内の計測器は取付位置・個数とも各試験毎に異なるので、Run 91~94 をそれぞれ別々に Fig. 2.4.1(a)~(d) に示す。以下にこれら計測器仕様の概要を述べる。

(1) 圧力計

主として、ST 研究所製の標準型圧力計（フルスケール 15 K）を用いた。各センサとも、高温ナトリウムの付着による誤信号を防ぐために導圧管を介して取付け、導圧管内にはナトリウムを充填して予熱した。

{	反応容器内圧力	2 点	P 1109, P 1110
	側部放出系配管内	6 点	P 601~P 606
	収納容器	1 点	P 6101

このほか、注水配管内圧力・初期スパイク圧力測定にも各種圧力計を使用した。

(2) 接触式ナトリウム検知器 4 点 L 601~L 604

放出系配管内に 4 点設置した。検知器はスパーク・プラグ型で、ラプチャ板破裂と同時に飛んで来るナトリウムで接点が短絡する事によって信号を出すものである。設置された検知器間の検知時間差から、ナトリウム先端部の流速を求める事ができる。

(3) 抵抗式ナトリウムボイド計

{	反応容器内	5 ~ 10 点	V 1101~V 1110
	放出系配管内	20 点	V 601 ~ V 620

いわゆる Chen 型ボイド計で、先端部がナトリウム中にあるかガス中にあるかで生ずる電気抵抗の変化を検出するものである。放出系配管中には Fig. 2.4.2 に示すように、1 断面 5 点ずつ、計 20 点設置して各断面でのボイド率分布を求めたり、断面間の検知信号の時間遅れから流束分布を求めるものである。

V 601 ~ V 605	A 断面
V 606 ~ V 610	C 断面
V 611 ~ V 615	D 断面
V 616 ~ V 620	F 断面

なお、取付詳細図を Fig. 2.4.2 に示す。

(4) γ 線ボイド率計 1点 G 601

γ 線のナトリウムと水素ガスに対する透過率の差からボイド率を求めるもので、径方向の一次元平均的なボイド率が得られる。従ってフローパターンによっては補正が必要となる。本試験では配管真上に線源を置いた。

(5) 湧電流型ボイド率計

放出系配管内に更に 20 $\text{mm} \phi$ のパイプを入れ、そのパイプ内を通過するナトリウムを湧電流の原理で検知するものである。但し、出力電圧とボイド率の関係は不明確であり、定性的な傾向を見るために用いる。

(6) ドラッグ式流量計 2点 F 601, F 602

配管の中心線上に置かれた物体が流れに抗して受ける力は次のように表わす事ができる。

$$F = C_D \frac{\rho}{2g} v^2 A$$

但し, ρ : 流体密度 (kg/m^3)

v : 平均流速 (m/s)

A : 物体の流れ方向への投影面積 (m^2)

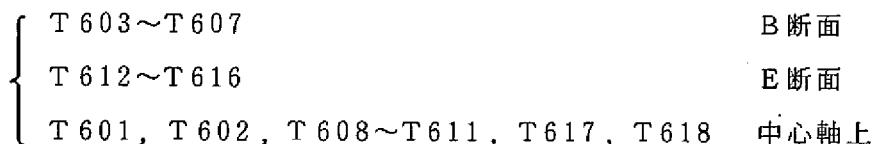
であり、また抗力係数 C_D は円板については相当広い範囲の Re 数に対して $C_D=1.0$ である。

(7) ロードセル 14点 R 601～R 612

圧縮型荷重変換器を用いて配管支持点に水平方向に作用する力を測定するためのもので、荷重計は共和電業(株)製の LC-5 TE, -10 TE を用いた。なお、同一場所・同一方向の荷重を分けて測っている R 604A, R 604B 及び R 605A, R 605B の 4 点については LC-5 TE (フルスケール 5 ton) を用い、他の 10 点は LC-10 TE (フルスケール 10 ton) を用いた。

(8) 熱電対 18点 T 601～T 618

配管内各所及び配管内・外壁の温度を求めるため計 18 個の T.C.を設置した。T.C.は非接地・シース型 1.0ϕ の物を用い、取付詳細図を Fig. 2.4.2 に示した。



(9) 歪ゲージ 8点 S 601～S 608

配管内・外壁の温度差によって生じる熱応力を求めるために、配管外壁上に 8 点歪ゲージを貼った。但し本試験のような熱衝撃試験ではゲージ面の温度変動が著しく、温度に対する高い安定性が要求される。このため S 601～S 604 の 4 枚については AILTECH 社製の歪ゲージ SG425 の温度補償効果を上げたものを使用し、S 605～S 608 の 4 枚については、ST

研株製のπ型ゲージを使用した。SG 425の温度補償較正試験についてはAppendix 1に記した。

(10) 変位計 2点 A 601, A 602

熱膨張等による配管の変位を測定するために、無接触式渦電流型変位計を用いた。熱膨張による伸びが10mm程度と予想されたため、「てこ」で1/4に縮小させて計測した。

(11) 破裂検知器 1点 R-1D

側部放出系ラプチャ板の破裂時刻を検知するために、ラプチャ板の下流側に、銅線を置いてラプチャ板破裂時に銅線が切れるようにした。

これらの計測器の仕様その他を表2.4.1にまとめた。またこれらの計測器を用いて2.2節の各項目を求めるフローチャートをFig. 2.4.2に示した。

2.5 試験条件

試験はRun 91~94の4回実施された。各試験の条件を表2.5.1に示す。

Run 91及び93はそれぞれ7mm ϕ 及び5mm ϕ の注水オリフィスを用いて大リーク・ナトリウム-水反応時における放出系の熱衝撃の問題を重点的に調べた。これに対し、Run 92及び94はそれぞれ1.5mm ϕ 及び2.5mm ϕ の注水ノズルを用いて中リーク時の放出系配管内のナトリウム凍結の問題を重視して計測を行なった。

水加熱器の条件はいずれも圧力129kg/cm²、温度330°Cの飽和水条件で実施した。ナトリウム温度は大リークのRun 91, 93ではEV下部の条件に近い320°Cを用い、中リークのRun 92, 94では、EV上部の条件に近い410°Cを用いた。^{*)}また側部放出管は室温20°C~35°C、頂部放出管及び収納容器温度はナトリウム温度よりやや低い200~300°Cを選んだ。

*) Run 92, 94は中リーク・ウェステージ試験を兼ねたためこのような温度条件となった。

3. 試験結果

放出系非予熱条件下での熱過渡試験は4回実施された。各試験の主な結果を表2.5.1にまとめた。以下に各試験について結果を概説する。

3.1 Run-91

(1) 注水系

Run 91 試験は $7 \text{ mm} \phi$ の注水オリフィスを用いたため平均注水率は 1.71 kg/sec と大きく、 3.56 sec の弁開時間の間に約 6 kg の注水が行なわれた。この注水率は「もんじゅ」SGとSWAT-1 反応容器との内径比から「もんじゅ」SGの伝熱管 6 DEG (両端ギロチン破断)に相当するものと考えられる。注水弁 WV-26D 及びタービン流量計 F5001 の挙動を Fig. 3.1.1 に、水加熱器の残水量、圧力、温度を Fig. 3.1.2 に示す。また、注水ラインの圧力及び温度を Fig. 3.1.3 及び Fig. 3.1.4 にそれぞれ示す。

(2) 圧力

Fig. 3.1.5 (a)～(c)に反応容器内の圧力 P1109, P1110, 側部放出系配管内の圧力 P601～P606 及び収納容器 RT の圧力 P6101 の結果を示す。各センサで見られる 9 Hz の振動はデータレコーダの不調によるノイズである。P1110 の圧力波形からも判るように、本試験では注水率が大きかったため側部放出管だけでは圧力を解放できず頂部放出管のラプチャ板も破裂した。Fig. 3.1.6 に反応容器の液面変化の様子を電磁誘導型連続式液面計から求めたものを示す。

反応容器・放出系の圧力信号の最初の立上がりの軸方向遅れから、圧力ピークの移動速度を求めたのが Fig. 3.1.7 で、 21 m/sec の値が得られた。

(3) ナトリウム先端部の移動部の移動速度

放出系配管内に設置された接触式ナトリウム検知器・抵抗式ナトリウム・ボイド計及び熱電対の最初立上がりの時間遅れからナトリウム先端部の流速を求めたのが Fig. 3.1.8 である。この図から流速値として 22 m/sec が得られる。

(4) ボイド率

本試験では γ 線ボイド率計は計測に失敗したが、渦電流式ボイド率計 2 点の結果は得られており Fig. 3.1.9 に示した。縦軸の値とボイド率との定量的な関係は不明であるが、過去の他試験での経験から $0.44 \sim 0.52 \text{ sec}$ でのピーク値がおよそボイド率 $\alpha = 0$ を示すものと思われる。

また、抵抗ナトリウム・ボイド計の出力信号を Fig. 3.1.10 に示した。各信号で上側がガス、下側がナトリウムを表わす。初期にナトリウム・スラグの通過と思われるような領域が 0.1 秒程認められる。

(5) 流 体 力

配管の中心線上に設置された流量計 F601, F602 のドラッグ・ディスクの受ける力を Fig. 3.1.11 に示した。出力波形は Fig. 3.1.9 に良く似ている事が判る。高周波成分を除くとそれぞれ 7 kg_f , 5 kg_f の流体力を受けているが、これは流束に換算すると 30 m/sec 及び 25 m/sec となる。但し換算の際の仮定としてボイド率 $\alpha = 0$ とした。

配管を支持している 14 点のロード・セルの出力をまとめたのが Fig. 3.1.12(a)～(c) である。最初のナトリウム・スラグの流れに対応して強い反力を受けており、特に流れに対して正面に荷重を受ける R602 及び R606 で最大 1 ton 近い値が得られている。これは Na 流速に換算すると約 30 m/sec に当たる。

(6) 温 度 挙 動

反応容器及び側部放出系配管に設置された計 20 点の熱電対の出力を Fig. 3.1.13 及び Fig. 3.1.14 にそれぞれ示した。反応容器内では $1,000^\circ\text{C}$ 近い温度も計測されている。注水停止後に高い温度が観察されている (T601)。また T611～T614 の初期温度が高いのは圧力計予熱用ヒータの温度が伝わったものと思われる。他の熱電対の示す初期温度は図から読み取ると $10 \sim 15^\circ\text{C}$ であるが、実際に試験前に測ったところでは、 30°C であった。以下の各試験でも同様に温度補償は行なっていないので、配管初期温度は Table 2.5.1 中の値を用いる必要がある。Fig. 3.1.14 の(b)及び(d)はそれぞれ同一断面での温度挙動である。

(7) 配管上の歪、変位

Fig. 3.1.15 に配管外壁上の歪 S601～S608 の測定結果を示した。最初のナトリウム通過後約 1.8 秒後にピークが発生しており、その値は $900 \mu \sim 1,300 \mu\epsilon$ である。S601～S604について、温度補償効果を上げており (Appendix.1)，常温～ 100°C までは温度の影響は無視できる。T607 の信号から見て約 3.6 秒頃まではこの保障範囲とみなせる。

Fig. 3.1.16 に配管の変化量 A601, A602 を示した。初期に流体力によって移動しており、5 秒以後の正方向の変位は熱膨張によるものと思われる。

試験後放出系配管全面に液体浸透検査を実施したが、全く健全であった。

3.2 Run - 92

(1) 注水系

本試験は $1.5\text{mm}\phi$ のノズルから平均注水率 0.058kg/sec で 48 秒間注水を行なった。総注水量は 2.8kg であった。注水系の圧力・温度等計測結果を Fig. 3.2.1 及び Fig. 3.2.2 に示す。

(2) 圧力

Fig. 3.2.3 (a)～(d)に反応容器内の圧力 P_{1109} , P_{1110} , 側部放出系配管内の圧力 P_{601} ～ P_{606} , 及び収納容器の圧力 P_{6101} の結果を示す。 P_{601} , P_{603} , P_{604} は測定ミスで出力がなかった。注水率が小さいため, 圧力挙動も穏やかで, 反応容器・収納容器間にもほとんど圧力差は見られない。Fig. 3.2.4 に反応容器内のナトリウム液面挙動を示したが, 圧力開放板破裂前に反応による発生水素ガスと上部のナトリウムとが置換されており, 従って放出されたナトリウム量も 34kg に止まっている。放出系配管内の圧力の立上がり時刻の遅れから圧力伝播速度を求めたのが Fig. 3.2.5 で $u = 522\text{m/sec}$ となった。

(3) ナトリウムの先端の移動速度

今回の試験は注水率が小さかったため, Run-91 等で見られた放出系配管内での初期のナトリウム・スラグの流れがはっきりしないが, 接触式ナトリウム検知器, 抵抗式ナトリウムボイド計, 熱電対の信号の立上がり時刻の管軸方向遅れを Fig. 3.2.6 にプロットした。この結果, ラプチャ板破裂直後のナトリウムの流速は 23m/sec となった。

(4) ボイド率

Fig. 3.2.7 に γ 線ボイド率計及び渦電流式ボイド率計の計測結果を示した。 $t = 3 \sim 5$ 秒にボイド率 $\alpha = 0.85$ 程度まで下がりその後やや上昇して再び 10 秒後は $\alpha = 0.87$ で一定となっている。これは注水率が小さいため, 一旦反応容器から流れ込んだナトリウムが吹飛ばされずに 10 秒後はこの地点に滞留したものと思われる。

Fig. 3.2.8 に抵抗式ナトリウム・ボイド計 V601～V620 の測定結果を示す。これからも初期のナトリウム・スラグの流れは存在しない事が判る。

(5) 流体力

流体力を表わすドラッグ式流量計やロードセルも低い注水率を反映して測定出力が小さかった。Fig. 3.2.9 がドラッグ式流量計の結果で上流の F601 で 1.8kgf , 下流ではほとんど出力がなかった。これはナトリウムの流れが上流配管で止まってしまった事を表わす。

Fig. 3.2.10 (a)～(d) がロードセル R601～R612 の結果で流体力としては, R602 で 0.2ton の圧縮力, R609 で 0ton の引張り力が見られる。また 0.2ton ほどの熱膨張による荷重が各点で観察される。

(6) 温度挙動

反応容器・放出系配管及び収納容器に設置された熱電対の出力をそれぞれ Fig. 3.2.11, Fig. 3.2.12 (a)～(h) 及び Fig. 3.1.13 に示した。配管下流部では 100°C を割っている。

(7) 配管の歪・変位

Fig. 3.2.14 に配管外壁上の歪 S601～S608 の測定結果を示した。上流側 (S601～S603, S605) では高温流体通過後約 2 秒ほどで最大 $700 \mu\epsilon$ のピーク値に到達している。これに対し下流側 (S604, S606～S608) では、最大 $200 \mu\epsilon$ 程度で、下流配管まではほとんどナトリウムが届かず配管温度もあまり上がらなかった事に対応している。

Fig. 3.2.15 に配管の東西方向の変位を示した。この図から熱膨張による伸びは 0.5～0.6 mm 程度である。

3.3 Run-93

(1) 注水系

Run-91 では注水率が大き過ぎたため頂部放出系ラプチャ板も破裂した。そのため Run-93 は 5 mmφ のオリフィスを用い、注水率を下げる試験した。平均注水率は 1.03 kg/sec で「もんじゅ」SG の 3 DEG 相当する。注水時間は 5.04 sec で 5.17 kg を注水した。タービン・フローメータ F 5001 の出力及びその他水系の圧力・温度等データを Fig. 3.3.1～Fig. 3.3.4 に示す。

(2) 圧力挙動

Fig. 3.3.5 に反応容器内圧力 P1110, 側部放出管内圧力 P601, P603, P604, P606 及び収納容器内圧力 P6101 の結果を示した。P1110 の圧力は頂部ラプチャ板の設定圧 7 kg/cm² + 1.5 kg/cm² (カバーガス圧) をわずかに越えているが今回は頂部ラプチャは破裂しなかった。各圧力信号の立上がり時間の遅れを軸方向距離に対してプロットしたものが Fig. 3.3.6 で、この図から圧力ピークの移行速度として 20 m/sec の値が得られる。Fig. 3.3.7 に反応容器内の液面挙動を示す。

(3) ナトリウム先端部の移動速度

ラプチャ板破裂と同時に放出系配管内に流入するナトリウム・スラグの流速を求めるために接触式ナトリウム検知器が設置されていたが、本試験では計測に失敗した。このため抵抗式ナトリウム・ポイド計、熱電対その他の信号の立上がり時刻の遅れから移動速度を推定したのが Fig. 3.3.8 であり、この図から $u = 18 \text{ m/sec}$ の値が得られた。

(4) ポイド率

γ 線ポイド率計及び渦電流式ポイド率計の測定結果を Fig. 3.3.9 に示す。 $t = 0.5 \sim 0.7 \text{ sec}$ の領域では $\alpha = 0$ 即ちほとんどナトリウムだけの流れと見られる。

また抵抗式ナトリウム・ポイド計の出力を Fig. 3.3.10 に示す。この信号からも初期 0.6 秒前後のナトリウム・スラグと、4～6 秒の間歇的なナトリウムの流れが判る。

(5) 流体力

配管の中心線上に置かれたドラッグ・ディスクの受ける力を Fig. 3.3.11 に示す。流体力として最大 5 kgf 程度が得られたがこれはポイド率 $\alpha = 0$ と仮定すれば Na の流速は約 25 m/sec に相当する。

配管を支持している 14 点のロードセル R601～R612 のデータを Fig. 3.3.12 (a)～(c) に示す。流体力としては、1 秒前後に R602, R607 でそれぞれ 0.6 ton, 0.7 ton が得られている。これは流速に換算して 27 m/sec 程度である。また熱膨張力としては同じ R602, R607 で 0.6 ton, 0.8 ton である。

(6) 温度挙動

反応容器・側部放出系配管及び収納容器内に設置された熱電対の出力をそれぞれ Fig. 3.3.

13, Fig. 3.3.14 (a)~(d) 及び Fig. 3.3.15 に示す。放出管内の同一断面上の T.C. (T603 ~ T605 及び T612 ~ T614) の測定値によると同一断面内での温度分布はほとんどない。

(7) 配管上の歪・変位

Fig. 3.3.16 (a)~(b) に配管外壁上の歪 S601~S608 の測定結果を示した。S601~S604 ではナトリウム・スラグ通過後約 1.8 sec 後にピークに到達している。各ピーク値にはバラツキがあり、その範囲は 1,000~1,500 $\mu\epsilon$ であった。S605~S608 では 5~6 sec にピークが発生し、ピーク値の範囲も 800~2,000 $\mu\epsilon$ と更にバラツキが大きい。S605~S608 の測定結果は Run-91 の結果や後で述べる計算値の傾向とも異なる。これはケーブルの絶縁状態の不良等の影響と思われ、むしろ S601~S604 の結果が真実に近いものと思われる。

Fig. 3.3.17 に配管の変位量を示す。但し A602 は計測できなかった。A601 も Run-91 に比べると変化量が小さいが、原因は不明である。

3.4 Run - 94

(1) 注水系

本試験は $2.5\text{mm}\phi$ のノズルから平均注水率 0.120kg/sec で55.2秒間注水を行なった。総注水量は 7.10kg であった。タービン・フロー・メータ F5001 の出力を Fig. 3.4.1 に示すが、 $0.277\ell/\text{sec}$ 以下の流量は本流量計の仕様範囲外であるため厳密には正確とは言えない。また注水系の圧力・温度を Fig. 3.4.2～3.4.4 に示す。

(2) 圧力挙動

Fig. 3.4.5 (a), (b) に EV 内の圧力計 P1109, P1110, 側部放出系配管内の圧力計 P601～P606 及び収納容器の圧力計 P6101 の測定結果を示した。注水率が小さかったため圧力挙動も穏やかで配管内の圧力勾配もほとんど見られない。このため放出ナトリウム量も 31kg と少量であった。

放出管内圧力の初期の立ち上がりの軸方向遅れから圧力の伝播速度を求めたのが Fig. 3.4.6 でラプチャ板の 2m 下流付近で $u=230\text{m/sec}$ であった。Fig. 3.4.7 に反応容器内の液面挙動を示す。

(3) ナトリウム先端部の移動速度

ラプチャ板破裂と同時に流出するナトリウムの流速を求めるために、接触式ナトリウム検地器 L601～L604, 抵抗式ナトリウム・ボイド計 V601～V620 の信号の立上がり時刻の軸方向遅れをプロットしたのが Fig. 3.4.8 である。ラプチャ板下流 2 m 付近での流速は 16m 程度であるが、下流に行くに従って流速は落ちている。

(4) ボイド率

γ 線ボイド率計 G601 及び渦電流式ボイド率計の測定結果を Fig. 3.4.9 に示す。本試験では全般的にボイド率が高く $t=5\text{ sec}$ までの最低値は $\alpha=0.7$ であった。

抵抗式ナトリウム・ボイド計の測定結果を Fig. 3.4.10 に示す。V603, V608 だけは他と異なりナトリウムだけを感知している。この事からも配管上流部では層状の流れであった事が推定される。また 5 秒以後は流れ込んで来たナトリウムが底部に滞留したものと思われる。

(5) 流体力

ドラッグ式流量計 F601, F602 の測定結果を Fig. 3.4.11 に示す。F601 と異なり F602 では 1 回しかピークが現れていない。F601 の最初のピークと F602 のピークの立上がりの時間差 (7.7m sec) からこのピークを生じさせた流体の流速は 310m/sec となる。この流体は流速から見て、カバーガス／水素ガスと思われる。また、F601 の第 2 のピークはナトリウムによるものと思われるが F602 までは到来していないようである。

配管反力の測定結果を Fig. 3.4.12 (a)～(d) に示す。流体力としては R602, R603, R606, R607 に $0.15\sim0.19\text{ton}$ 程度の荷重が初期に認められる。R601, R604A などに数秒後に上昇する荷重は熱膨張力によるものと思われる。

(6) 温度挙動

反応容器、側部放出系配管及び収納容器内の熱電対の出力を Fig. 3.4.13(a), (b), Fig. 3.4.14(a)~(h), Fig. 3.4.15(a), (b)にそれぞれ示す。なお、T616はセンサ故障と思われる。

(7) 配管上の歪・変位

Fig. 3.4.16 に配管上の歪ゲージ S601~S608 の測定結果を示す。同図より上流側(S601~S603, S605)の方が下流側(S604, S606~S608)に比べて明らかに大きな歪が発生していることが判る。即ち、上流側 = 860~1,440 $\mu\epsilon$ 、下流側 = 300~800 $\mu\epsilon$ である。これは、下流側までナトリウムが流れて来ず、下流側配管の温度が上がらなかつた事によると考えられる。

Fig. 3.4.17 は熱膨張によると思われる配管の変位を示したもので、2~4 秒に軸方向に 0.3 mm 程の伸びがわずかに見られる。

4. 試験結果の検討と解析

4.1 放出系配置管内の流動様相

(1) 注水率の影響

放出系配管内の流動様相は注水率の大きさによって明らかに異なる。即ち、注水率の大きいRun-91, Run-93ではラプチャ板破裂直後に大きなナトリウム・スラグの流れが存在するが、注水率の小さなRun-92, 94では高ボイド率のままボイド率に大きな変動が見られない。これはラプチャ板破裂までに反応容器内で発生水素ガスと注水点上部のナトリウムとが置換される時間的余裕があるかどうかによるものと思われる。またSWAT-1装置反応容器は放出系配管の取付位置が原型炉SG等と比較して相対的に低くナトリウム液面に近いため、大注水率の場合のナトリウム・スラグの流れが現われ易い構造となっている。

(2) 大注水率

注水率が伝熱管数本破断に相当する大きな場合は、流動様相は初期と中期以後とに明白に区別される。Fig. 3.3.9にRun-93の γ 線ボイド率計の結果を示したように、初期はほとんどボイド率 $\alpha = 0$ に近いナトリウム・スラグの流れが0.2~0.3秒続く。その後、流れは急速にボイド化して $\alpha = 0.9$ 程度の流れが注水停止まで続く。このフローパターンの急変は反応水素ガスが上昇して、放出系配管入口付近に達する事によって生ずるものと思われる。

これら初期及び中期以後の流動様相を更に詳細に検討するためにRun-93を例にとる。初期のナトリウム・スラグの流れは3.3節から18m/secである。このナトリウム単相流の持続時間を0.25秒とすると初期における放出ナトリウム量は50kgとなる。最終的な総放出量が123kgであるから、その差73kgは中期以後の流れの過程で放出されたものと考えられる。従ってこれを持続時間4.8秒で割って、中期以後の平均ナトリウム流速は $u \approx 13\text{m/sec}$ 程度となる。

中期以後の流れの速さを更に2通りの方法で求めた。即ち一つは、反応容器内の圧力計P1110の圧力勾配から発生水素ガス分を差引いて求めたもので解法はAppendix 2に示した。またその結果をFig. 4.1.1に示す。ナトリウム・スラグが流れ去った直後に反応容器内の高い圧力を解放するため70m/sec程度の大きな値が得られているが、その後はだいたい30m/sec前後の値である。また別の見積り方法としてはFig. 2.4.2に取付け図として示した抵抗式ナトリウム・ボイド計の信号から求める方法がある。軸方向に200mm離れて置かれたボイド計のそれぞれ周方向位置が対応するものの信号の時間遅れから流速を見積るもので、たとえばFig. 3.3.10に示したV601-V606, V604-V609, V613-V618等の信号の遅れを距離で割って求めるものである。この結果をFig. 4.1.2(a), (b)に示した。1.5秒頃までは初期ナトリウム・スラグの流速に近い20m/sec程度の流速であるが、その後次第に低下し10m/sec以下までなることが判る。

次にこれらの流速が何を意味するかと言う事であるがFig. 4.1.1の結果は明らかに水素ガ

スの流速である。これに対し、Fig. 4.1.2 (a), (b) の結果はガスの値か、ナトリウムの値か判定は微妙なところであるが、中期以後の領域では全体としてガスが主流体 ($\alpha \approx 0.9$) であるので、時々飛来するナトリウムを検知していると考えるのが妥当である。実際この値 (10m/sec 弱) は先に述べた水素ガス流速 (30m/sec 前後) よりナトリウム流速 (13m/sec) に近い数字を示している。

(3) 注水率の小さい場合の流動様相

注水率が伝熱管 1 本破断相当以下の小さい場合には、ラプチャ板が破裂する頃には水素ガスが放出系配管入口付近まで上昇して来ており、この結果前項で見られたような放出管内の初期のナトリウム・スラグは存在しない。その代わりある程度のナトリウムが反応容器から放出されると、その後は水素ガスだけがナトリウムを伴なわず配管内を流出するような状態が現われる。この時間は Run-92, 94 でラプチャ板破裂後 1~2 秒頃であり、その後は注水停止まで水素ガス単相流が続く。初期の流れは Run-94 の抵抗式ナトリウム・ボイド計出力 Fig. 3.4.10(a), (b) から見るとむしろ層状流・波状流に近い様子であると推定される。そして初期に放出されたナトリウムは最終的に収納容器まで到達することはほとんどなく、配管下部に滞留している様子が解体時の検査でも見られた。

(4) まとめ

以上の結果を表 4.1.1 にまとめた。注水率の大きい場合も小さい場合も同様に時間的な 2 領域に大別して流動様相を把えた。

注水率の大きい場合には、ラプチャ板破裂と同時に放出系配管入口付近にあったナトリウムがほとんど単相で流出する。これを領域 I とした。次に上昇して来た水素ガスが配管内に流れ出すと急速にボイド化して環状流に近い流れになりそのまま注水停止まで続く、これが領域 II である。

注水率の小さい場合には、ラプチャ板破裂時には既に水素ガスが放出系入口付近まで到達しており、破裂と同時に水素ガス／ナトリウムが配管内を流れるが流れの様相は層状流的であり収納容器に到達しないうちに停滞してしまう。その後は、水素ガスのみが配管内を流出して注水停止に至る。

4.2 热伝達率の推定

(1) 配管径方向温度分布からの推定

2.4節で説明したように配管の2断面について熱電対を5点ずつ設置し、温度の径方向分布を測定したが、これらの温度分布から熱伝達率を求めた。計算手法として数値的逆ラプラス変換を用いた計算コードINLAPを作成した。INLAPの概要はAppendix.3.に紹介したFig.4.2.1～Fig.4.2.6にRun-91～Run-94の計算結果を示す。大注水率のRun-91及びRun-93の場合、傾向としては良く似ており、初期1～2秒に 10^4 [Kcal/m²·h·°C]を越える値であり、その後 5×10^3 [Kcal/m²·h·°C]程度の値となっている。なお、本試験で使用した熱電対は非接地シース型1.0φのもので、応答時間は63.2%応答で0.076sec, 90%応答で0.162secとされている。⁽²⁾従って初期の温度の立上がり部分の値には信憑性はないと考えて良い。

Fig.4.2.3はRun-92の下流側(T612, T615及びT616)について求めたものであるが10秒以後は配管内中心温度T612と配管内外壁温度T615, T616との温度差がほとんどなく読み取り不可能となっている。Fig.4.2.6は同じ小注水率のRun-94の上流側(T603, T606及びT607)の計算結果であるが、この場合は3つの熱電対の温度差も比較的大きく10秒以後で $10^3 \sim 2 \times 10^3$ [Kcal/m²·h·°C]程度の値となっている。

(2) 配管軸方向温度降下についての考察

Fig.4.2.7～Fig.4.2.10に各試験における流体の軸方向の温度降下の様子を示した。○印は熱電対の最初の立上がり後での温度をプロットしたもので流体の先端の温度を測っていると思われる。また、●印は途中の時刻における流体の温度を示している。即ち、t=2sec(Run-91), t=40sec(Run-92, Run-94), t=4sec(Run-93)である。

大注水率のRun-91, Run-93の場合、ナトリウム・スラグの温度降下は配管部6mの間にそれぞれ90°C及び60°Cである。この温度降下に

$$\frac{T(x) - T_{wo}}{T(0) - T_{wo}} = \exp\left(-\frac{4\alpha x}{PC_p D u}\right) \quad (4 \cdot 2 \cdot 1)$$

を適用する。ただし、

T_{wo} ：初期管壁温度

α ：熱伝達率

x ：軸方向距離 6[m]

ρ ：密度

C_p ：比熱

D ：配管径 0.1266[m]

u ：流速 $\begin{cases} 22 [m] : \text{Run-91} \\ 20 [m] : \text{Run-93} \end{cases}$

この結果、ナトリウム・スラグ先端部に対応する熱伝達率は

$$4.0 \times 10^4 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}} \right] \quad (\text{Run-91})$$

$$\text{及び} \quad 2.0 \times 10^4 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}} \right] \quad (\text{Run-93})$$

となる。

次に●印で示した途中時刻での温度降下に対して次のようにして熱流束 q を求める。即ち

$$q = \frac{\rho C p D (1-\alpha) u}{4} \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (4 \cdot 2 \cdot 2)$$

で、温度勾配 $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ を Run-91 及び Run-93 に対して、それぞれ $36.3 [{}^\circ\text{C}/\text{m}]$ 及び $40 [{}^\circ\text{C}/\text{m}]$ と読むと熱流束 q は、Run-91, Run-93 共に $1.23 \times 10^6 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right]$ となり、前節で INLAP により求めた熱流束の値と比べ、やや高めではあるが大きな差はない事が判る。

次に、小注水率の Run-92 及び Run-94 について同様の考察を行なう。Fig. 4.2.8, Fig. 4.2.10 共に大幅な温度降下が見られ、特に Run-92 の場合はナトリウム凝固点温度付近にまで下がっている。また初期と 40 秒のデータとでも目立った差が見られない。

Run-92 については 10 秒以後、INLAP による計算結果が得られていないので (4.2.1) 式を用いて熱伝達率を求めた。Run-92 の場合、10~50 秒では温度もほぼ一定で定常状態に近いと考えられ (4.2.1) を用いるには好都合である。4.1 節での検討から、この領域では即に水素ガスのみが流れていると考えられる。従って密度・比熱等水素ガスの物性値を用いて (4.2.1) 式を計算すると、 $\alpha = 17 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}} \right]$ が得られる。この値は通常の乱流熱伝達の式

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (4 \cdot 2 \cdot 3)$$

で水素ガスの物性値を用いて求めた値 $\alpha = 14$ と近い。この事からも前節で述べた「流体はほぼ水素ガスだけである」と言う推定は妥当であると考えられる。

Run-94 についても温度降下から (4.2.1) 式に水素ガスの物性値を用いて逆算すると

$$\alpha = 30 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}} \right]$$

となり (4.2.3) から求めた $\alpha = 23$ と近い。しかし、前項で INLAP により求めた値 ($\alpha \approx 10^3$) と比べると相当低い。これは、Fig. 4.2.6 のデータとして用いた熱電対 T603~T607 が上流側であるため、反応容器の圧力解放板の破裂と同じに飛来したナトリウムがこの付近に滞留した事によるものと思われる。従ってここで求めた $\alpha = 30$ 程度の値の方が真実に近いと考えられる。

(3) ま と め

以上の結果を Table 4.2.1 にまとめた。

これらの結果と、一般に液体金属の円管内乱流熱伝達の式として知られている Seban-Shimazaki の式との比較を行った。ナトリウム温度は 320 [°C]、流速は 18 [m/sec] としたところ Fig. 4.2.1 にも示したように $h = 5.7 \times 10^4 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$ と実験値よりかなり大きい値となった。これは Run-93 での比較に関しても同様であった。

この結果の説明として、一つにはボイド率の問題が考えられる。前節で示したように、ナトリウム単相流は初期の 0.2 秒間程でありこれは熱電対の応答時間と同程度である。従って $h \approx 3 \times 10^4$ を示している領域は、即にナトリウム単相流ではなく、このことが熱伝達率の違いとなって現われているとも考えられる。また、一つには放出系配管内壁面がナトリウム放出中に‘漏れていらない’状態であったのではないかと言う事も考えられる。

いずれにせよ本試験に関しては、Seban-Shimazaki の式は安全側の結果を与えていていると言えう事ができる。

4.3 熱 応 力

管壁内部に温度勾配が生じる事によって熱応力が発生する。この熱応力の値は配管外壁に貼られた歪ゲージの出力から求める事ができる。本節では試験から得られた歪量と計算によって求めた歪量との比較を行なった。

計算は熱伝達率を入力として管壁内部の温度分布、熱応力、歪量などを求めるもので、詳細は Appendix 4 に示した。試験結果と計算との比較は熱衝撃の厳しいと考えられる大注水率の Run-91 試験及び Run-93 試験に対して実施した。主な入力値として、ナトリウム入口温度は T601 の実験値、熱伝達率は Fig. 4.2.1 及び Fig. 4.2.4 をそれぞれ用いた。

Run-91 試験に対応する計算結果として、側部放出系配管壁内の温度分布を、ナトリウムが飛来してからの時間をパラメータとして Fig. 4.3.1 に示す。内壁からの温度上昇は約 1 秒で外壁に到達する事が判る。次に説明するように、外壁面での歪量にピークが発生するのは、この温度到達の直後 ($t = 1 \sim 2 \text{ sec}$) である。 $t = 1.5 \text{ 秒}$ 以後、内壁側でむしろ温度が降下しているのは、熱伝達率の低下によるものである。

Fig. 4.3.2 及び Fig. 4.3.3 にそれぞれ Run-91 及び Run-93 試験に対する、配管外壁での歪量の計算値と実験値の比較を示す。Run-91 の場合、ピーク発生時刻が計算値の方が早く現われている。即ち、実験値ではピーク発生時刻はナトリウム飛来後、 $1.4 \sim 2.0 \text{ 秒}$ 後に発生している事が S601～S603, S605 の各データから読み取れるが、計算値では約 1.0 秒である。この原因としては、インプットとして与えているナトリウム温度や熱伝達率の値がまだ不正確である事によると考えられる。Run-93 の場合は、初期の勾配やピーク発生時刻などに計算値と実験値との大きな差異は見られず、ナトリウム飛来後約 $1.5 \sim 1.8 \text{ sec}$ でピークが見られる。但し S605 はなだらかな上昇傾向を示して、他と傾向が異なるが、これは絶縁低下などセンサ側の問題と考えられる。
注)

歪量のピーク値そのものは、各ゲージ毎にバラツキが大きく、Run-91 で $830 \sim 1,300 \mu\text{St.}$ 、Run-93 で $930 \sim 1,520 \mu\text{St.}$ が実験値である。これに対し、計算値は Run-91, Run-93 でそれぞれ、 $1,140 \mu\text{St.}$ 及び $1,230 \mu\text{St.}$ であり、実験値のバラツキの中ほどに入っている。また、この時の配管外壁での熱応力の計算値は、Run-91 で 31 kg/mm^2 、Run-93 で 33 kg/mm^2 となった。

また試験後の液体浸透検査でも有害と思われるような傷・その他は見つからなかった。

注) 上流側に取付けられている歪ゲージのうち S605 のみが π ゲージ型のものであり、これら π ゲージの出力傾向は試験が回を重ねる毎に他と異なって来た。これはセンサの絶縁低下と考えられている。

4.4 ナトリウム凍結の可能性

Fig. 4.2.7～Fig. 4.2.10 に Run-91～Run-94 の各試験での軸方向の温度降下をそれぞれ示した。

大注水率の場合、ナトリウムの先端部の温度降下は、軸方向距離 6 m で 70～90°C の温度降下が見られる。ナトリウム先端部よりむしろ〇で示したその後の温度降下の方が大きい。これは、この時間領域では水素ガスが相当量流れているためと思われる。ナトリウム先端部の温度降下から見ても、また 4.2 節で求めた熱伝達率から考えても、本試験装置の体系でナトリウム凍結が発生するには、まだ相当の余裕がある事が判る。たとえば、熱伝達率として 4×10^4 [$\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$] を用いると、SWAT-1 試験装置と同じ条件で $L = 25\text{m}$ で最先端部がナトリウム固化温度に達する計算となる。

小注水率試験の場合、軸方向の温度降下は Fig. 4.2.8 及び Fig. 4.2.10 から判るように、200～400°C と相当大きく、特に Run-92 の場合、流体温度はナトリウム凝固点以下まで低下している。しかし、この場合の内部流体は 4.1 節及び 4.2 節からも判るように水素ガスの単相流と考えられるので、ナトリウム固化による配管閉塞の可能性は全く考えられない。事実、試験後の検査でも Run-92, Run-94 の場合、放出配管内のナトリウム量は微量であった。

このように、SWAT-1 試験装置の体系では、注水率の如何にかかわらず、ナトリウムの凍結による配管閉塞の可能性は全く考えられない。また他の体系についても、本試験で得られた流動様相の情報や熱伝達率を考慮する事で配管閉塞の可能性を求める事ができる。

5. おわりに

SWAT-1 試験装置を用いて、放出系配管非予熱条件下での大リーグ・ナトリウム・水反応時の熱過渡特性試験を実施した。以下にその結果をまとめた。

- (1) 反応容器内径比換算で伝熱管数 DEG 相当の大注水率である Run-91, Run-93 と同 1 DEG 相当以下の小注水率である Run-92, Run-94 と 4 回実施した。
- (2) 放出系配管の流動様相は大注水率の場合は初期にナトリウム単相の流れが存在し、その後 0.2~0.3 秒で高ボイド率の流れに移行する。
これに対し小注水率の場合は、波状流・層状流的な流動から始まり、なおも注水が続く場合は水素ガス単相流に移行する。
- (3) 常温の配管内を高温のナトリウムが通過する際の熱伝達率は、大注水率の場合、初期のナトリウム単相流は短時間過ぎて判らないが、その後の流れでは、最大 3×10^4 [Kcal/m²·h·°C] であり、Seban-Shimazaki の式を用いても十分安全側の結果が得られる。
これに対し、小注水率の場合は、水素ガス単相流に対してはそのまま定常流の乱流熱伝達の式が適用される。
- (4) 大注水率試験の場合、放出系配管壁内に発生する熱応力による歪量はややバラツキが大きく 800~1,500 μ St. で前項の熱伝達率を用いて得られる計算値ともほぼ一致している。また、この時の熱応力の試算値は 31~33 kg/mm² である。試験後の液体浸透検査でも有害と思われるような傷・その他は見つからなかった。
- (5) ナトリウム凍結による配管凍結の可能性は本試験の体系では全く考えられなかった。大注水率の場合のナトリウムの温度降下はほとんど無視できる程度であり、小注水率の場合は温度降下が大きくても、流体はほとんど水素ガスであり問題とならない。

以上が本試験で明らかとなつた主な結果である。また、本試験の結果を原型炉クラスの SG に対する解析に適用するに際しての注意事項として次に主なものを挙げた。

- ① 放出系配管内部流動様相に影響を与える重要なパラメータのひとつとして、装置自体の geometry の問題がある。たとえば、放出系配管取付け位置のナトリウム液位に対する相対的高さなどである。SWAT-1 装置と原型炉 SG とはこのような意味で必ずしも同一構造とは言い難い。原型炉 SG の構造の方が一般にボイド率が高くなる傾向にあると考えられる。
- ② また同様に配管内径、配管長さ、垂直配管がない事など原型炉 SG 放出系配管と異なる点も多く、これらの点が流動その他に与える影響についても考慮されなければならない。
- ③ 本試験では装置上の制約から大注水率の場合の反応容器内初期ナトリウム温度を 320°C 程度にしか選ぶ事ができなかったが、原型炉 SG の場合は熱衝撃に関しては更に厳しい条件も考え得る。しかし、この点に関しては本試験からの外挿も十分可能であると考える。

最後に、本試験を実施するに当つて貴重な助言を寄せられた堀雅夫、今津章、小石川秋三（川崎重工）の各氏に感謝の意を表する。なお、本試験装置の組立、実験データの整理等、東興機械工業㈱派遣員の手で行なわれた事を付記する。

6. 参考文献

- (1) 田辺裕美, 錦見正和, 広井博, 佐々木和一, 佐藤稔, 「SWAT-1 装置放出系配管内流動様相 大リーク・ナトリウム-水反応試験(第6報)」 PNC SN941 78-78 (1978.3)
- (2) 星高雄, 「シース型熱電対の熱応答特性」 “熱と計測” (1972.7)
- (3) 則松新二, 飯野次夫, 奥村直人, 青木忠雄, 太田俊朗, 石井陽一郎, 「高温ひずみゲージの較正試験(1)」 PNC SN941 77-192
- (4) Bellman, R., et al, 「Numerical Inversion of the Laplace Transform」 (1966)
- (5) 岡村健二郎, 小西忠孝, 鶴尾誠一, 「油圧管路における波動現象の研究 第2章」 機械学会論文集 Vol. 40, No 329 (1974.1) P. 199~207

図 表 集

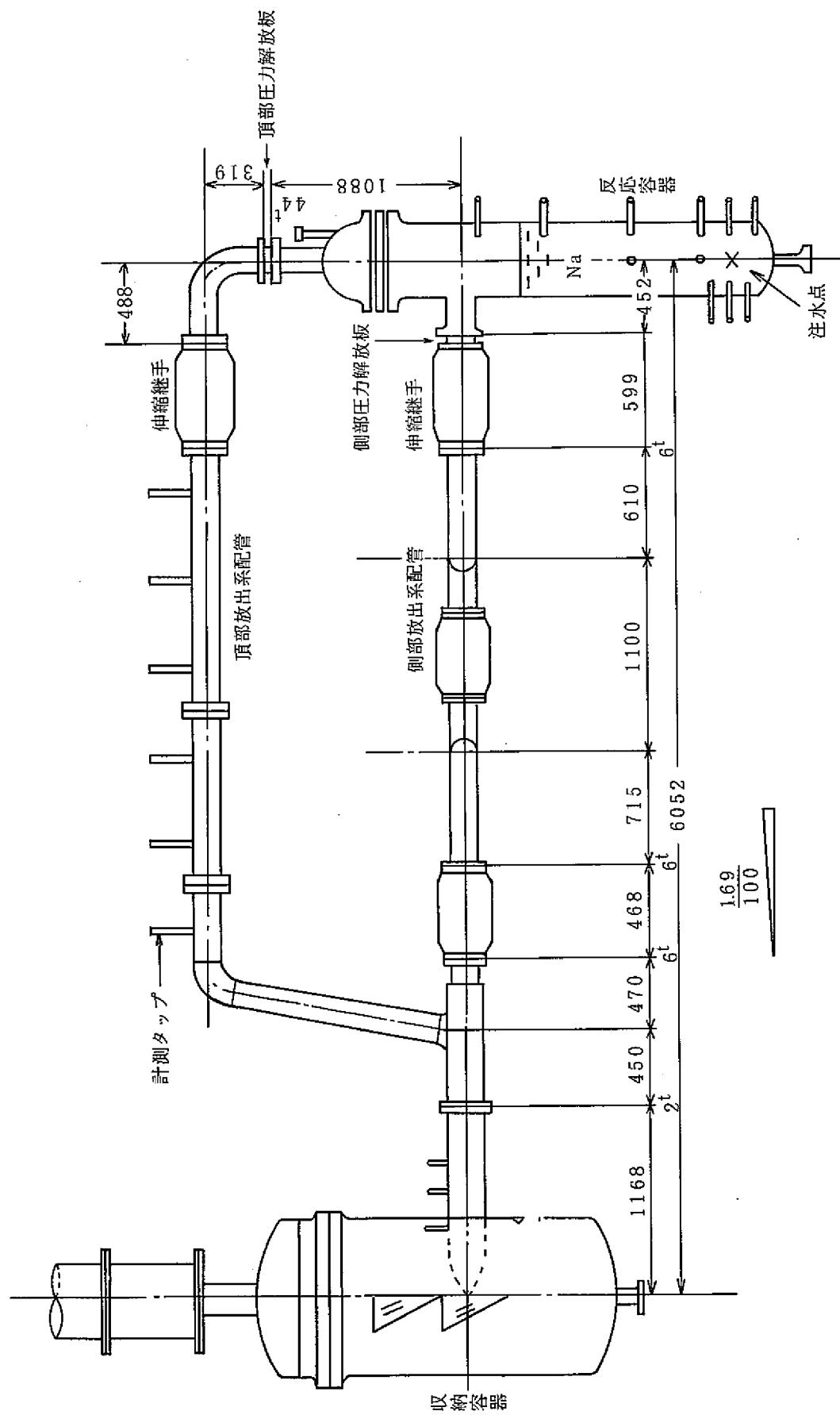


Fig. 2.3.1 SWAT-1 装置概要

品番	部品名	材質	数量	子会計	1箇会計	担当	備考
			製作枚数	出荷量	返却量		
103	M16×60H6ドットナット	SS41	2	2		ソ	ナット2ダラッシュナット付
103	M16×71H6ドットナット	SS41	4	4		ソ	ナット2ダラッシュナット付
102	リガクシナット	鈑	6	24	30	ソ	OWL-R23-D
101	リガクシナット	鈑	2	8	10	ソ	OWL-R65-D
21	ナット	SUS304	2	2		キ	ミルシート付
23	ノブレル125A	SUS304TP	1	1		管	ミルシート付
22	フランジ125A	SUS304HP	1	1		キ	ミルシート付
21	ハーフフランジ	SS41	1	1		キ	ミルシート付
20	蝶形内六角	SUS304	2	2		キ	
19	M12ボルトナット	SMC45	8	8		ソ	ナット16ダラッシュナット付 ボルト16ダラッシュナット付
18	M16ボルトナット	SMC45	24	24		ソ	ナット48ダラッシュナット付
17	M24ボルトナット	SMC45	16	16		ソ	ナット32ダラッシュナット付
16	括弧試験付	SUS304TP	9	9		管	Se-080ミルシート付
15	ソケット	SUS304	11	11		キ	ミルシート付
14	ノブレル50A	SUS304TP	1	1		管	ミルシート付 Se-80
13	ノブル50A	SUS304TP	2	2		キ	ミルシート付 Se-80
12	ライナー	SS41BSP	1	1		キ	ミルシート付 Se-80
11	フランジ	SUS304HP	1	1		キ	ミルシート付
10	脚	SUS304HP	2	2		缶	
9	袖板	SUS304HP	1	1		缶	
8	ナット	SUS304	3	3		キ	ミルシート付
7	放熱系ノブル125A	SUS304TP	1	1		管	Se-080ミルシート付
6	フランジ50A	SUS304HP	3	3		キ	ミルシート付
5	ボルタシング	SUS304HP	2	2		キ	ミルシート付
4	中国フランジ	SUS304HP	1	1		キ	ミルシート付
3	フランジ	SUS304	2	2		キ	ミルシート付
2	対応	SUS304HP	1	1		缶	2.1.1ダラッシュ121, ミルシート付
1	本体	SUS304HP	1	1		缶	ミルシート付

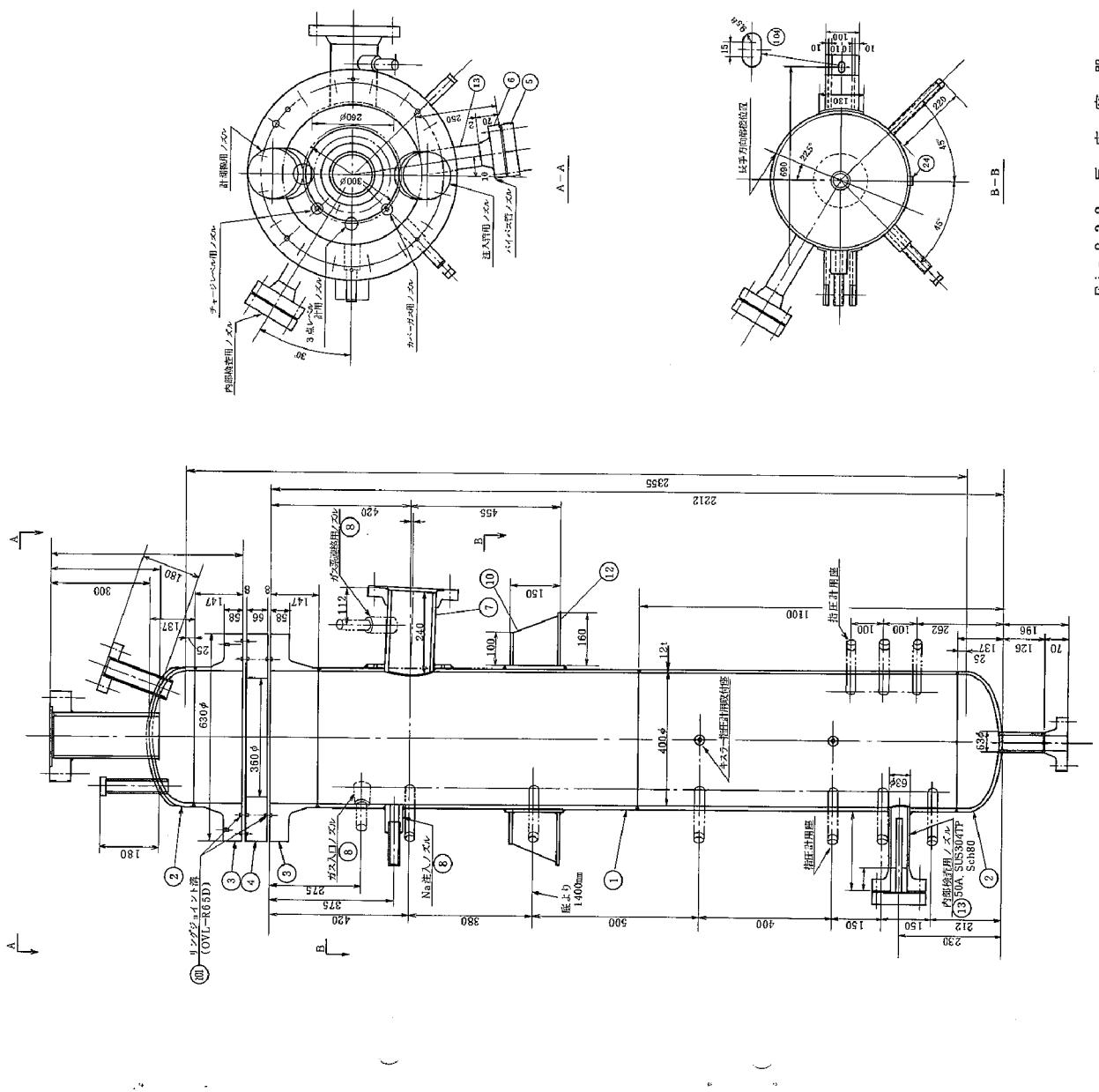


Fig. 2.3.2 反應器

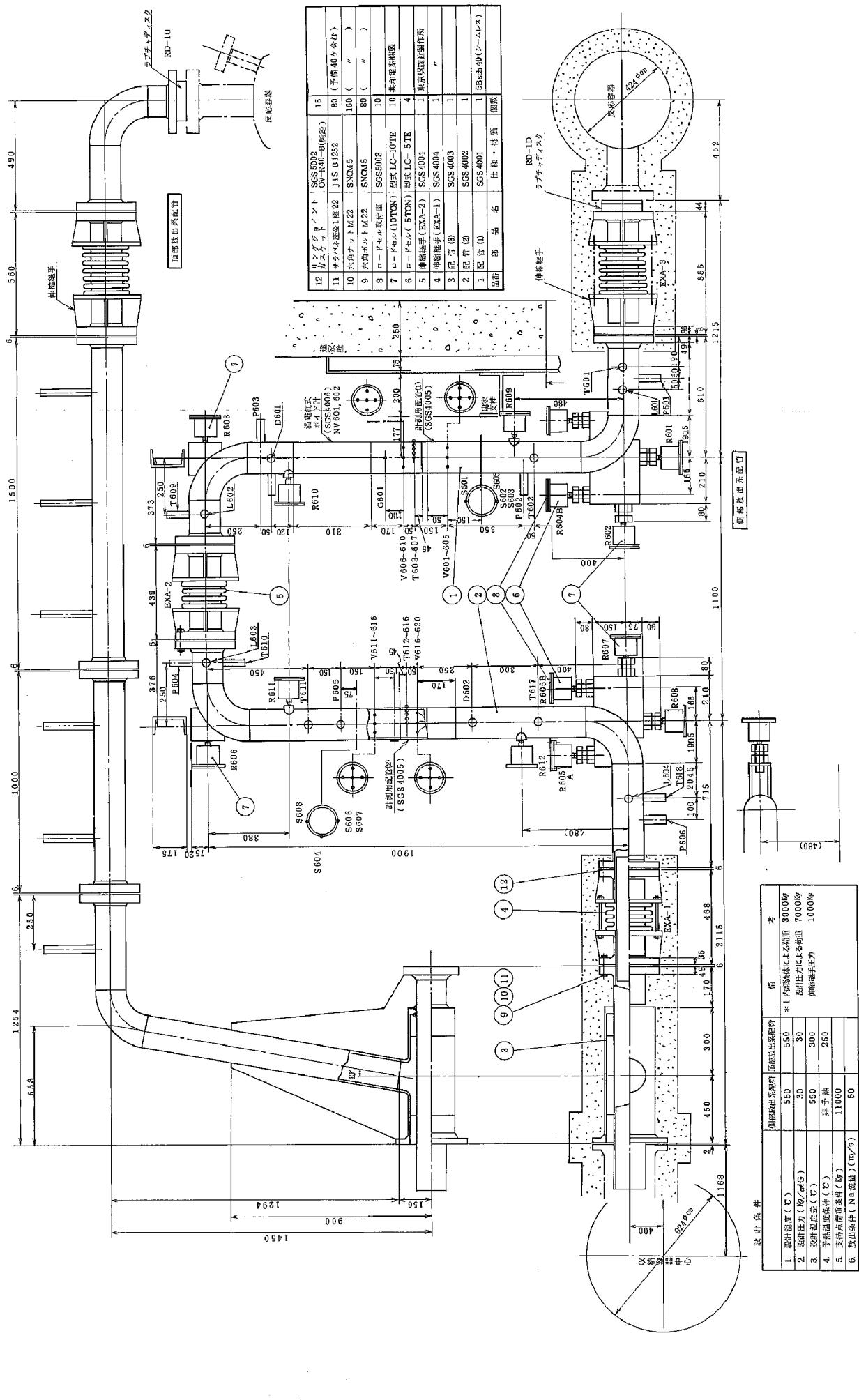


Fig. 2.3.3 SWAT-1 放出系配管組立図

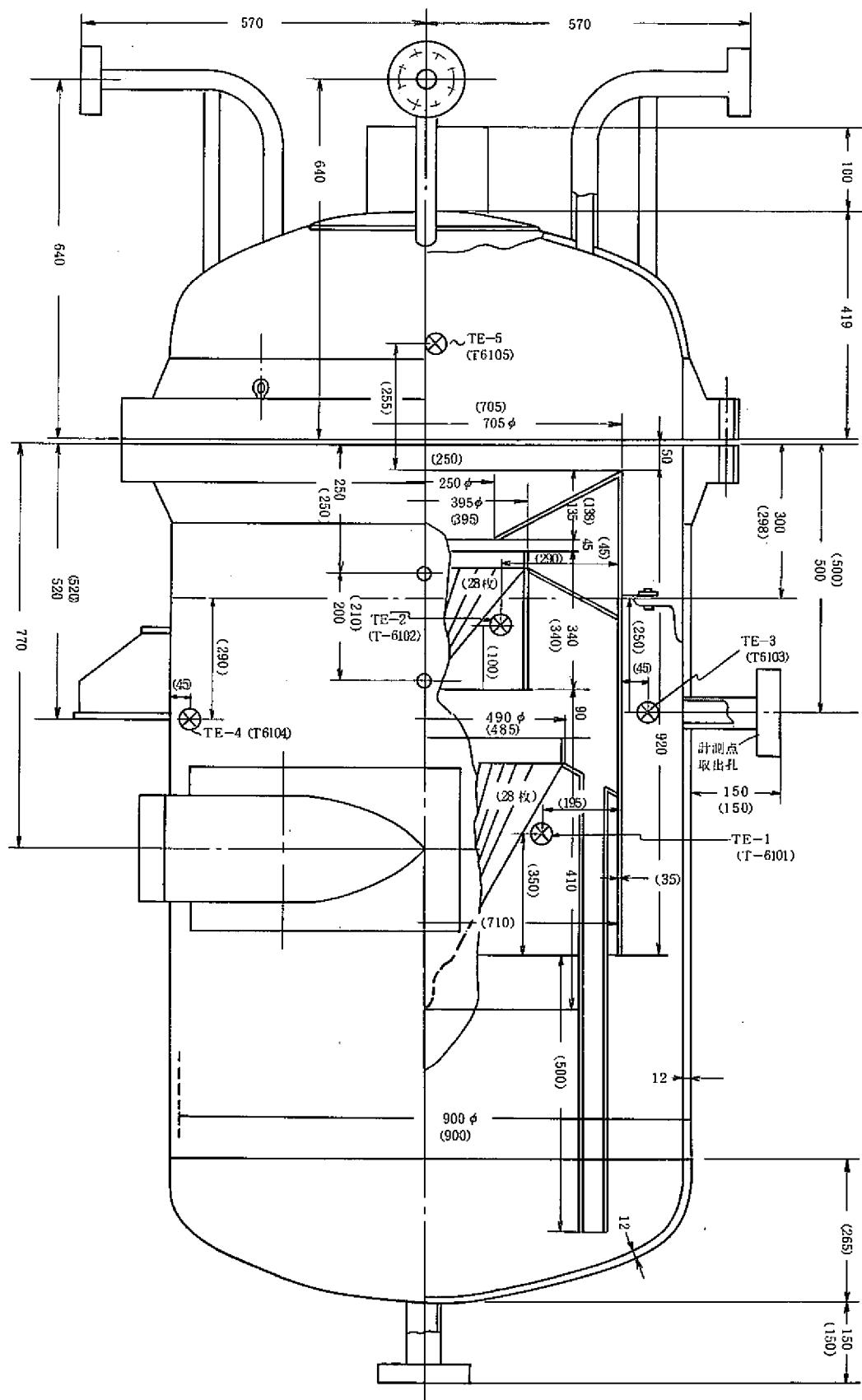


Fig. 2. 3. 4 収 納 容 器

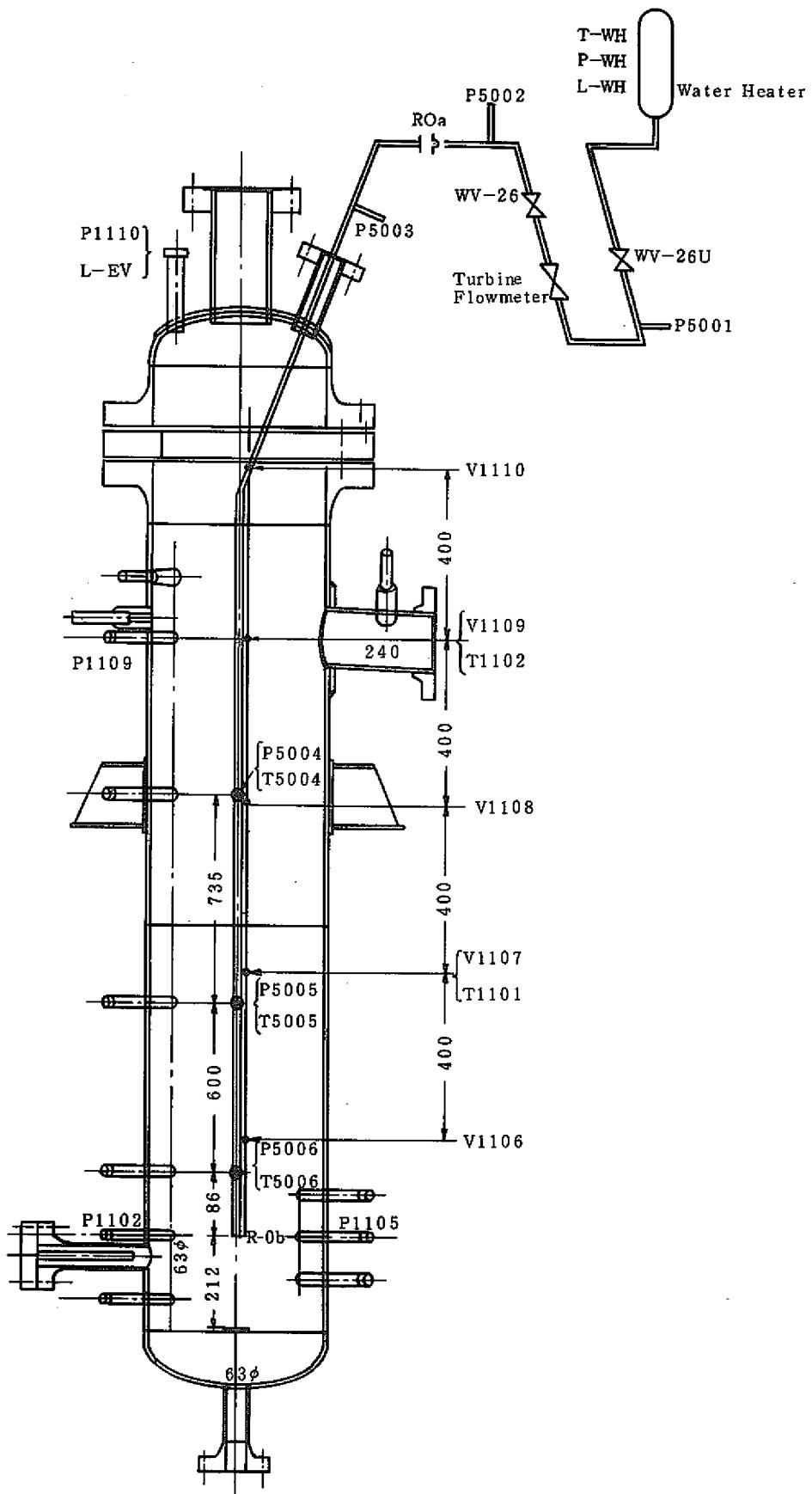


Fig. 2.4.1(a) 反応容器内計測センサ配置図 (Run-91)

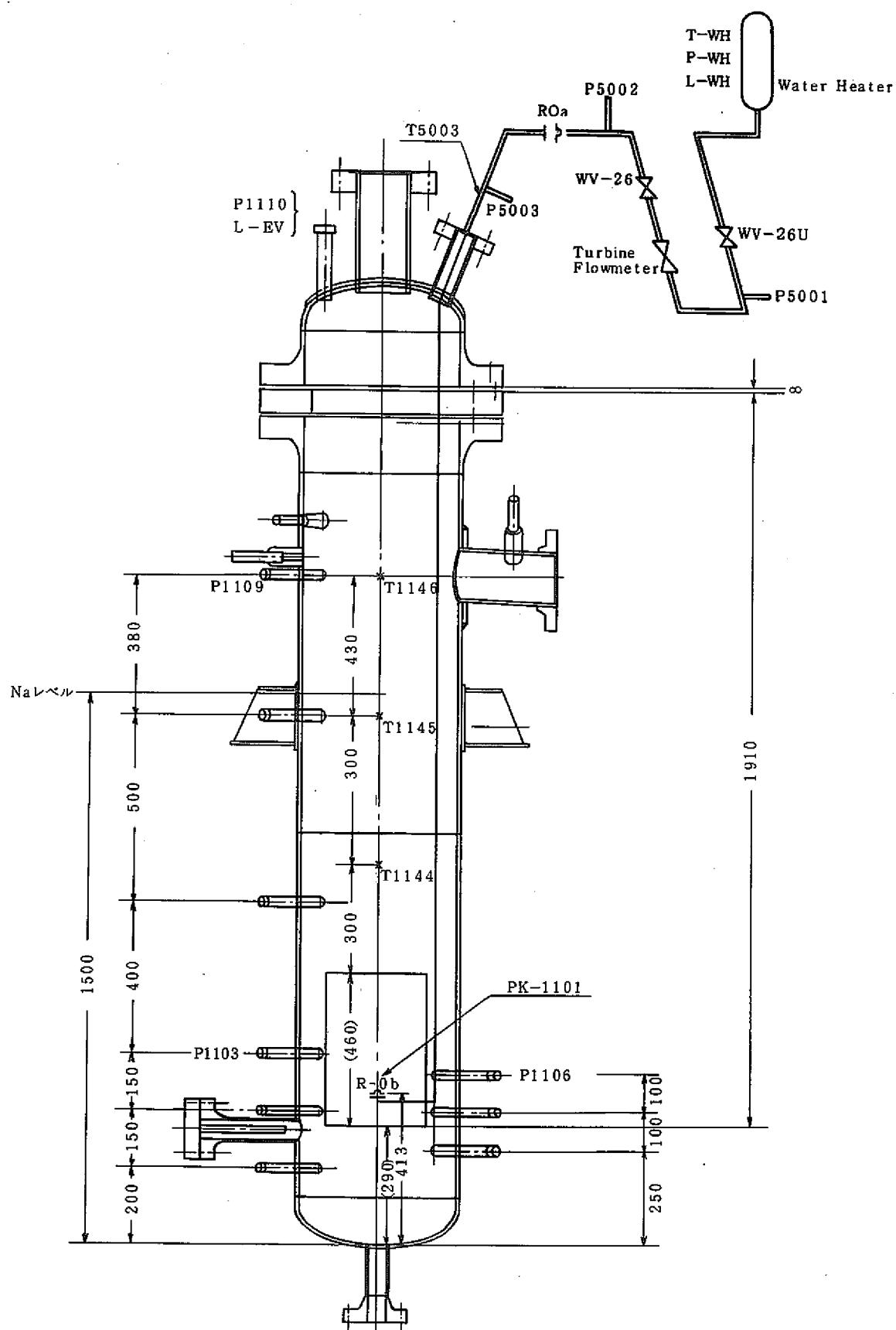


Fig. 2.4.1(b) 反応容器内計測センサ配置図 (Run-92)

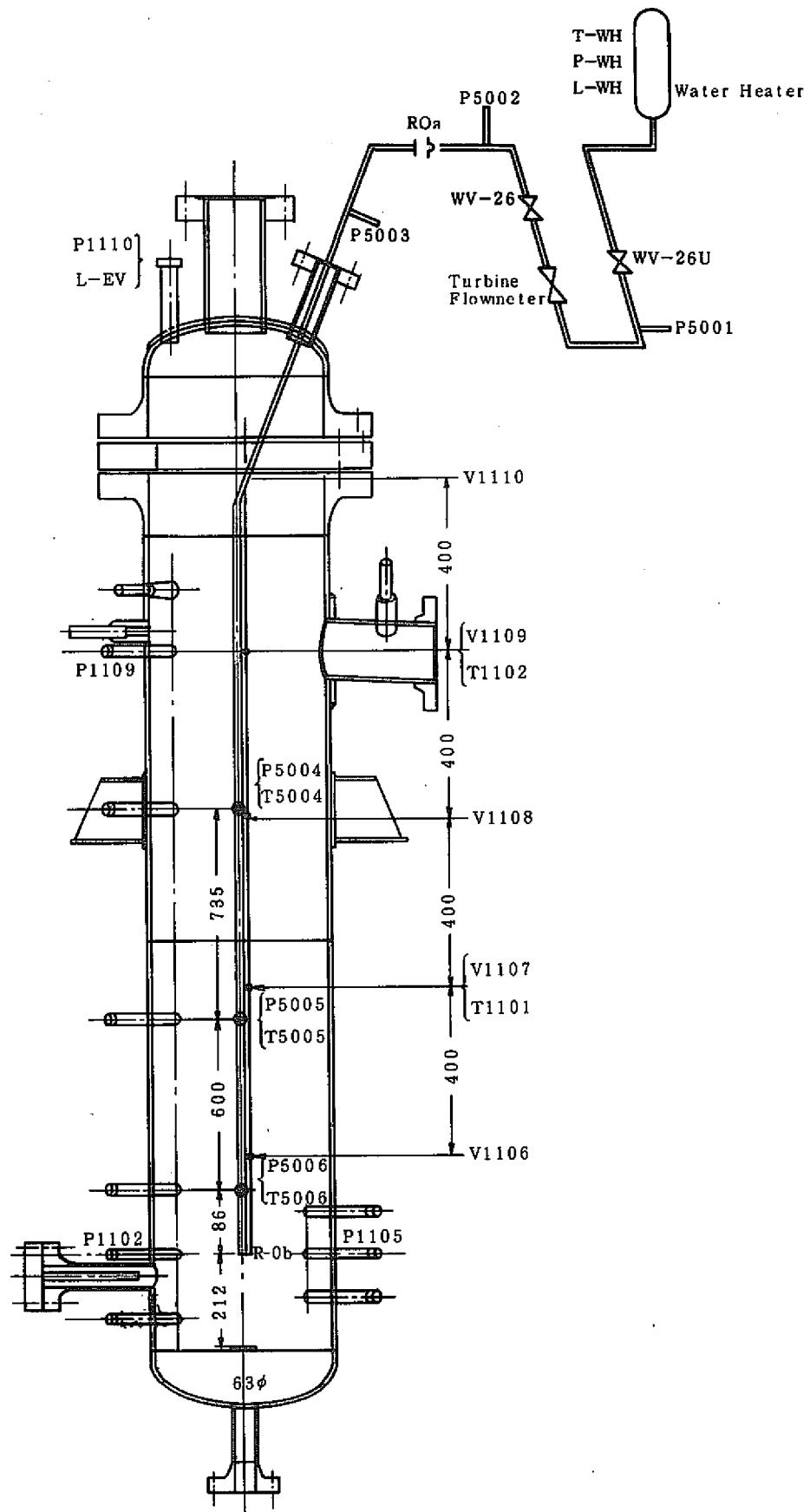


Fig. 2.4.1(c) 反応容器内計測センサ配置図 (Run-93)

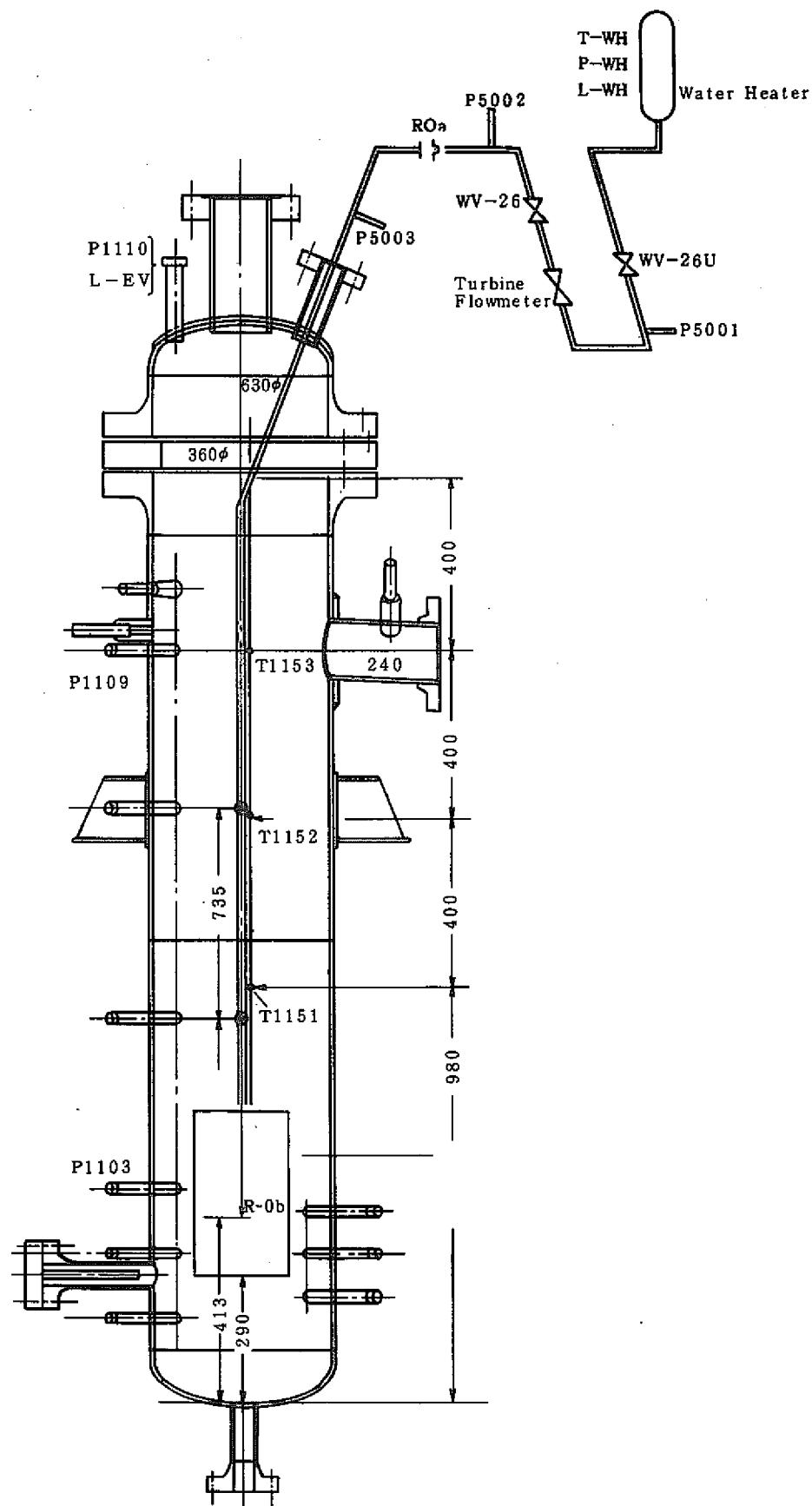


Fig. 2.4.1(d) 反応容器内計測センサ配置図 (Run-94)

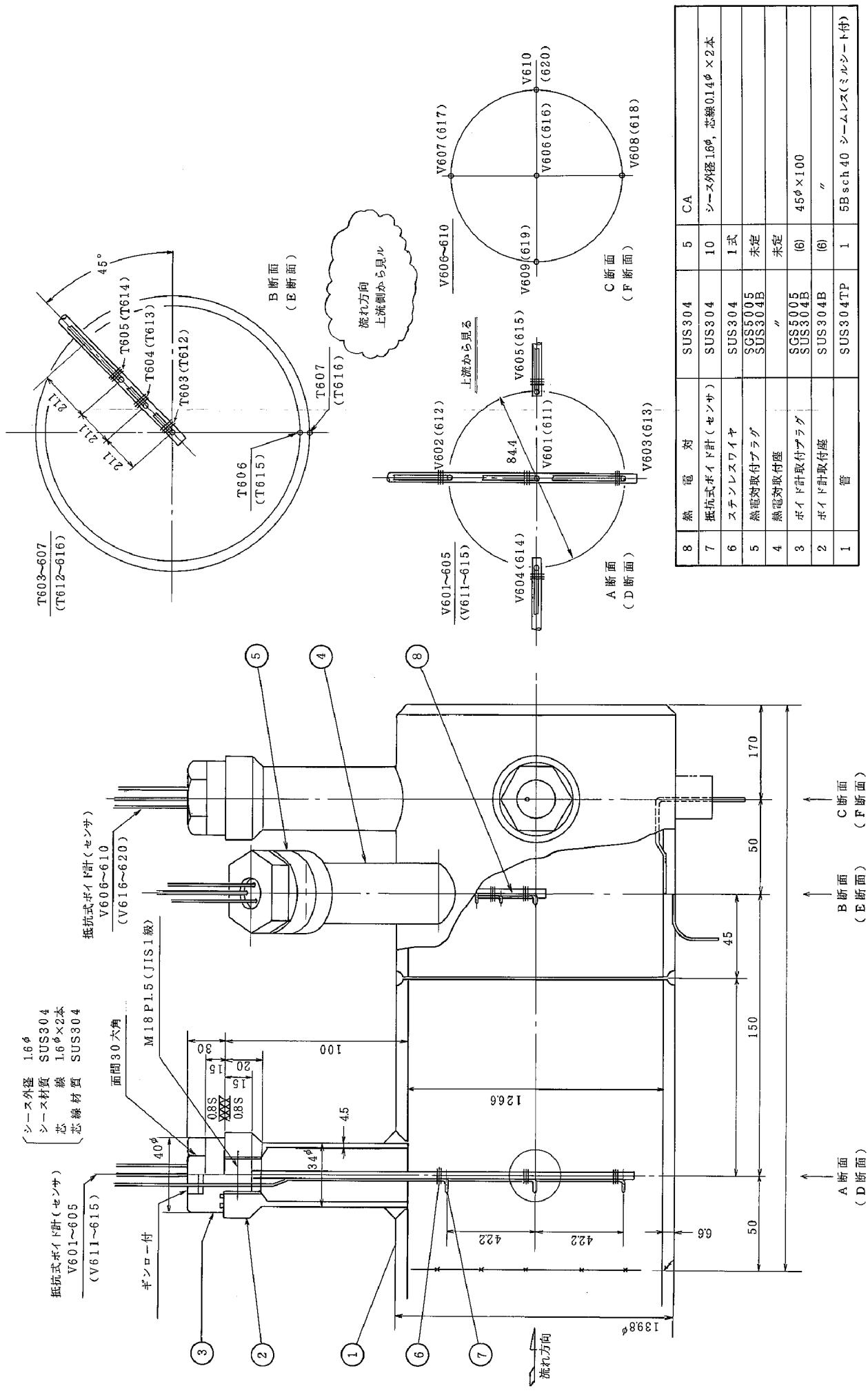


Fig. 2.4.2 T.C., 抵抗式ナトリウム・ボイド計取付詳細図

Table 2.4.1 計測器仕様一覧表

計測器	取付点数	取付位置	Tag No.	仕様
圧力計	2	反応容器	P1109, P1110	PHT-15S 専用管型 FS=15kg/cm ²
	6	放出系配管	P601～P606	同上
	1	収納容器	P6101	同上
接触式Na検知器	4	放出系配管	L601～L604	スヌーパーク・プラグ型
抵抗式Na水素計	20	0～5	V1101～V1105	大同産業(株)
	25	20	V601～V620	大同産業(株)
γ線水素ド率計	1	放出系配管	G601	東京原子力工業(株)
渦電流式ド率計	2	放出系配管	NV601, NV602	ニスコ社
ドラッグ式流量計	2	放出系配管	F601, F602	ST研(株) FHT30 S FS=8kgf
ロードセル		放出系配管	R601～R612	共和電業(株) R604A, R605AはLC5TE他は10TE FS=5ton(LC5TE) 10ton(LC10TE)
熱電対	2～3	反応容器	T11XX	助川電気 C.A. 1.0φ JIS0.75 极非接地シース型
	18	放出系配管	T601～T618	助川電機 CA. 1.0φ JIS0.75 极非接地シース型
	5	収納容器	T6101～T6105	助川電気 CA. 1.0φ JIS0.75 极非接地シース型
歪ゲージ	8	放出系配管	S601～S608	S601～S604 AIJTECH社 SG425 S605～S608 ST研(株) SHT10(πゲージ)
変位計	2	放出系配管	A601, A602	渦電流型
破裂検知器	1	放出管・反応容器の間	R·1D	

Table 2.4.2 計測フローチャート

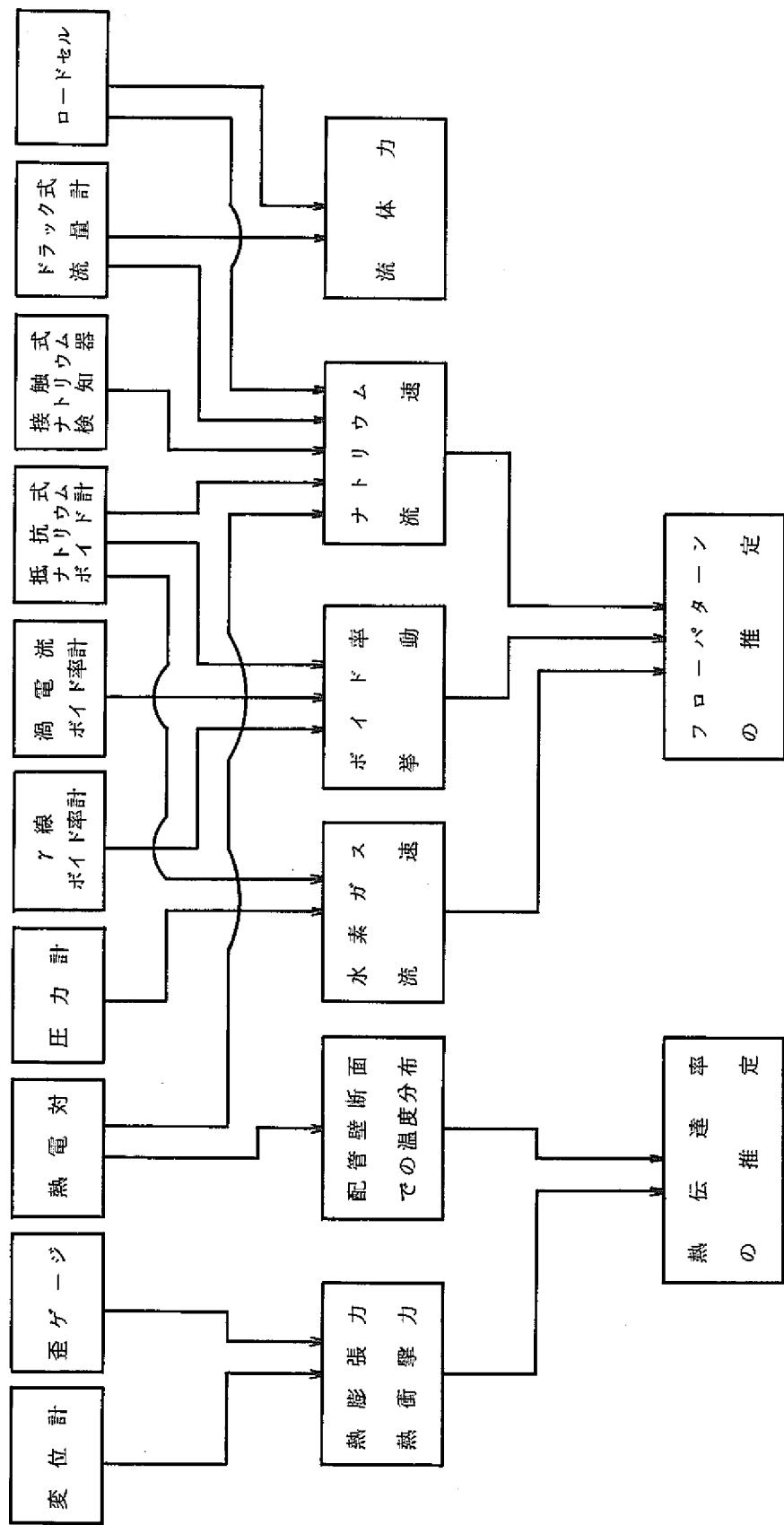


Table 2.5.1 試験条件及び主な結果

Run No.			9 1	9 2	9 3	9 4
注水オリフィス口径	mm ϕ		7.0	ノズル 1.5	5.0	ノズル 2.5
水加熱器圧力	Kg/cm ²		130	128	128	129
水加熱器温度	°C		320	310	333	331
弁開時間	sec		3.56	48.3	5.04	55.3
注水量	Kg		6.09	2.80	5.17	6.67
平均注水率	Kg/sec		1.71	0.0580	1.03	0.121
相当する破断伝熱管本数	DEG		5.7	0.2	3.4	0.4
初期ナトリウム温度	°C		322	411	321	410
側部放出管温度	°C		35	35	30	15
頂部放出管・RT温度	°C		210	300	250	300
ラプチャ 板設定圧	側部	Kg/cm ²	3.0	3.0	3.0	3.0
	頂部		7.0	7.0	7.0	7.0
	RT		1.5	1.5	1.5	1.5
カバーガス圧	Kg/cm ² A		1.5	1.5	1.5	1.5
注水位置	液面下mm		1115	1050	1115	1050
内部構造物の有無	-		無	伝熱管群(220mm×32本)	無	伝熱管群(220mm×32本)
チャージナトリウム量	Kg		155	155	155	155
ラプチャ 板破裂 時刻	側部	sec	0.095	2.0	0.228	0.96
	頂部		破裂	破裂せず	破裂せず	破裂せず
	RT		0.764	23.7	0.94	9.4
初期放出速度	m/sec		22	23	18	16
圧力ピーク移動速度	m/sec		21	520	20	230
放出ナトリウム量	Kg		122	34	123	31
最低ボイド率	-		不明	0.85	ほぼ0	0.70
最大荷量	ton		1.0	0.2	0.7	0.2
最高到達圧力 反応器 容器	Kg/cm ² A		不明	4.4	9.0	4.0
ナトリウム先端の 温度 下降	°C		90	350	50	270
放出管上の歪量	$\times 10^{-6}$		900~1,300	~700	1,000~1,500	~1,440

Run-91 試 驗 結 果

Fig.3.1.1

{

Fig.3.1.16

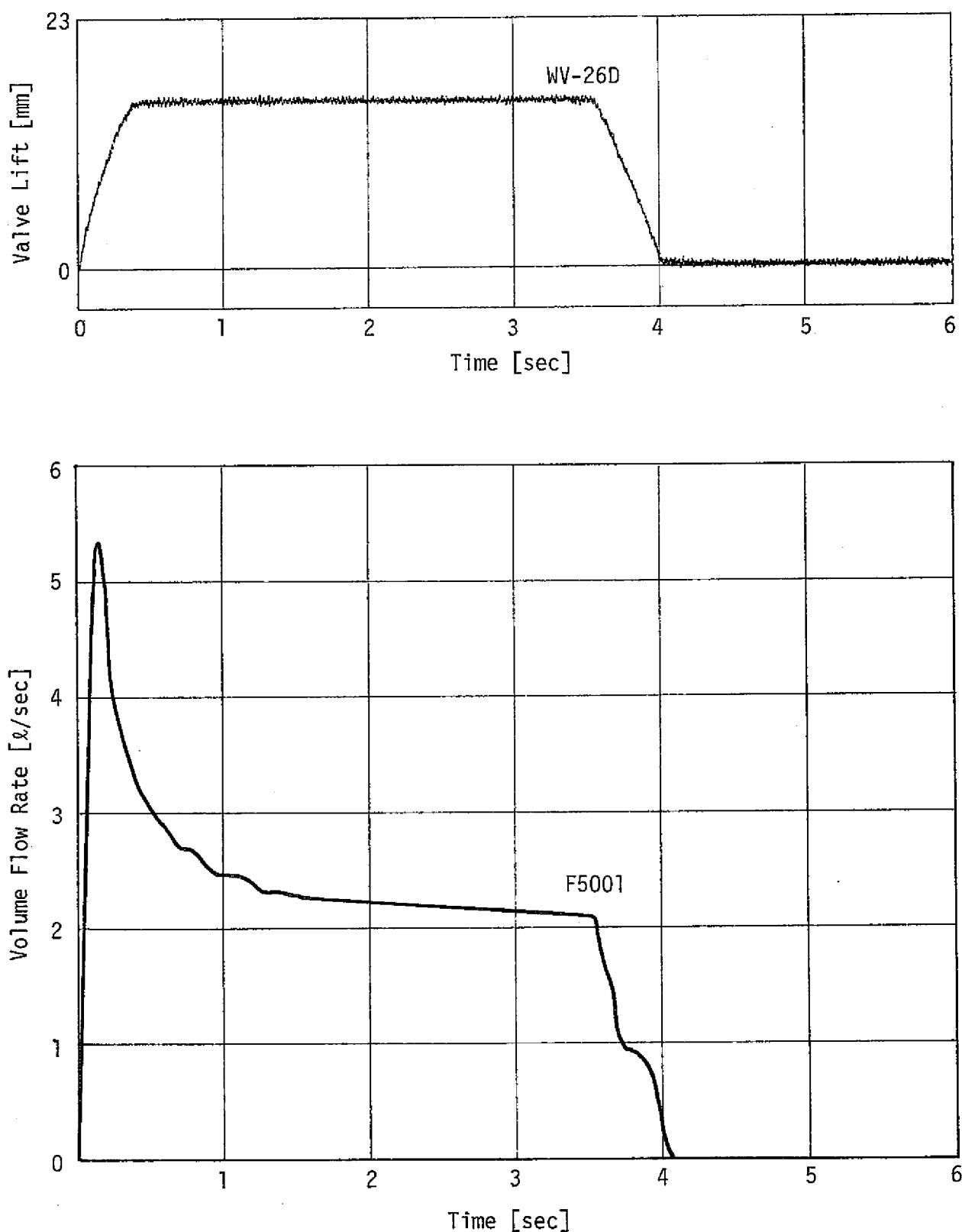


Fig. 3.1.1 Water Injection Valve Openning & Volume Flow Rate

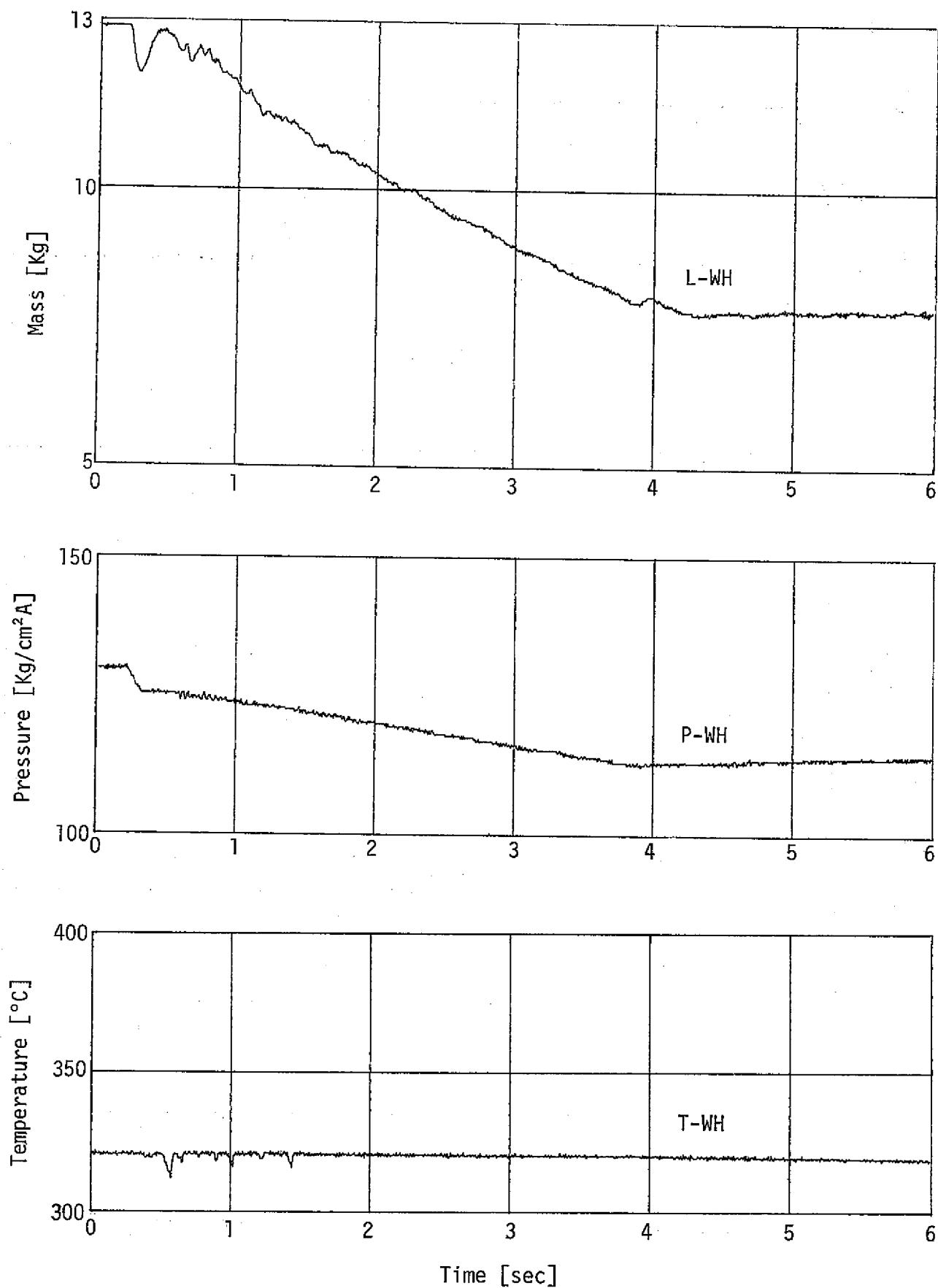


Fig. 3.1.2 Water Heater Conditions

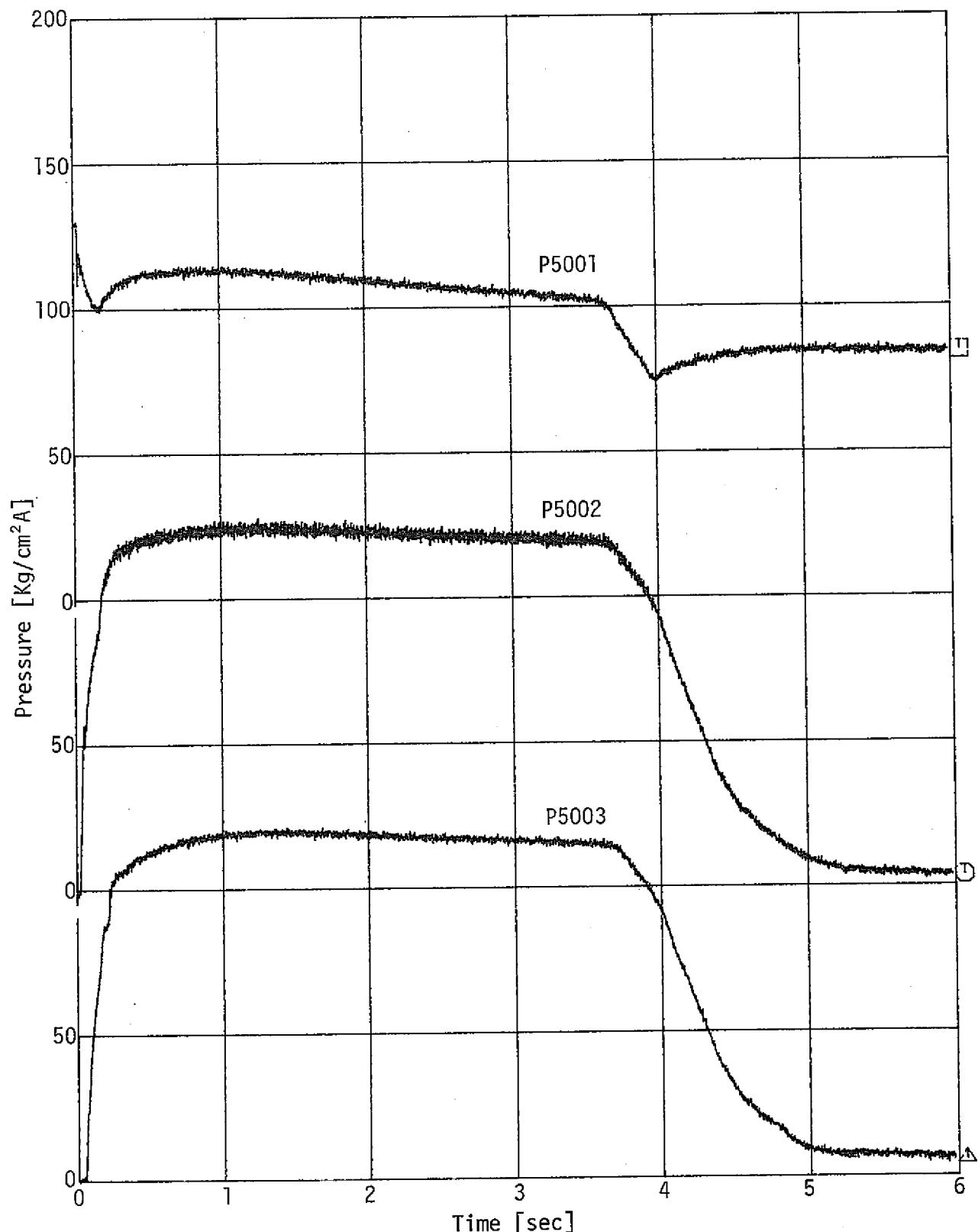


Fig. 3.1.3(a) Pressures in Water Injection Line

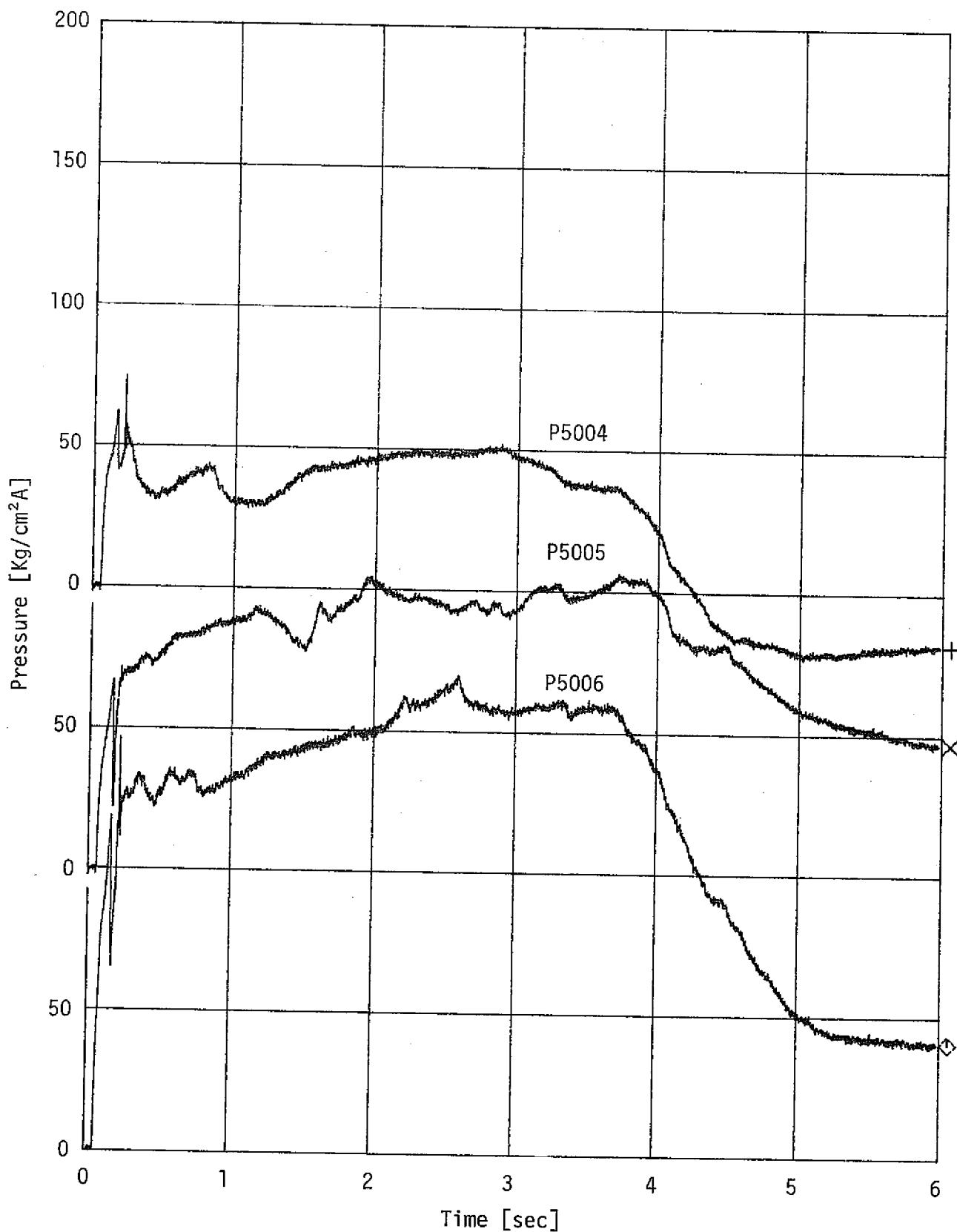


Fig. 3.1.3(b) Pressures in Water Injection Line

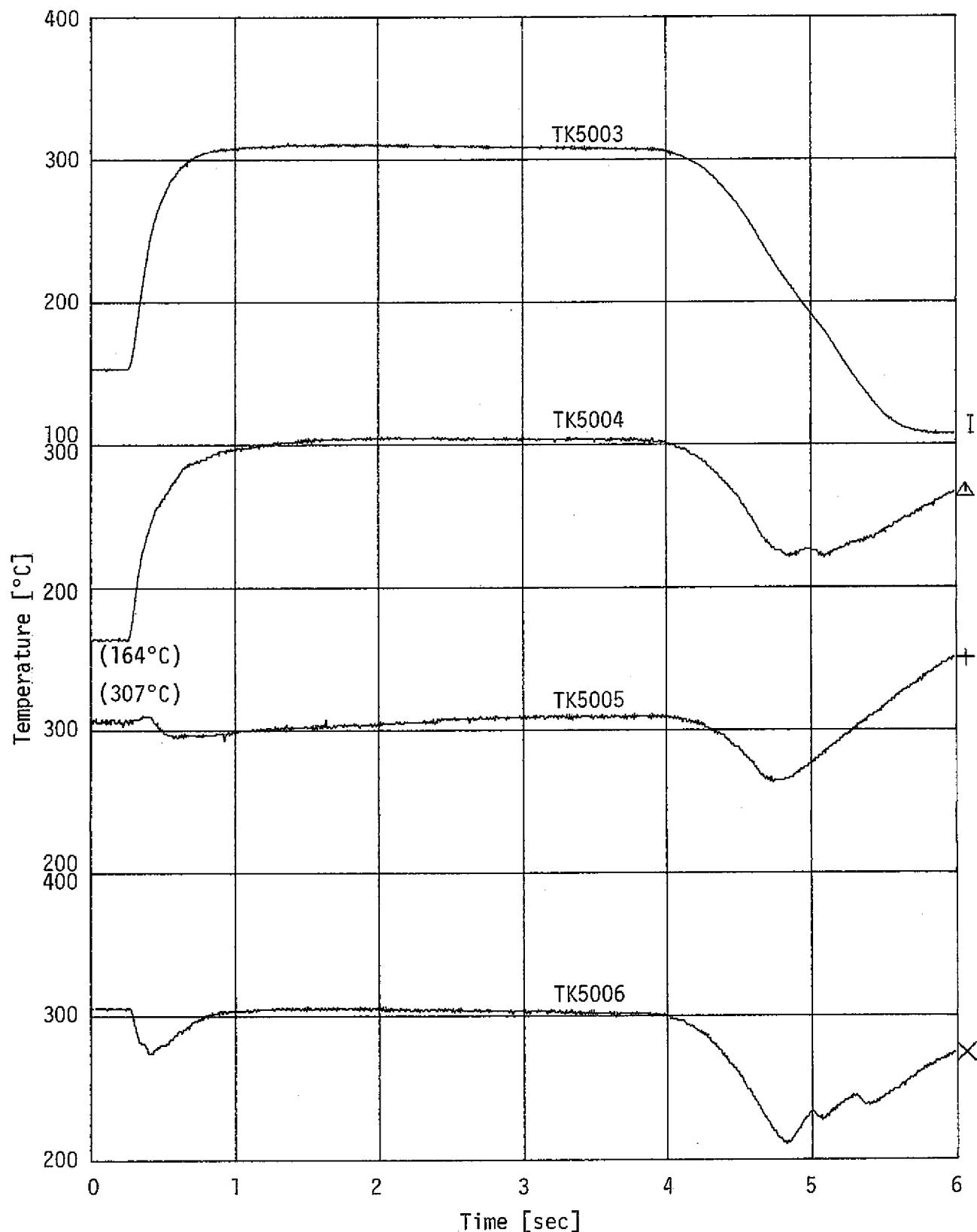


Fig. 3.1.4 Temperatures in Water Injection Line

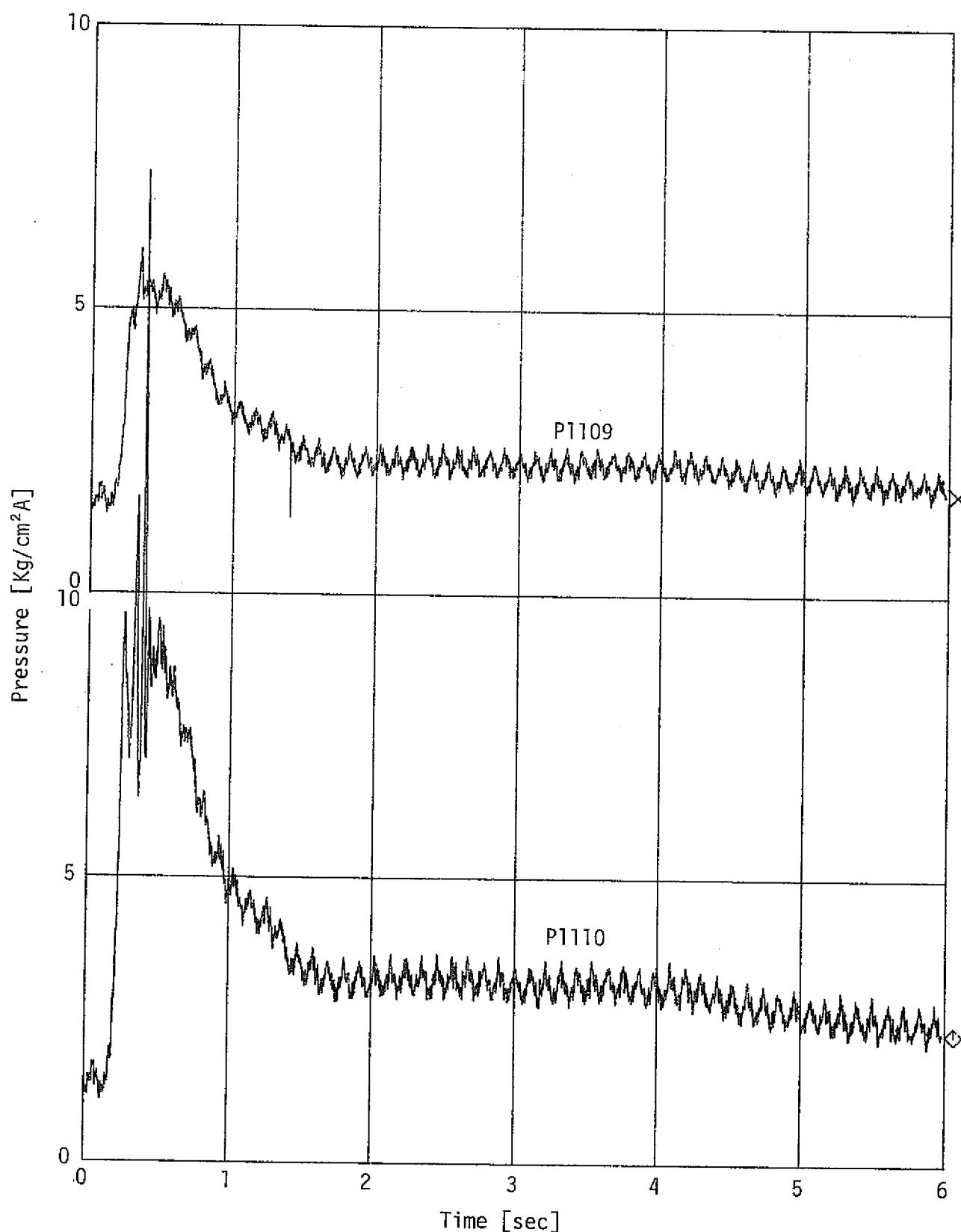


Fig. 3.1.5(a) Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line

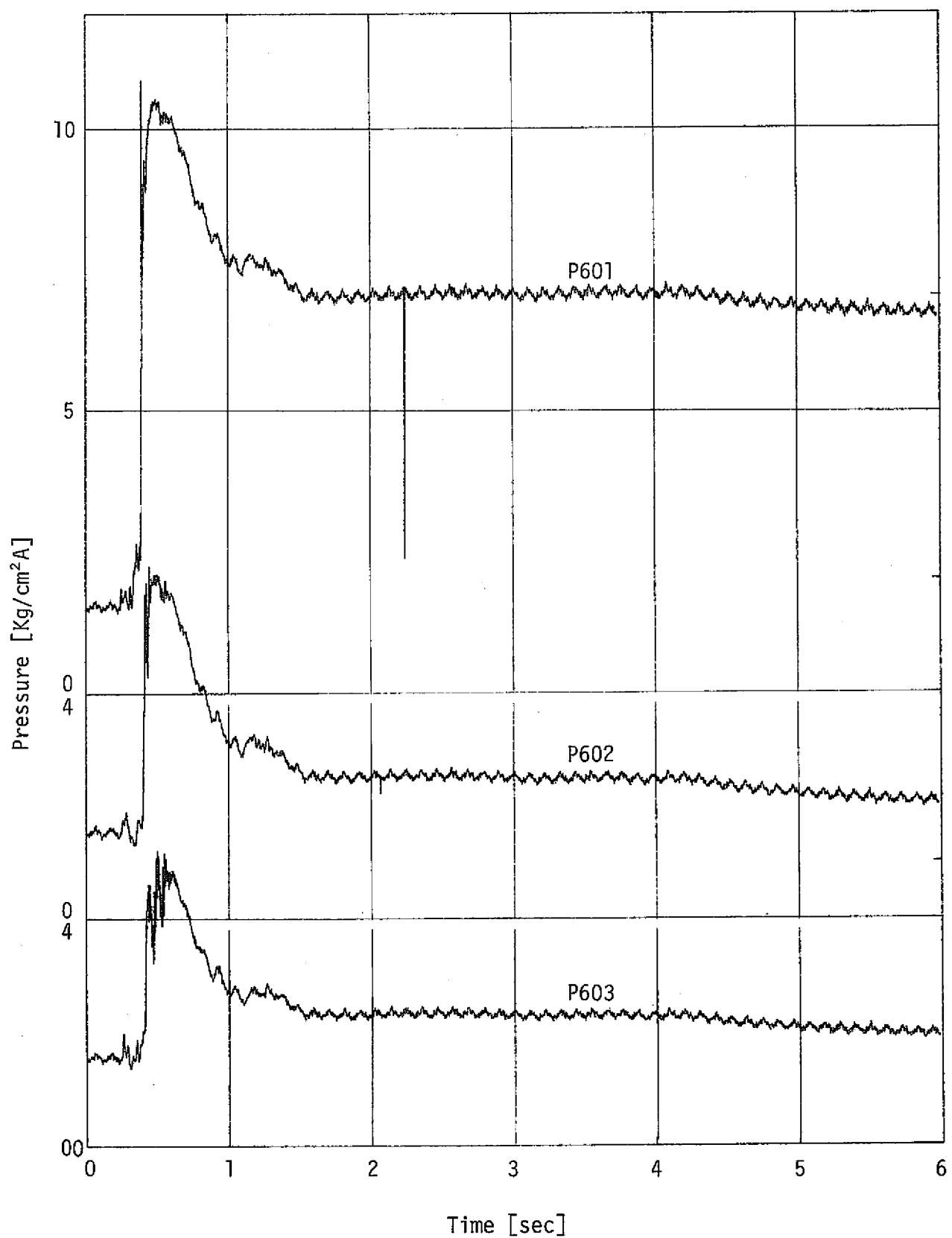


Fig. 3.1.5(b) Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line

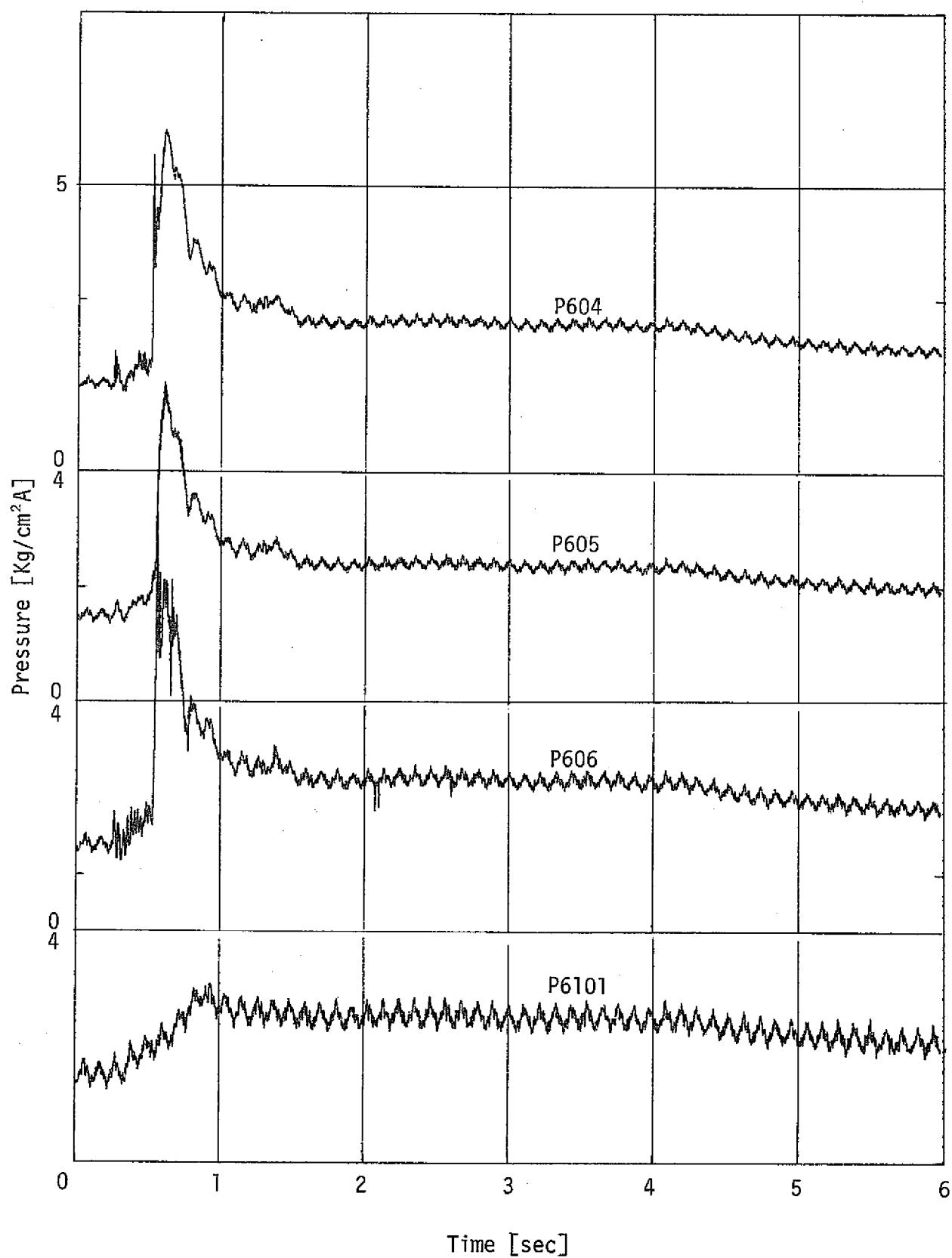


Fig. 3.1.5(c) Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line

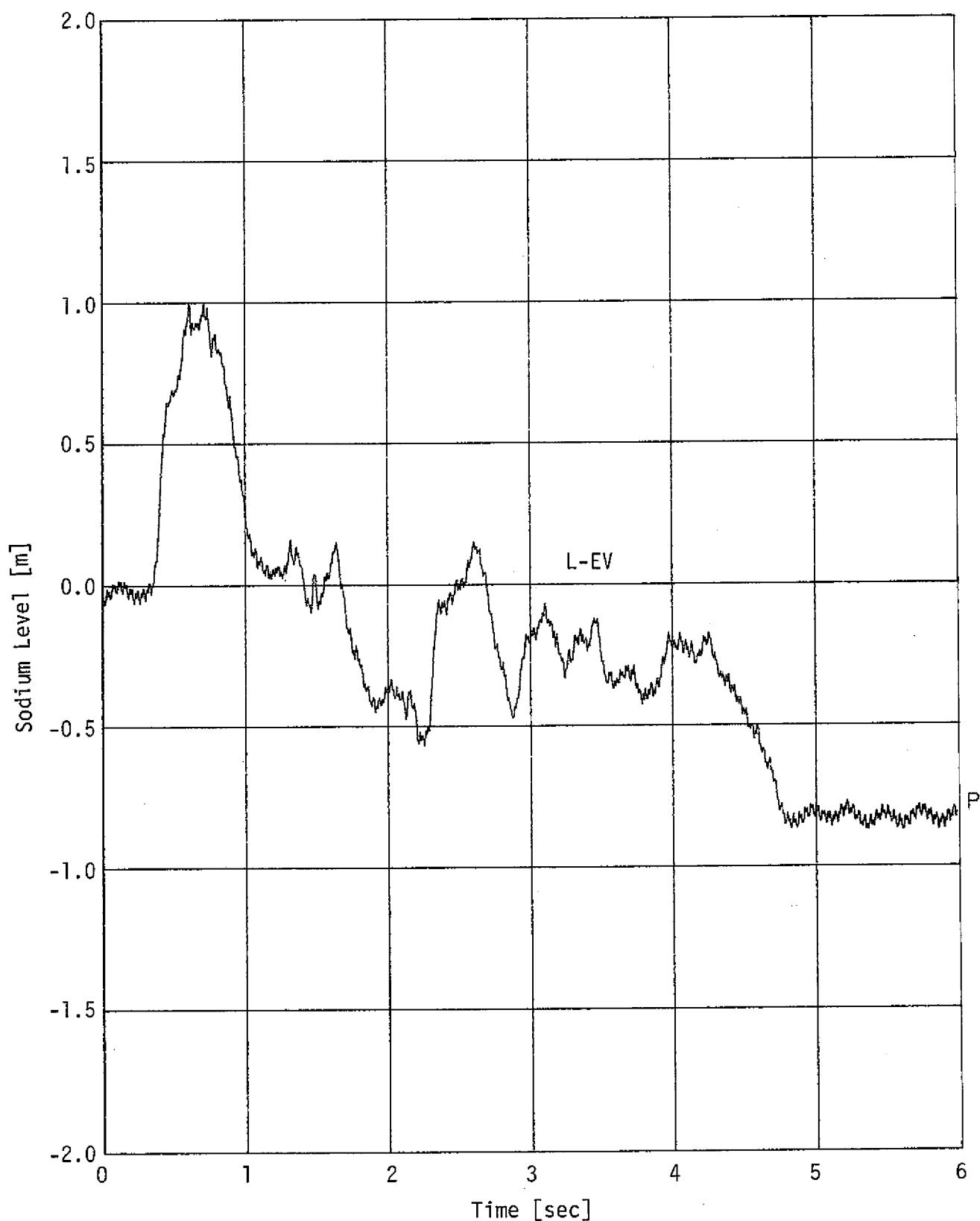


Fig. 3.1.6 Sodium Level in Reaction Vessel

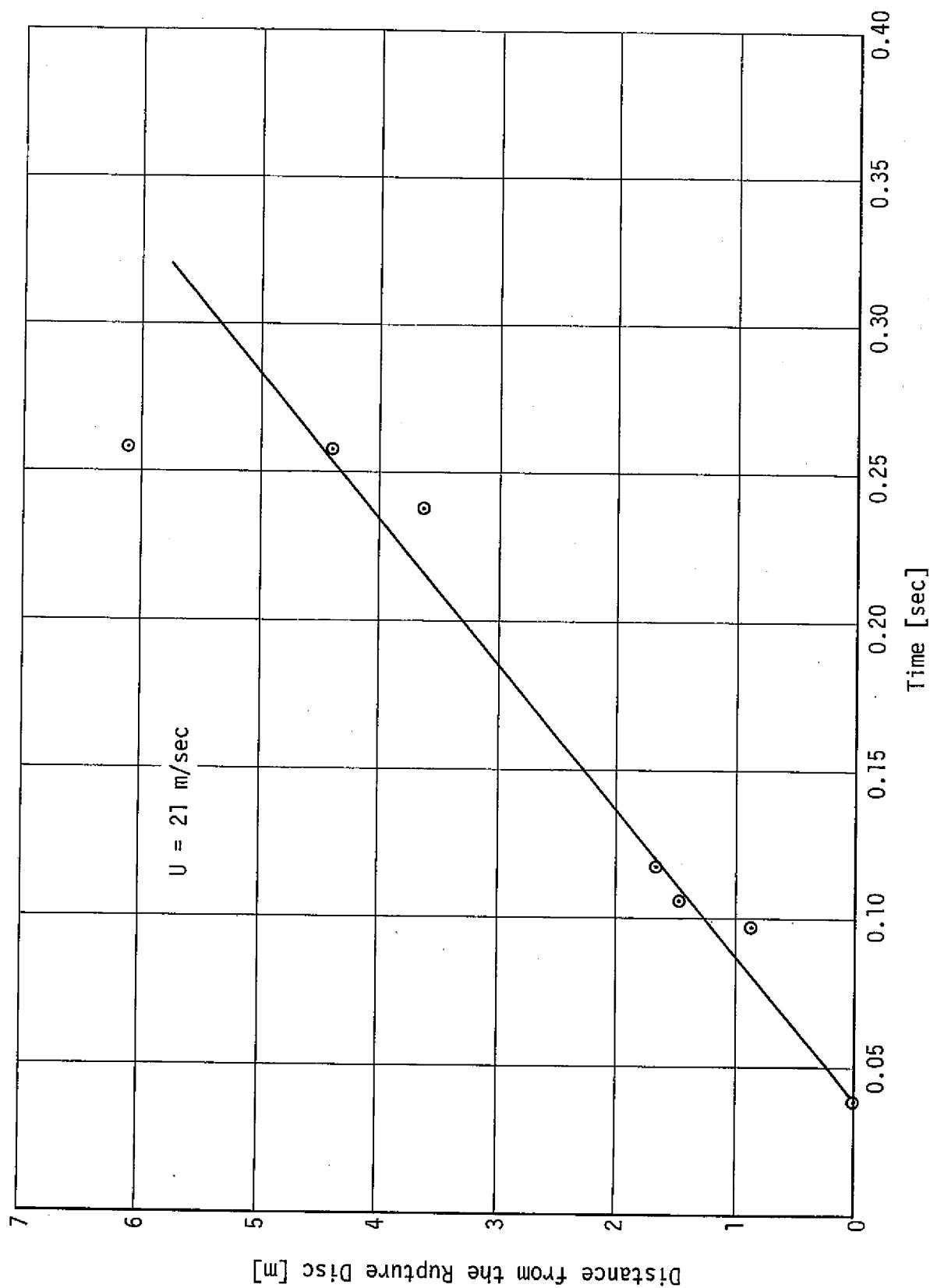


Fig. 3.1.7 Velocity derived from Initial Pressure Rising.

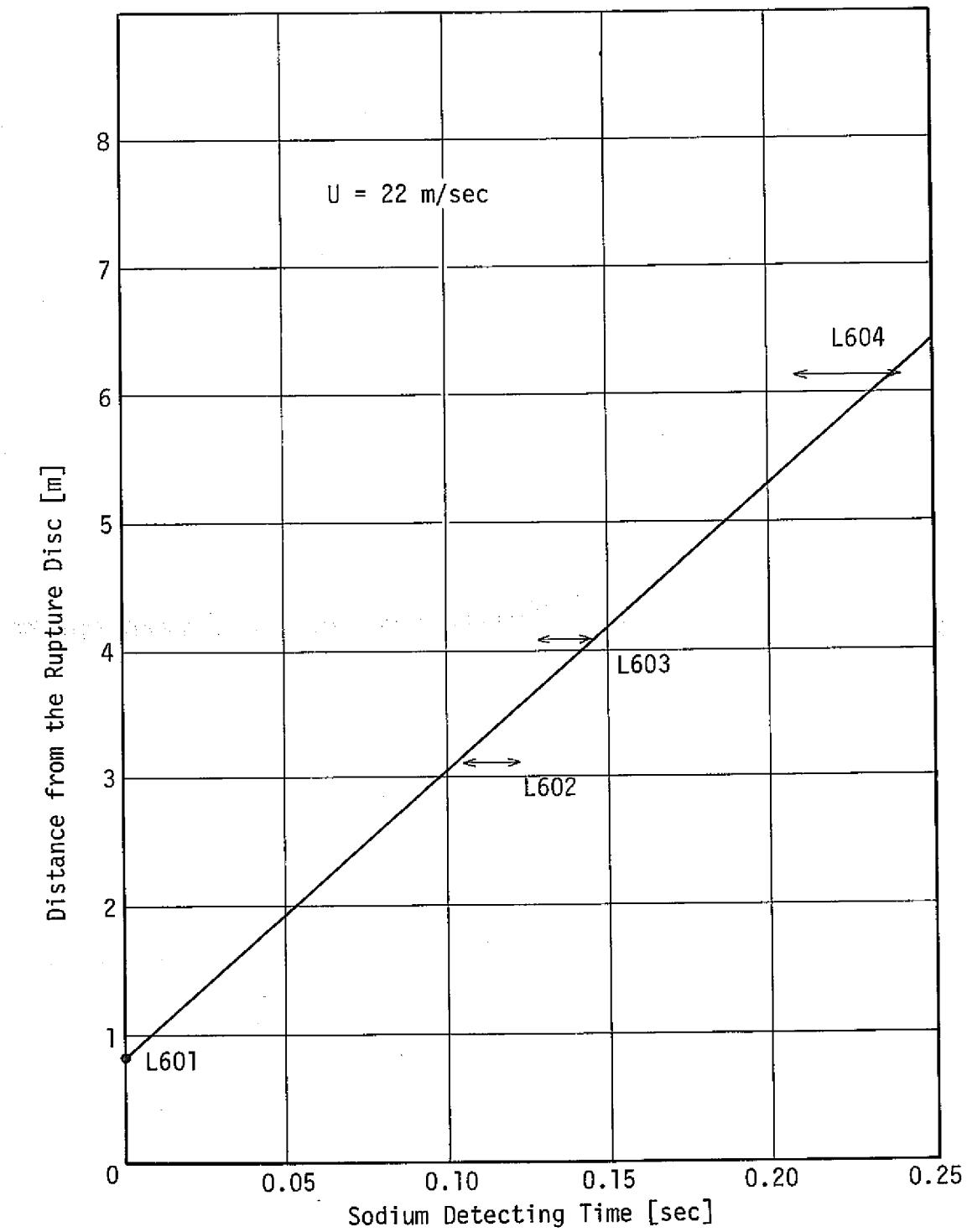


Fig. 3.1.8 Sodium Velocity derived from Sodium Detection Time.

Void Fraction [arbitrary unit]

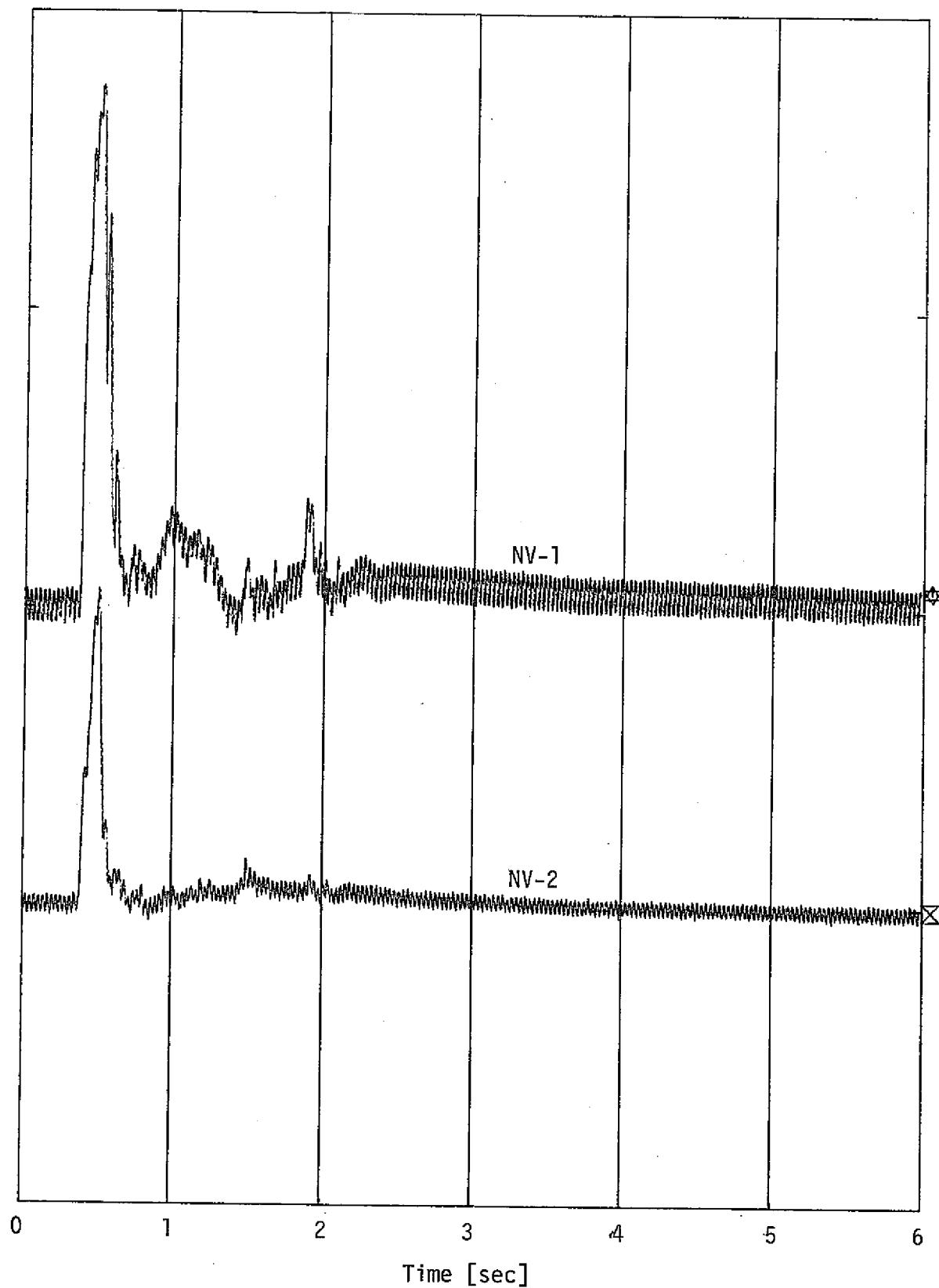


Fig. 3.1.9 Void Fraction in Pressure Relief Piping

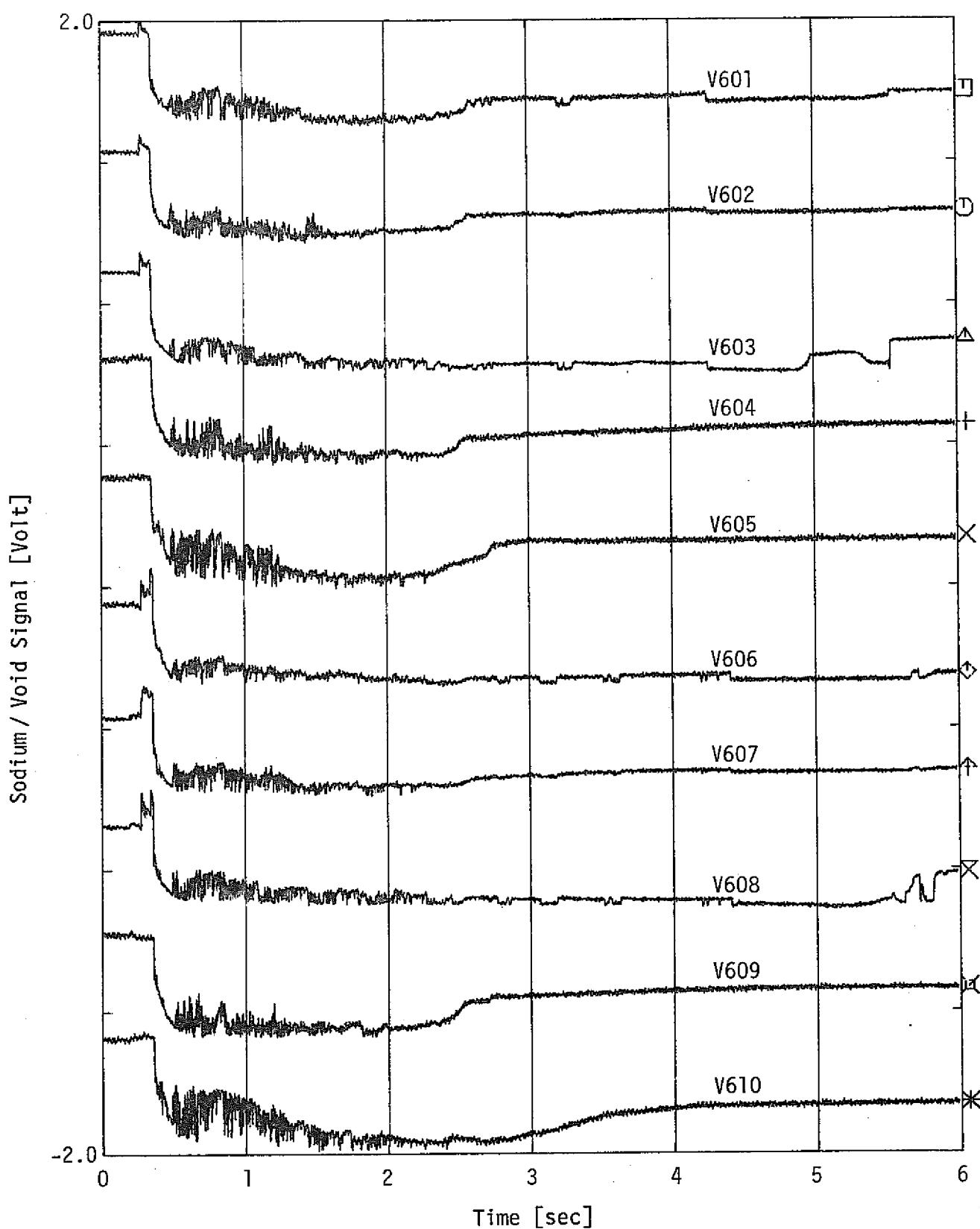


Fig. 3.1.10(a) The Results of Sodium Void Sensor

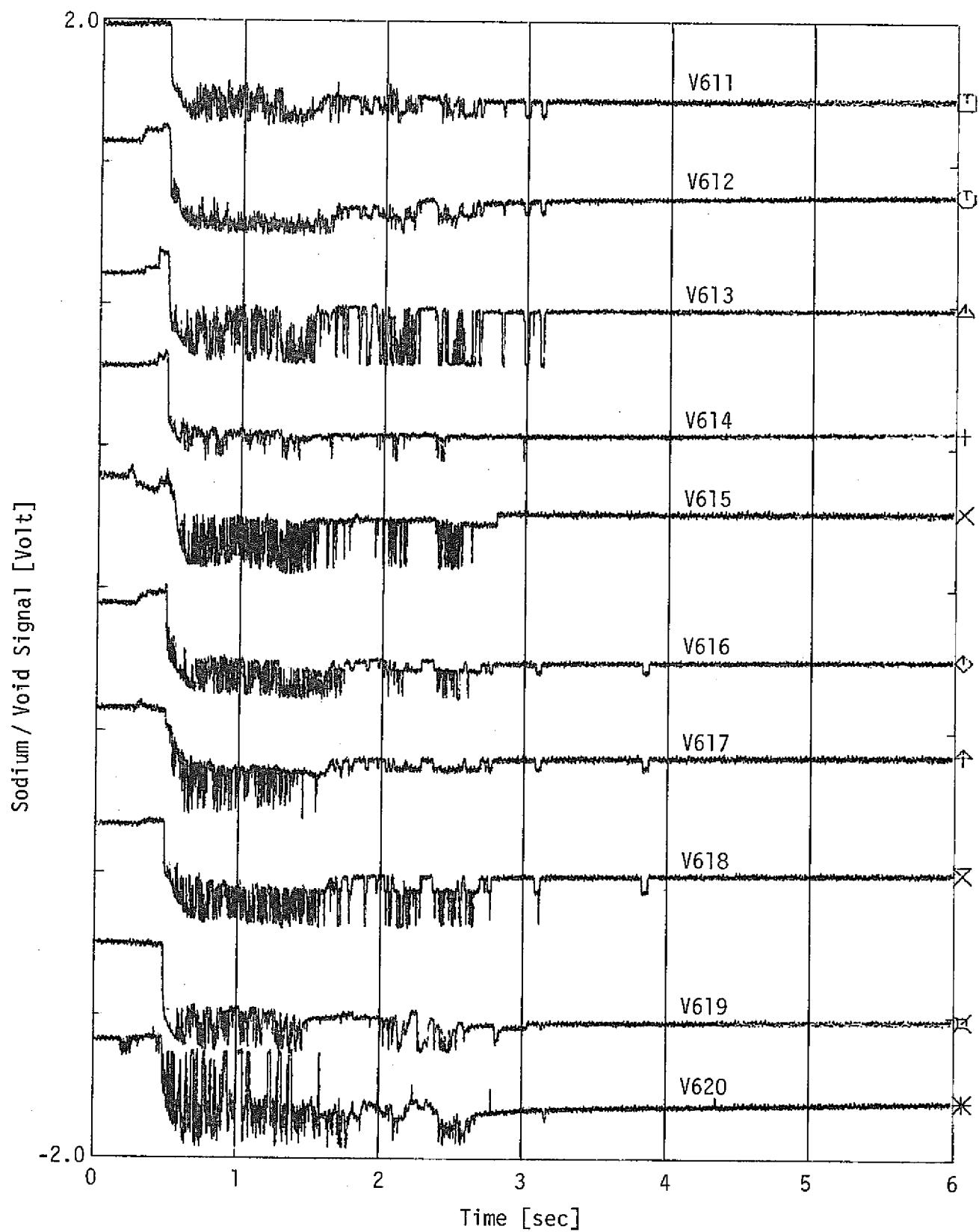


Fig. 3.1.10(b) The Results of Sodium Void Sensor

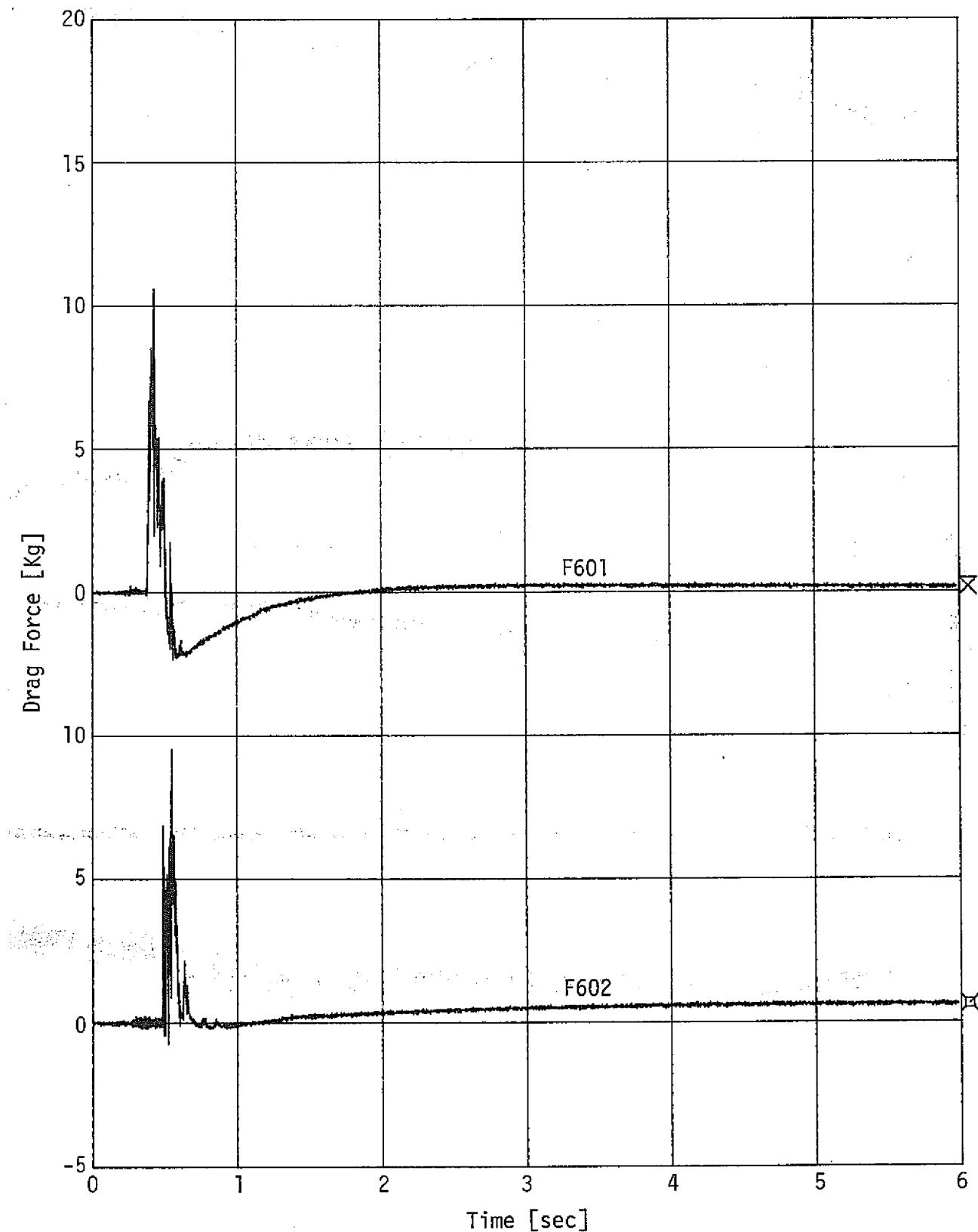


Fig. 3.1.11. Drag Force in Pressure Relief Piping

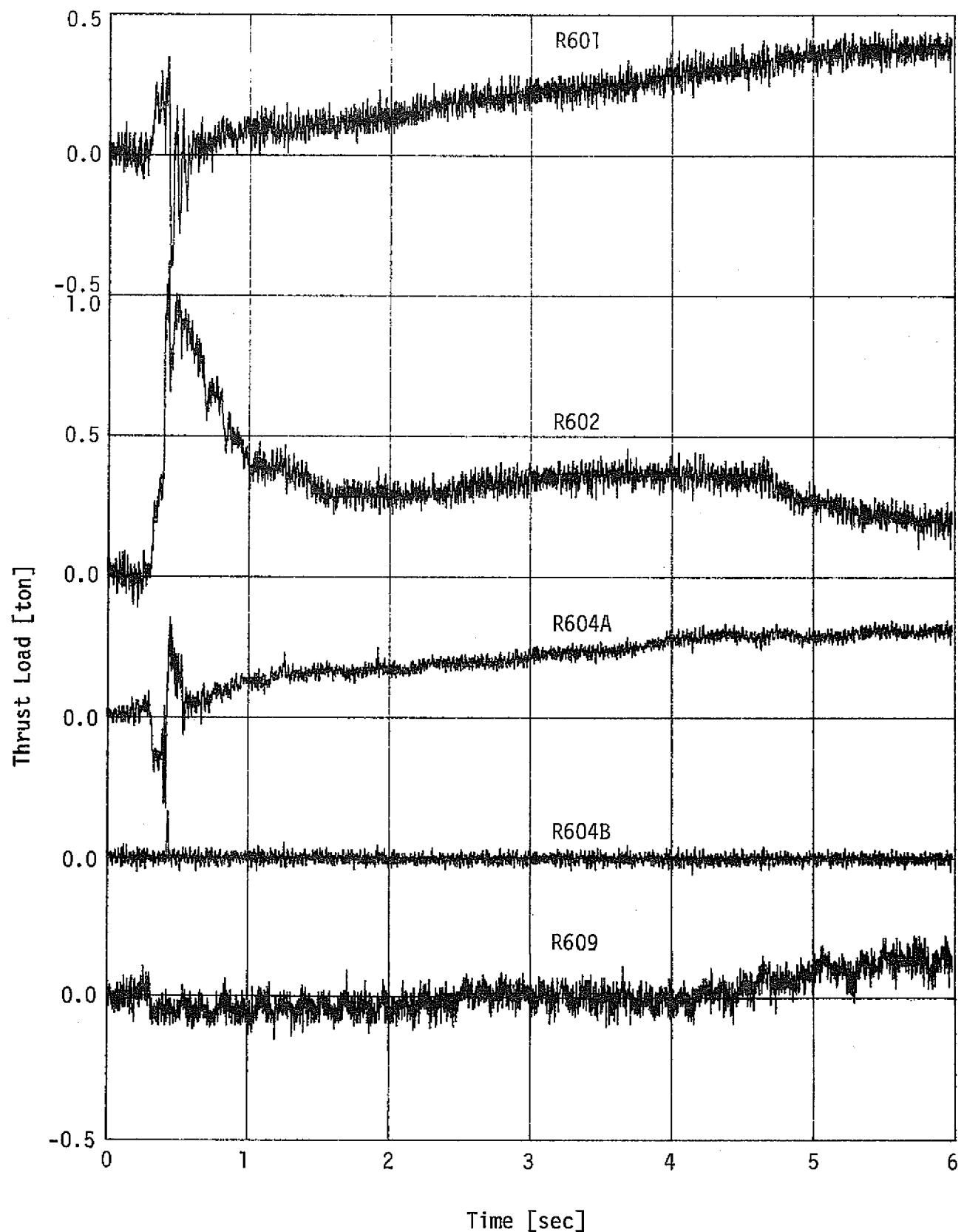


Fig. 3.1.12(a) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

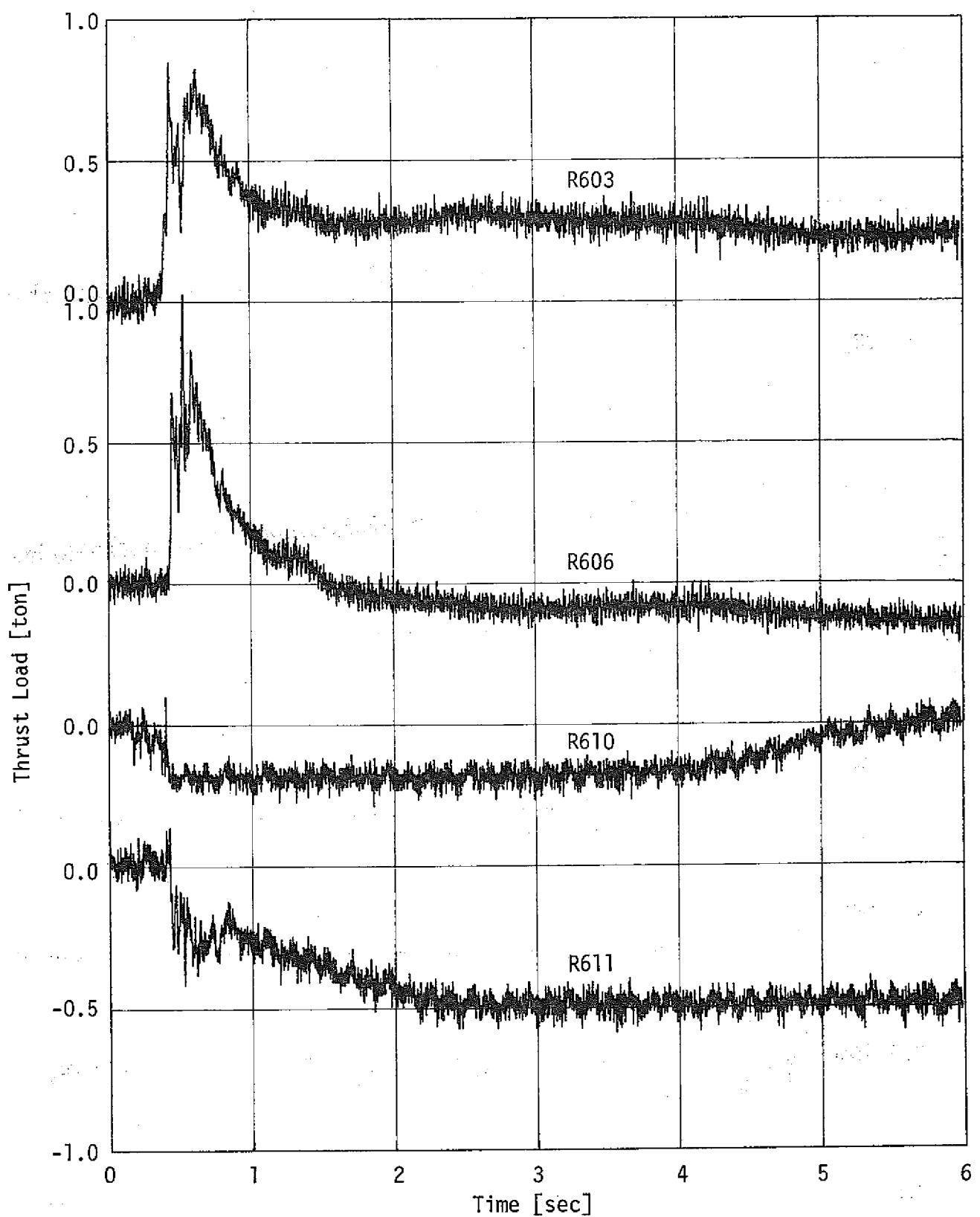


Fig. 3.1.12(b) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

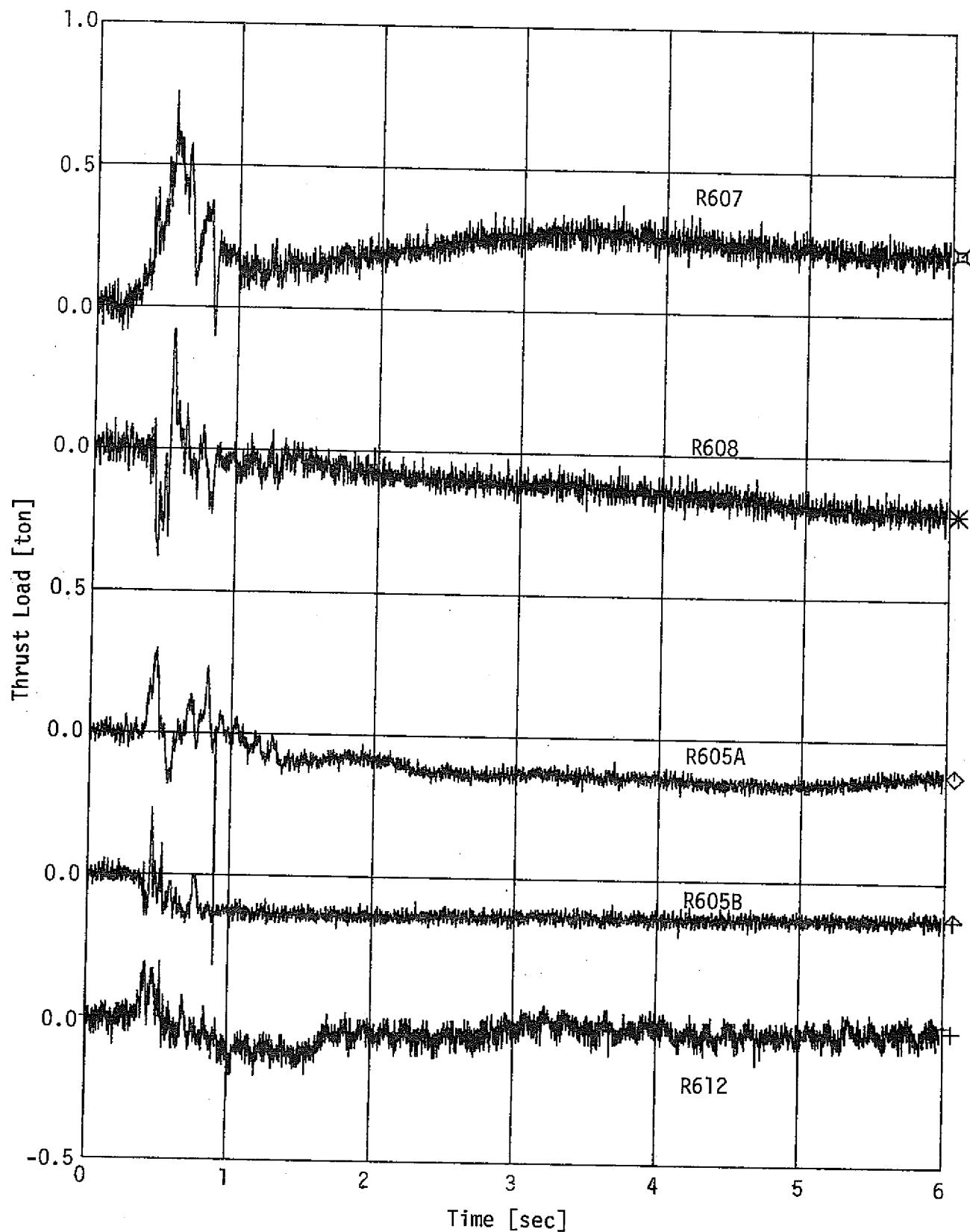


Fig. 3.1.12(c) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

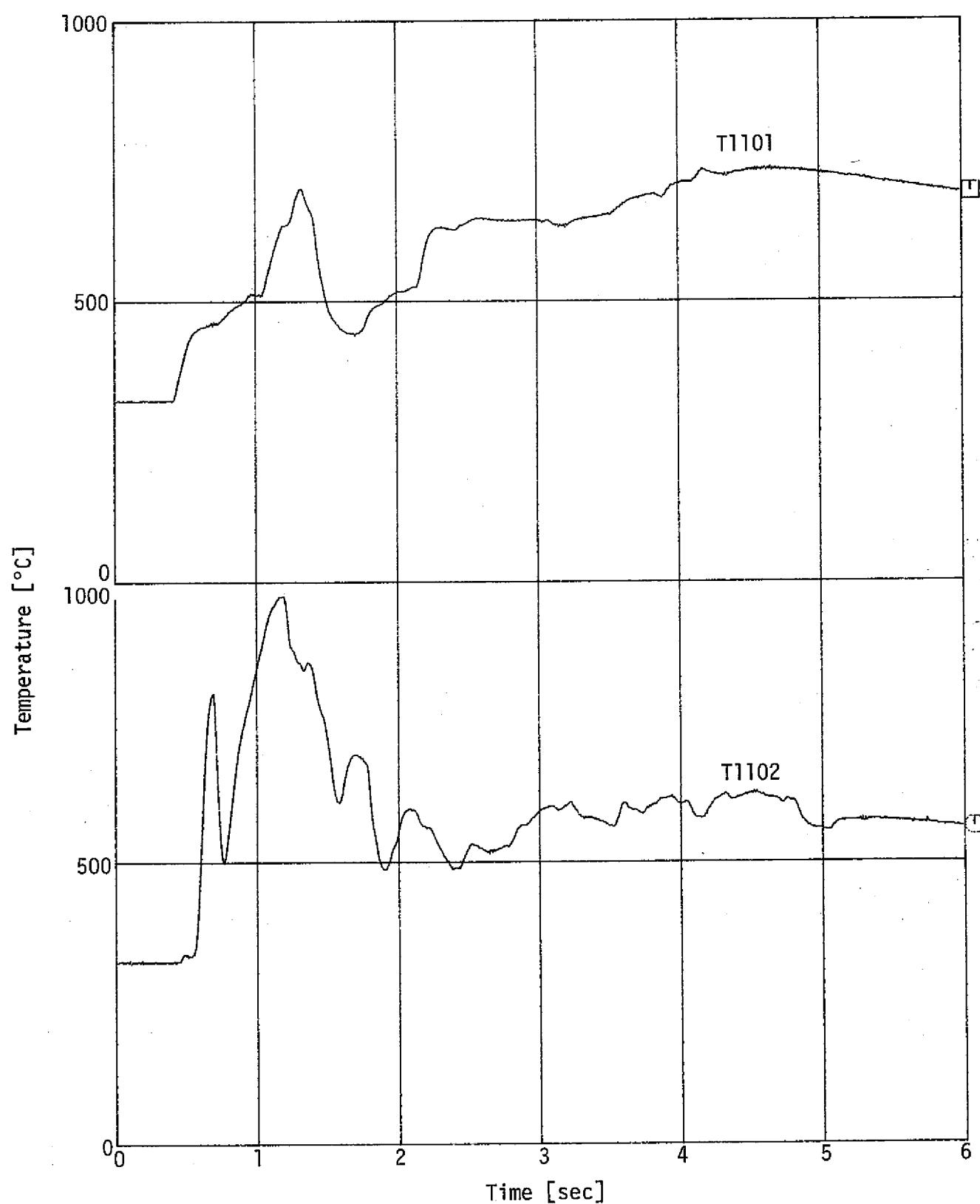


Fig. 3.1.13 Temperatures in Reaction Vessel

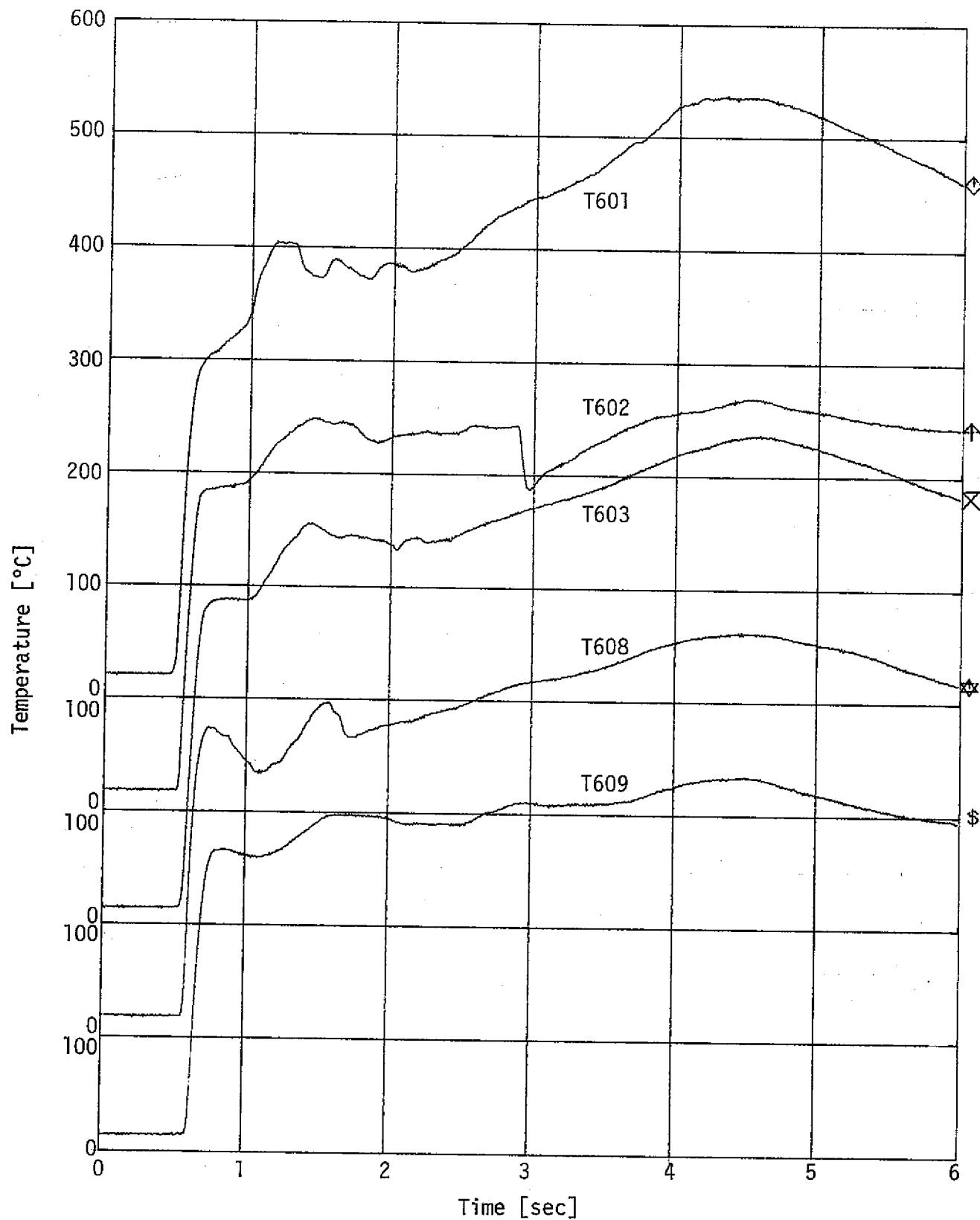


Fig. 3.1.14(a) Temperatures in Pressure Relief Line

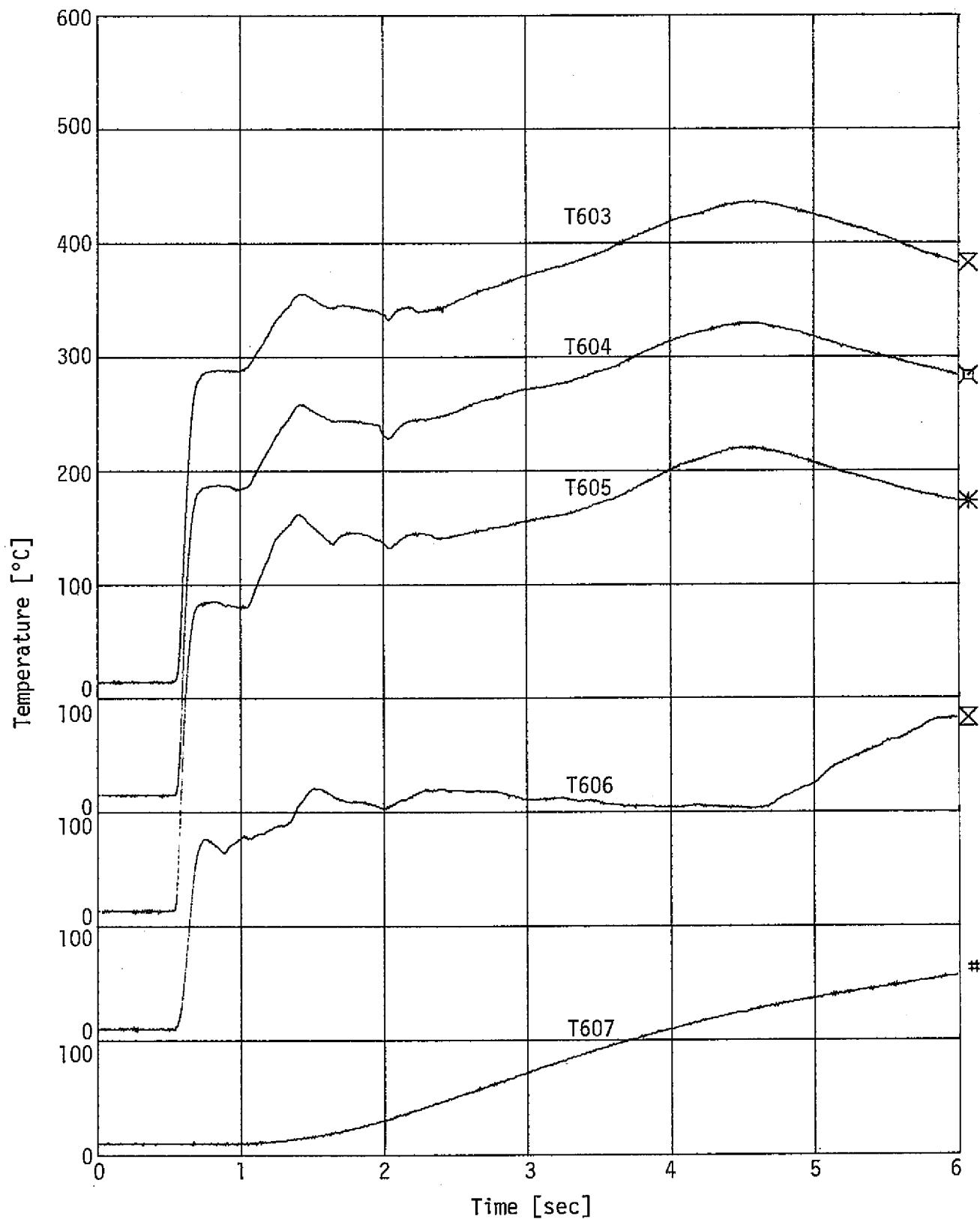


Fig. 3.1.14(b) Temperatures in Pressure Relief Line

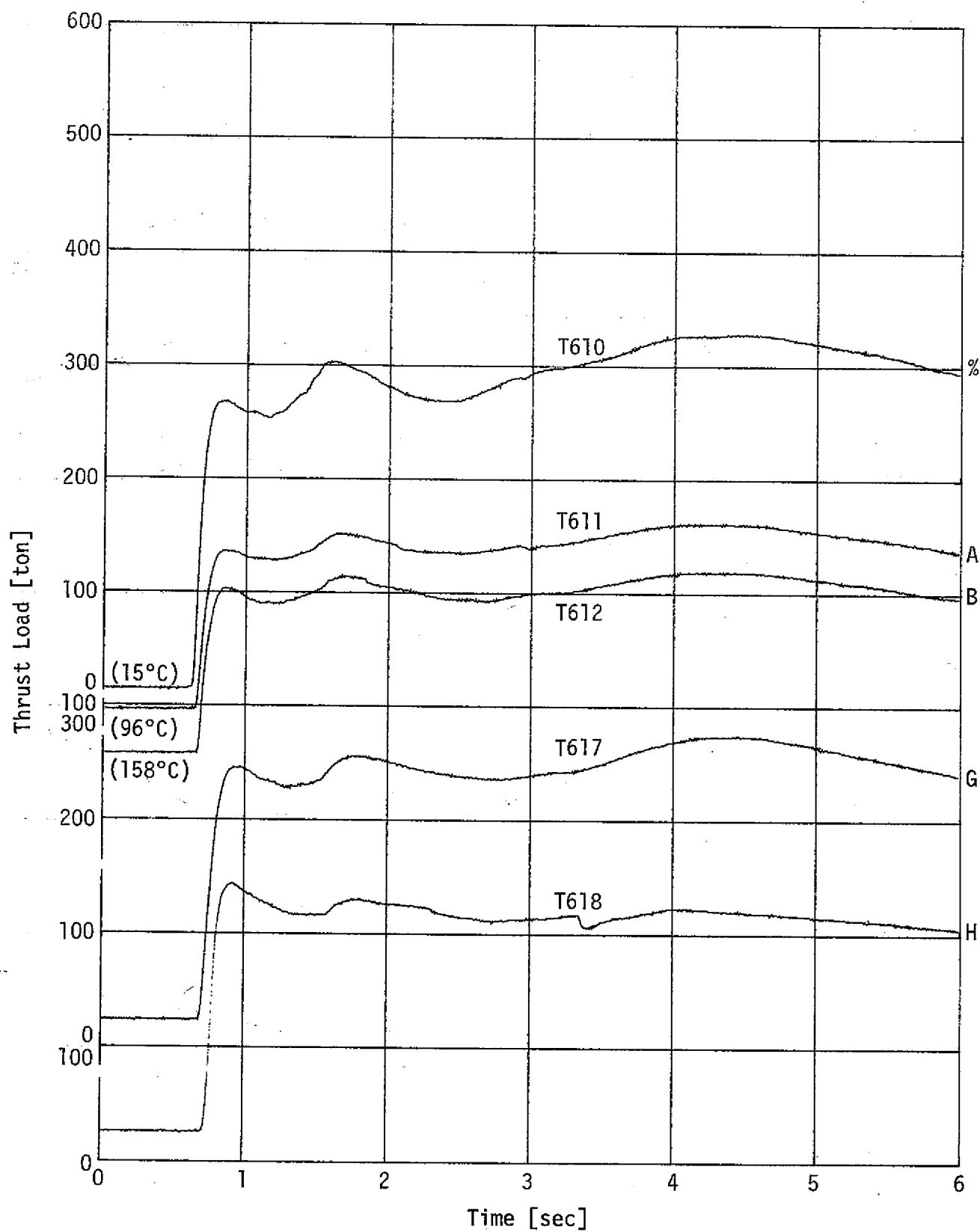


Fig. 3.1.14(c) Temperatures in Pressure Relief Line

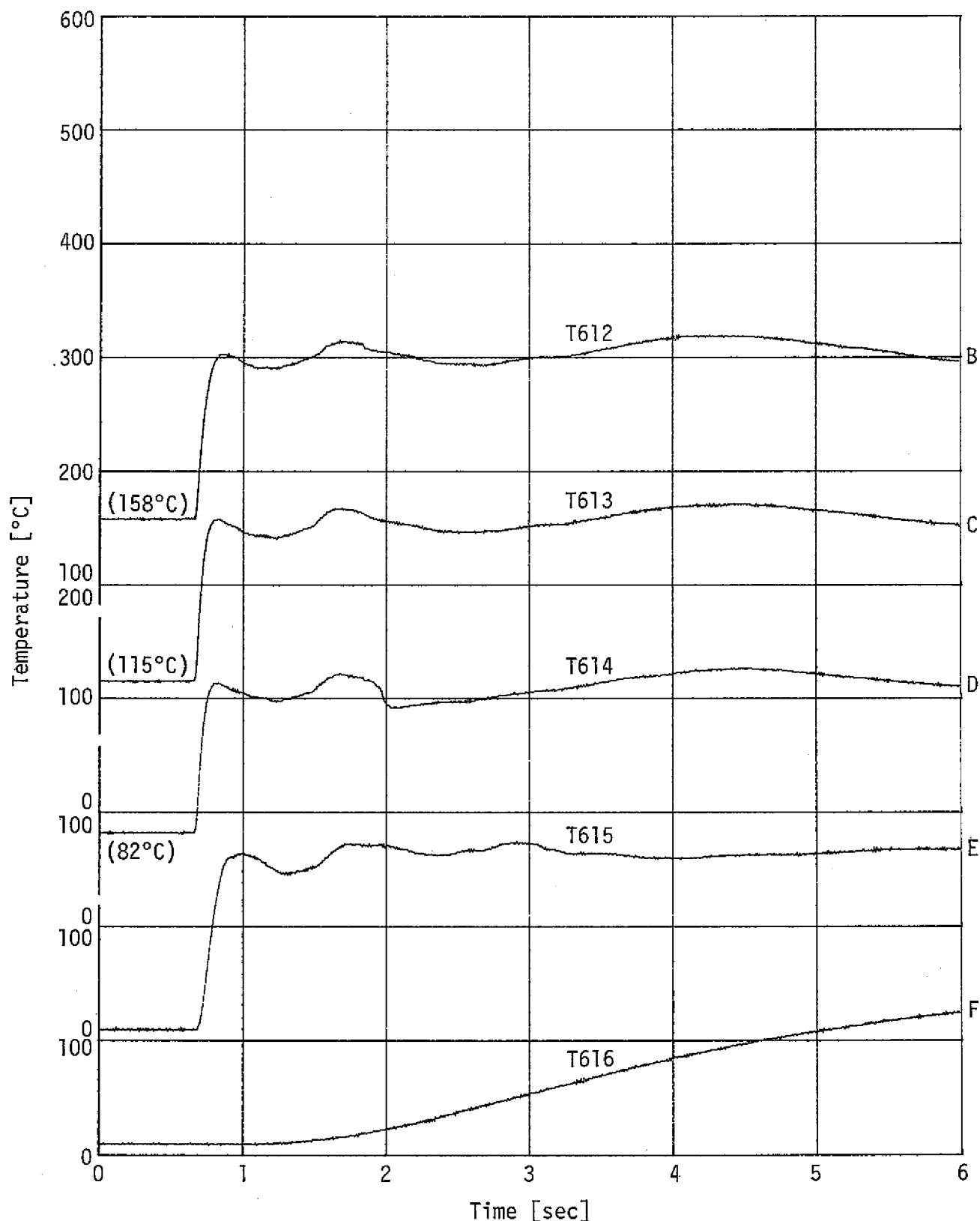


Fig. 3.1.14(d) Temperatures in Pressure Relief Line

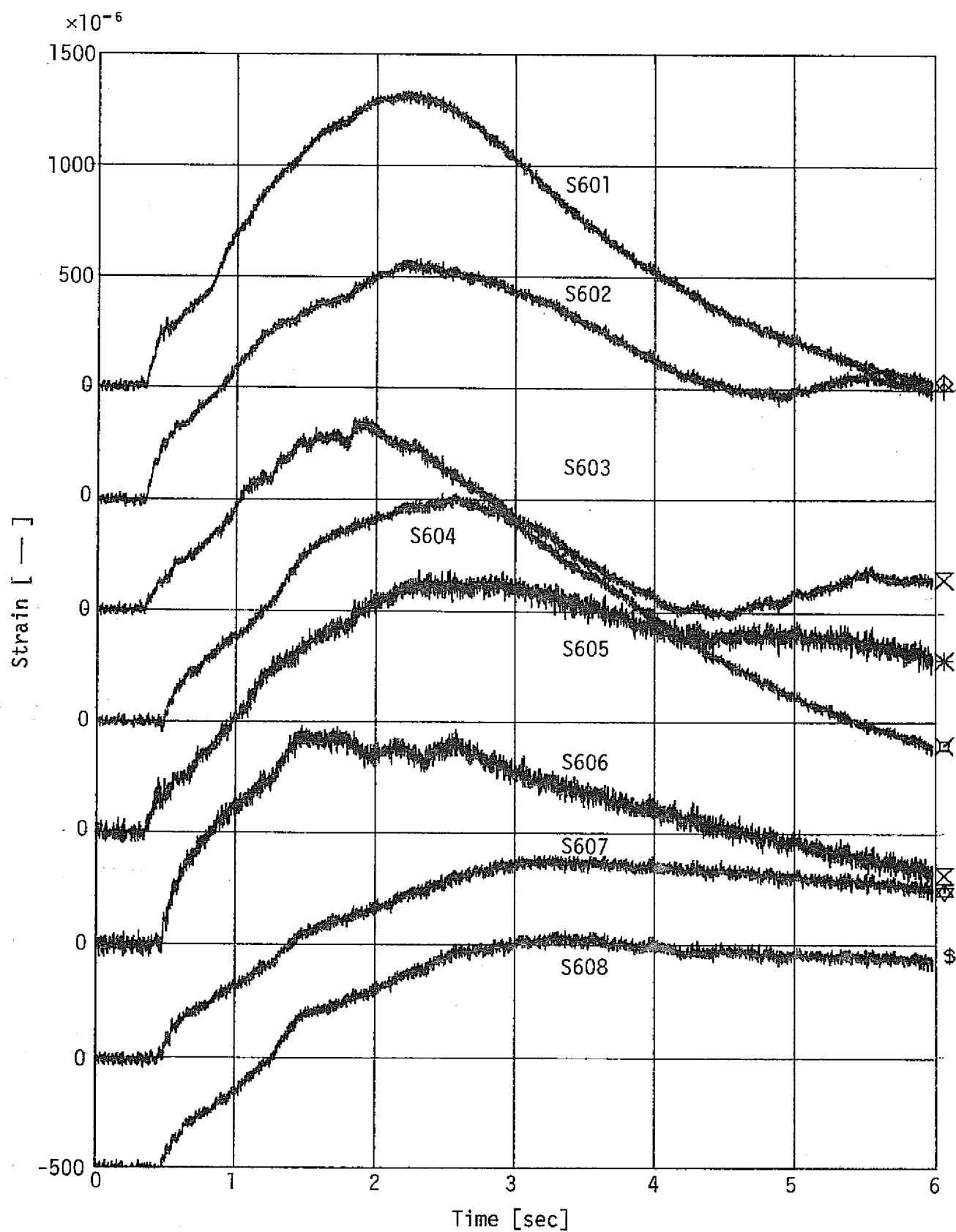


Fig. 3.1.15 Strains on Pressure Relief Piping

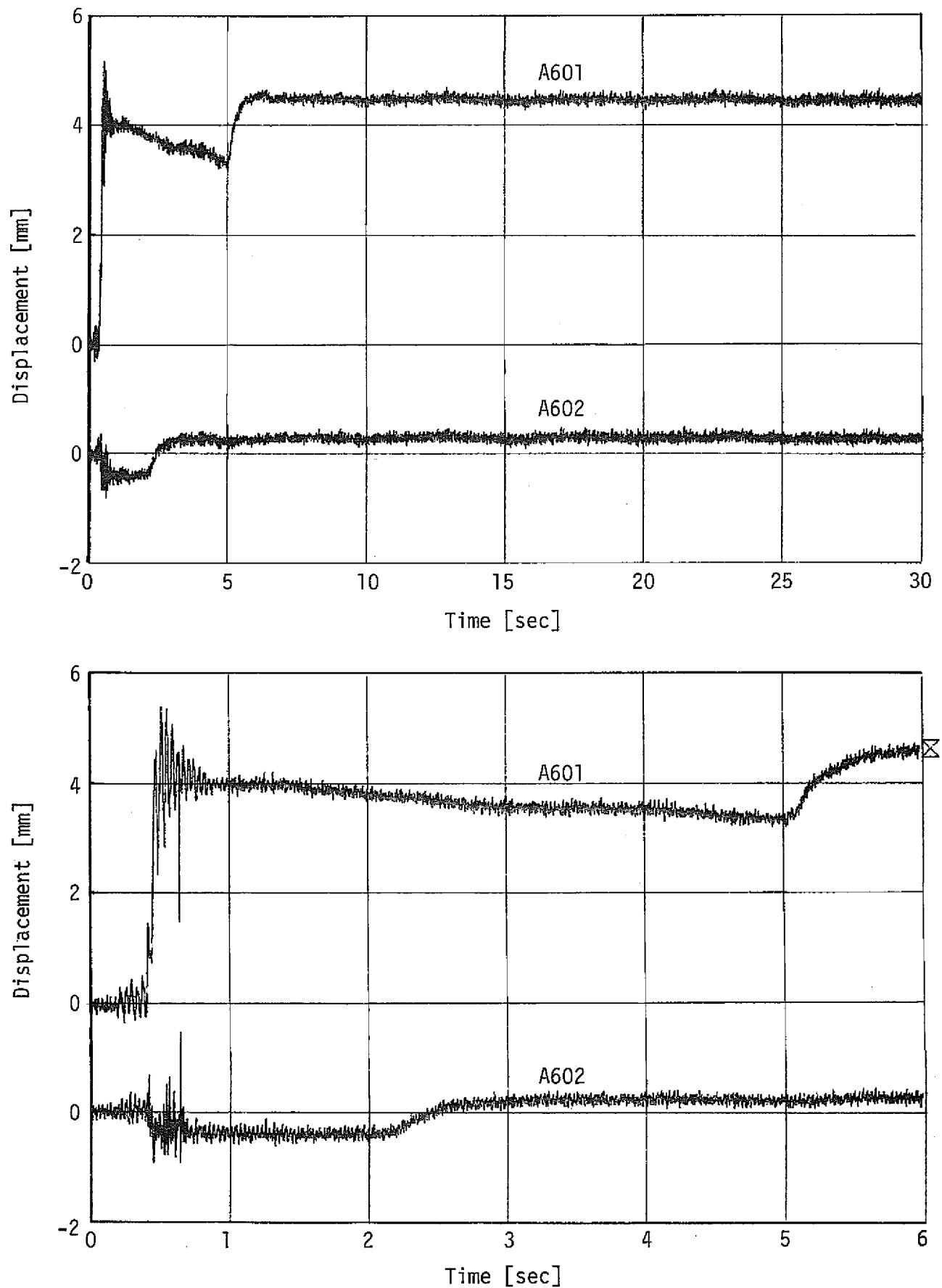


Fig. 3.1.16 Displacement of Pressure Relief Piping

Run-92 試 驗 結 果

Fig.3.2.1

}

Fig.3.2.15

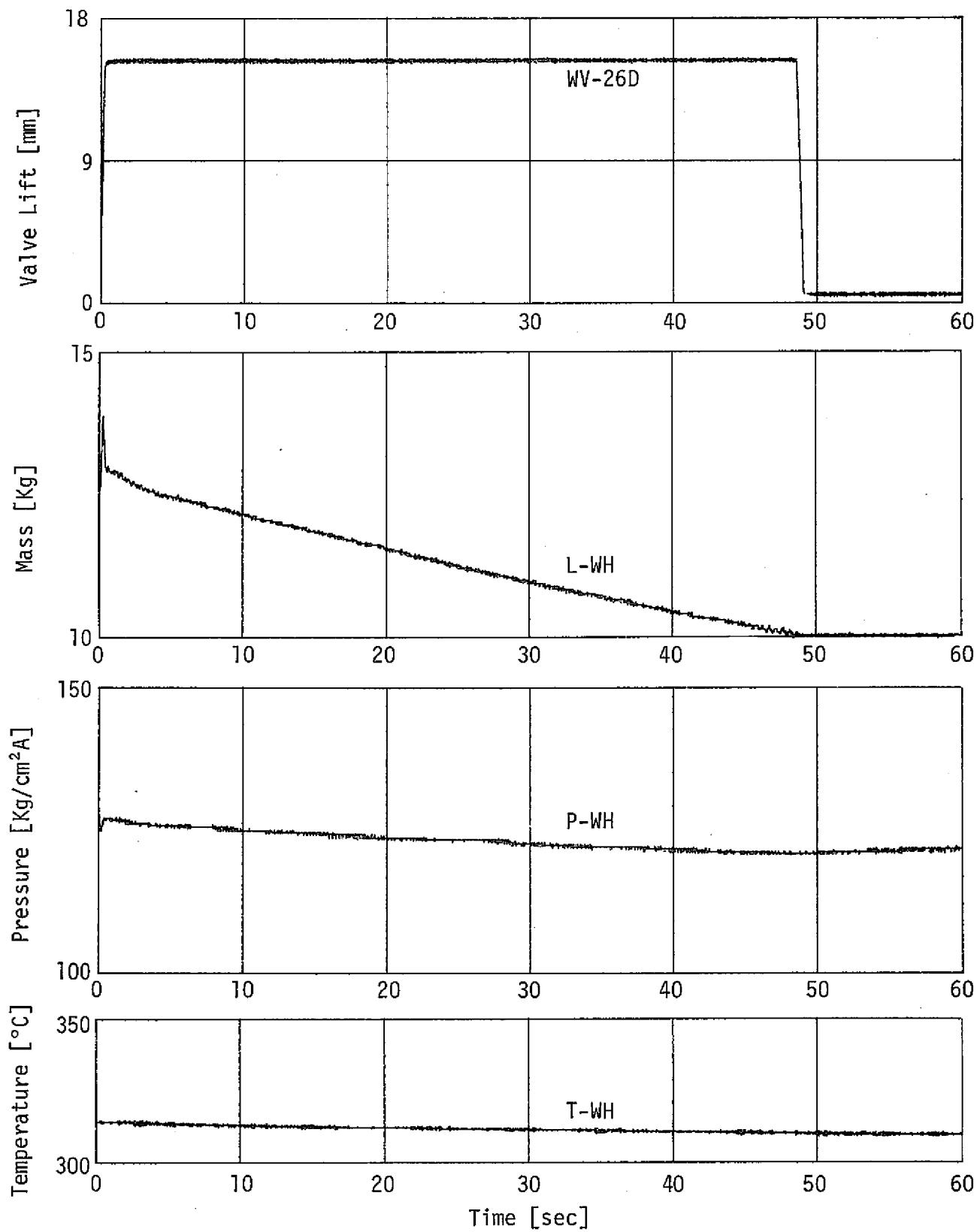


Fig. 3.2.1 Water Heater Conditions and Water Injection Valve Opening

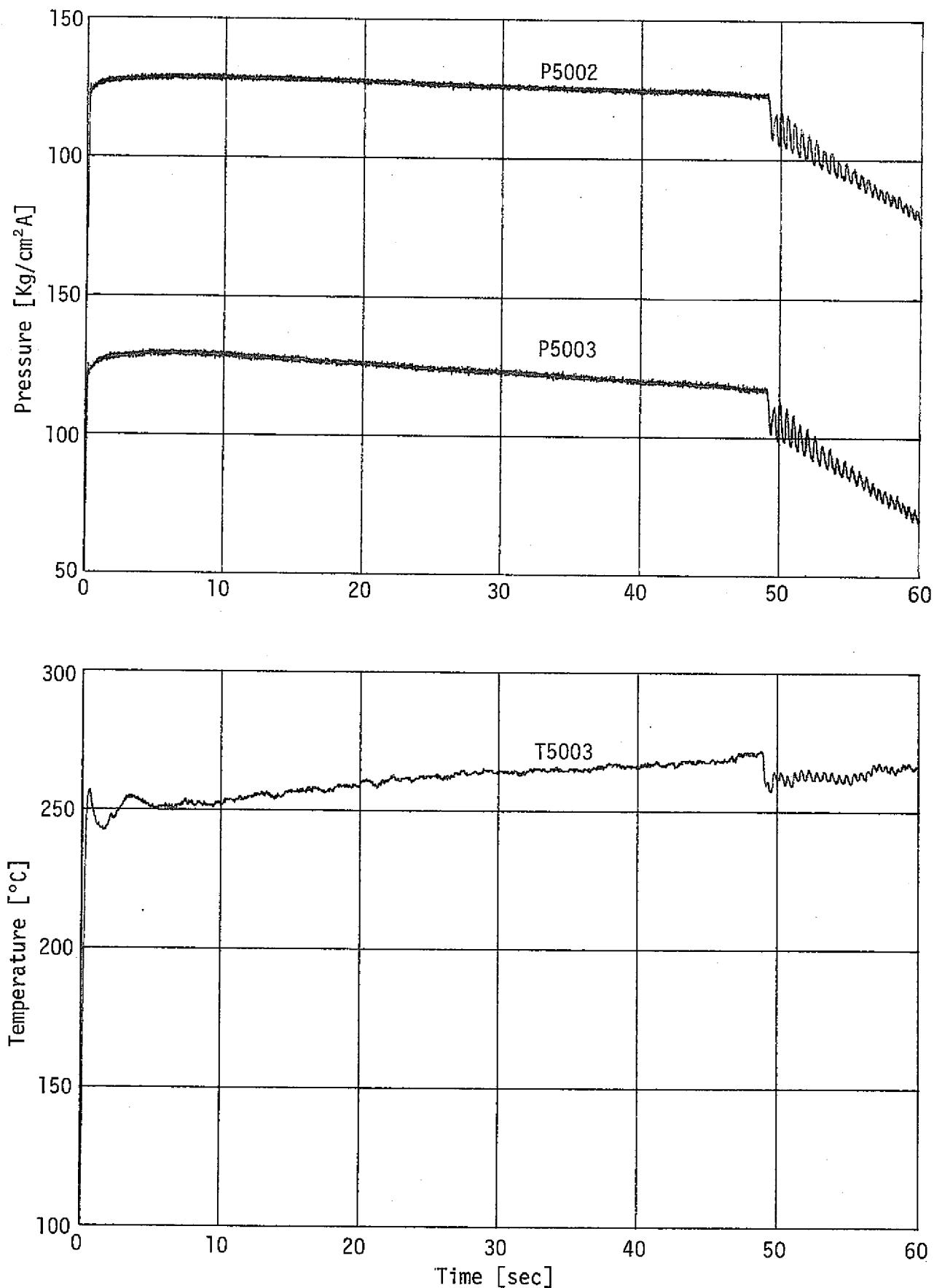


Fig. 3.2.2 Temperature and Pressure in Water Injection Line

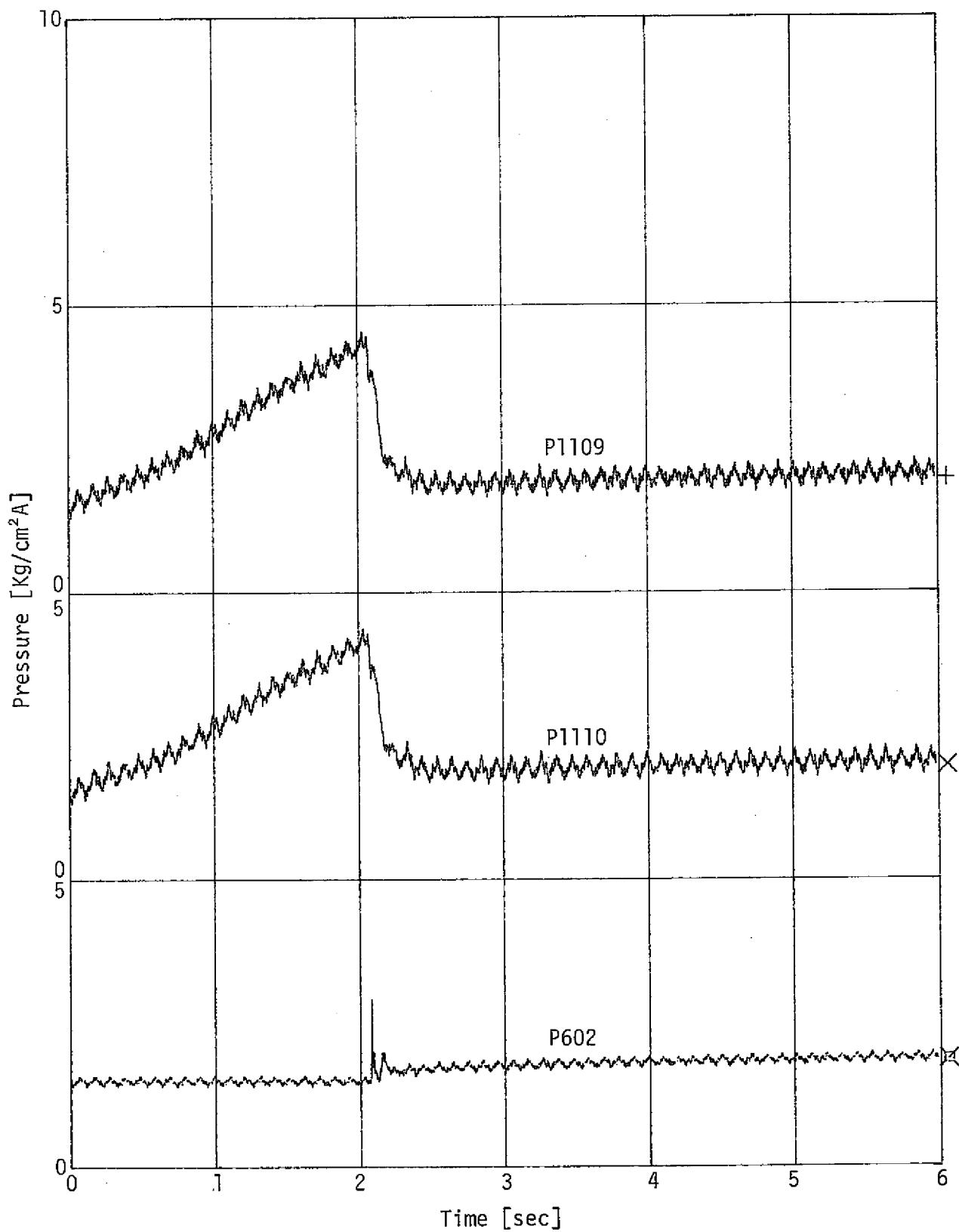


Fig. 3.2.3(a) Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line

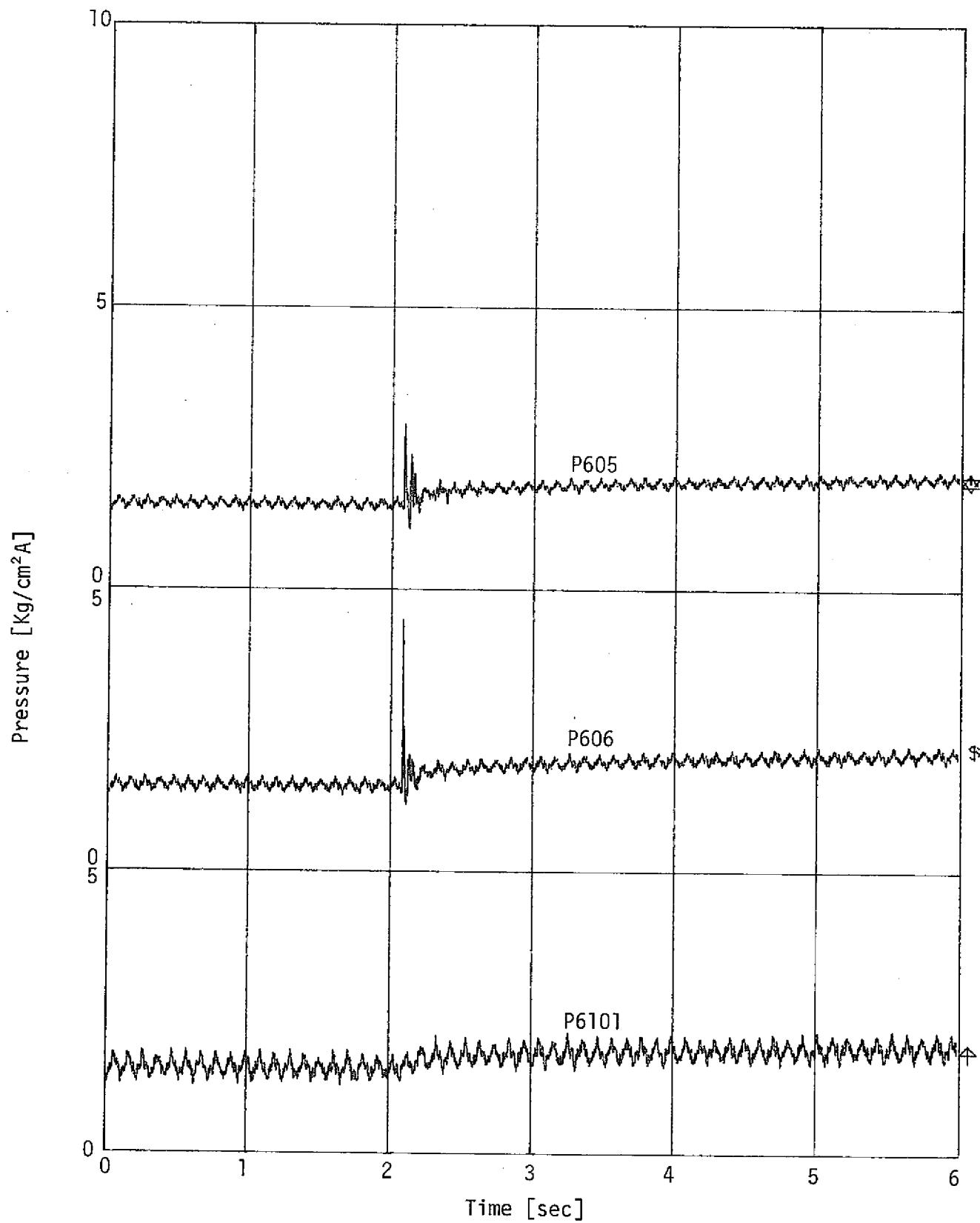


Fig. 3.2.3(b) Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line

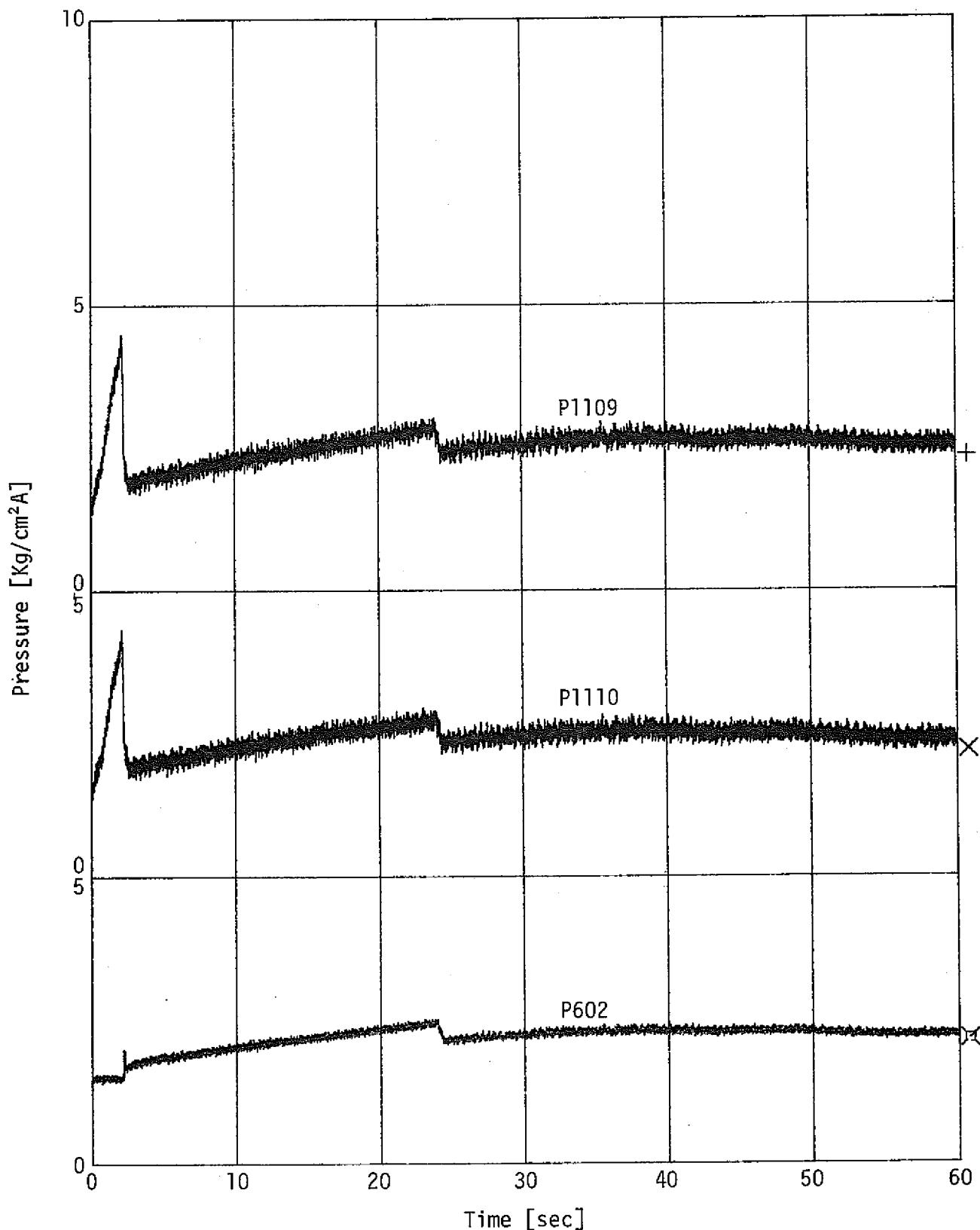


Fig. 3.2.3(c) Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line

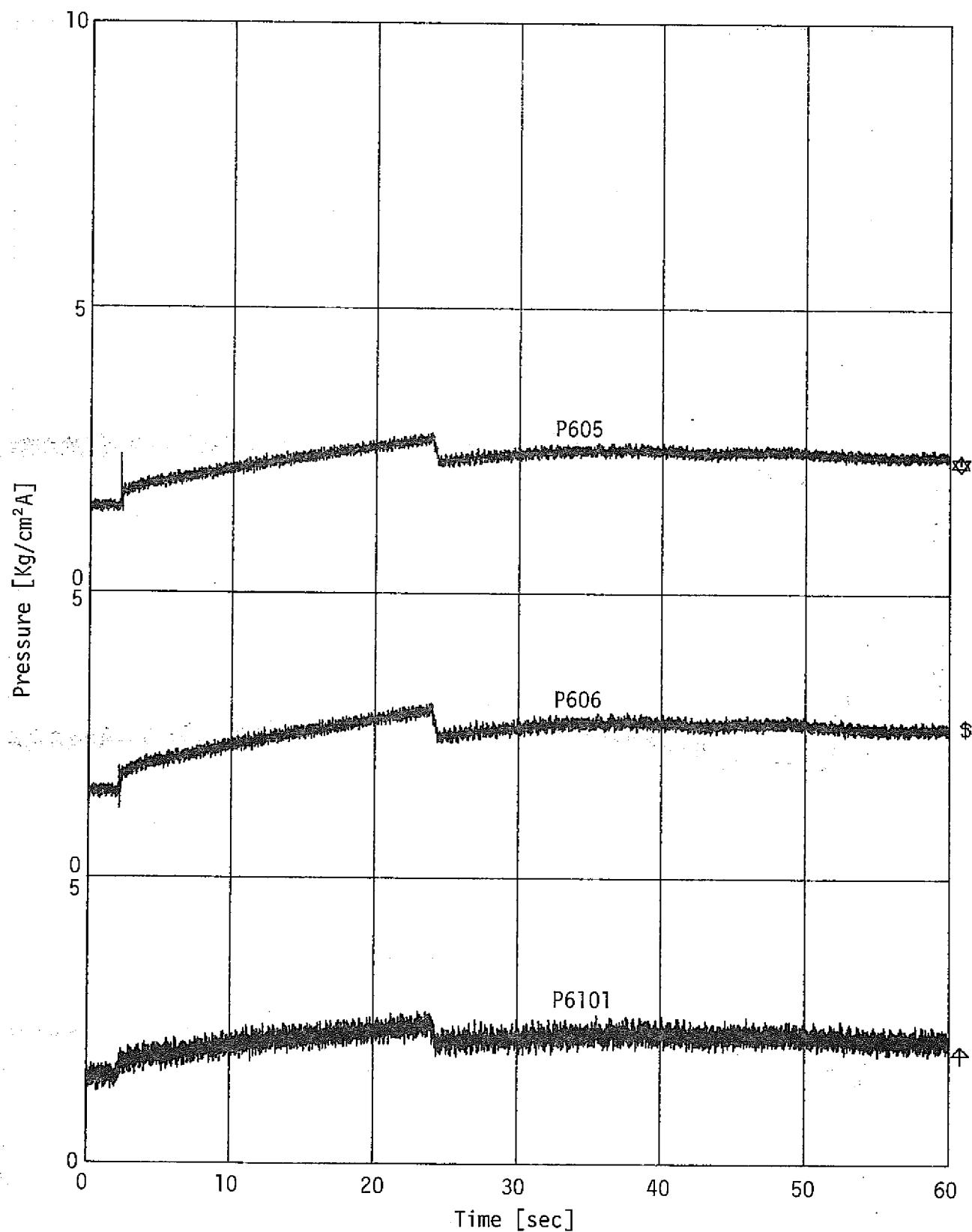


Fig. 3.2.3(d) Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line

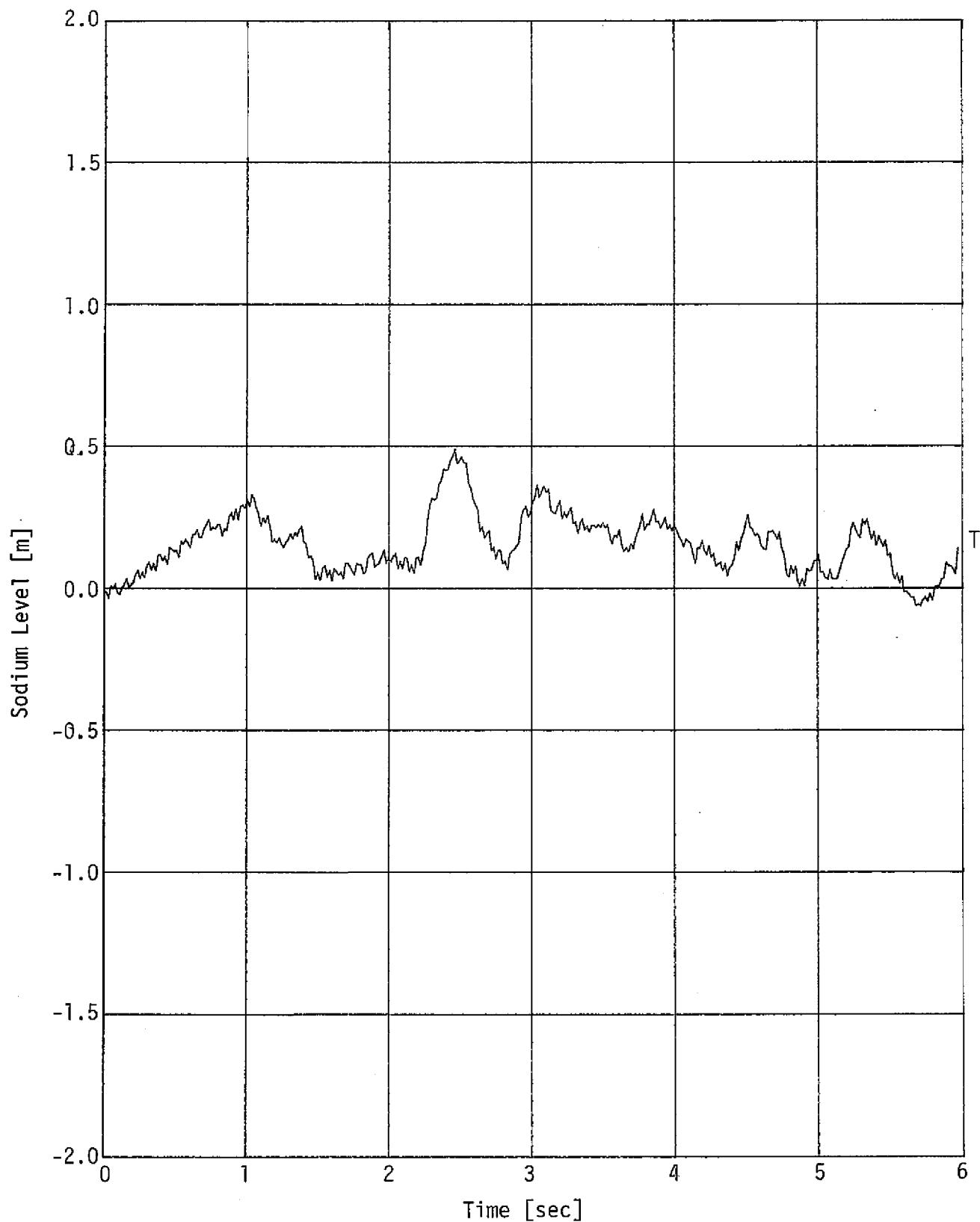


Fig. 3.2.4(a) Sodium Level in Reaction Vessel

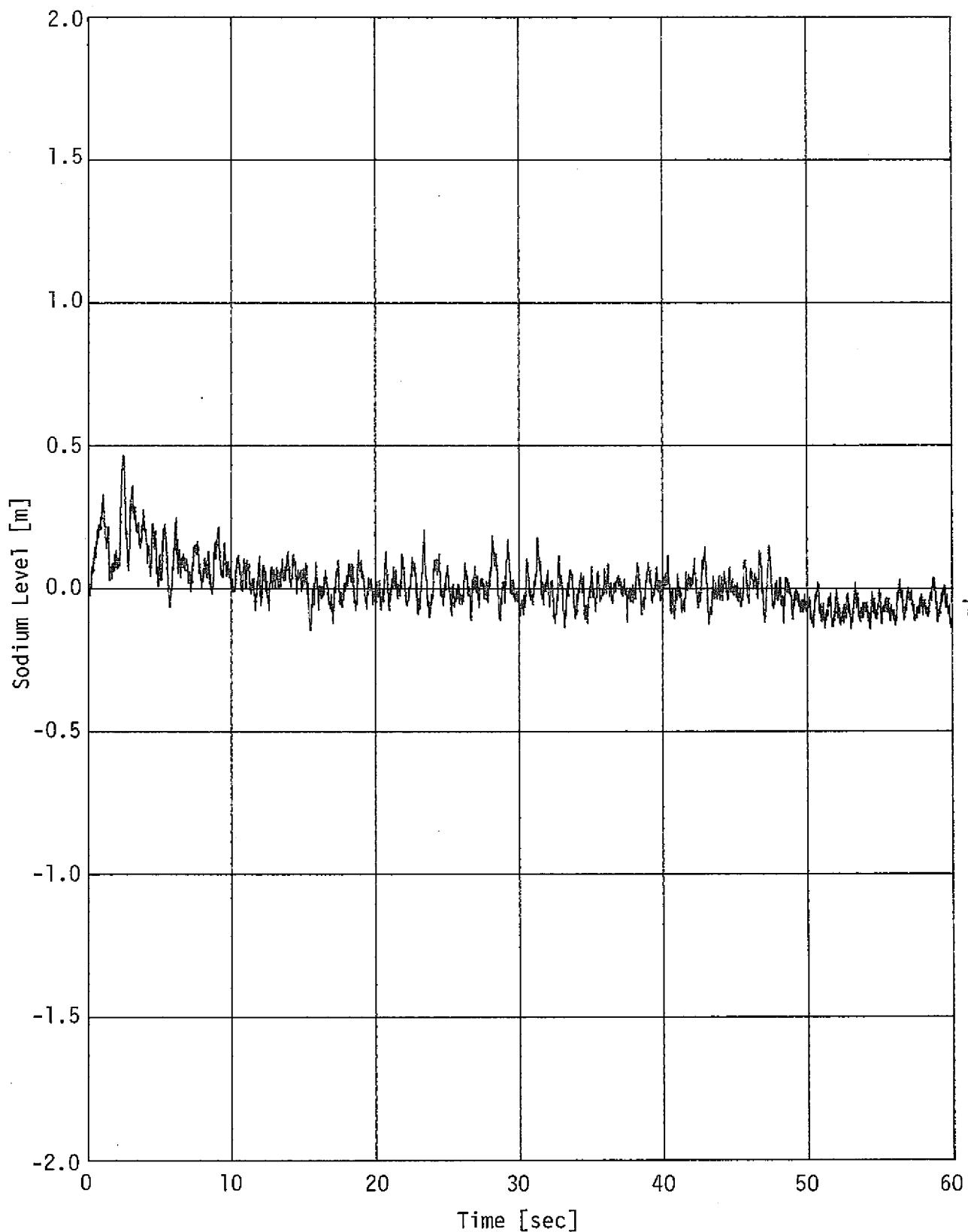


Fig. 3.2.4(b) Sodium Level in Reaction Vessel

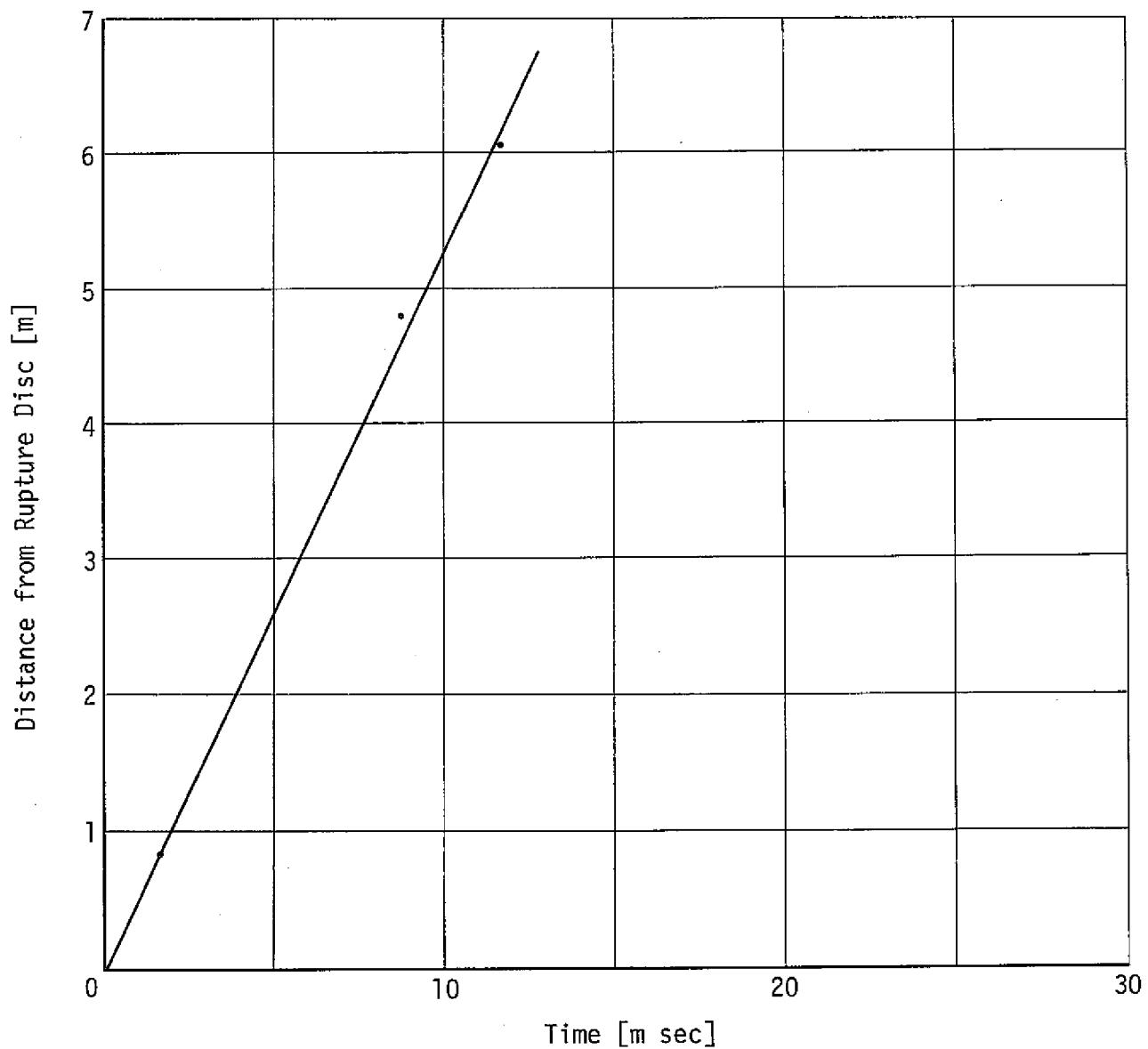


Fig. 3.2.5 Pressure Spike Propagation Velocity in Pressure Relief Line

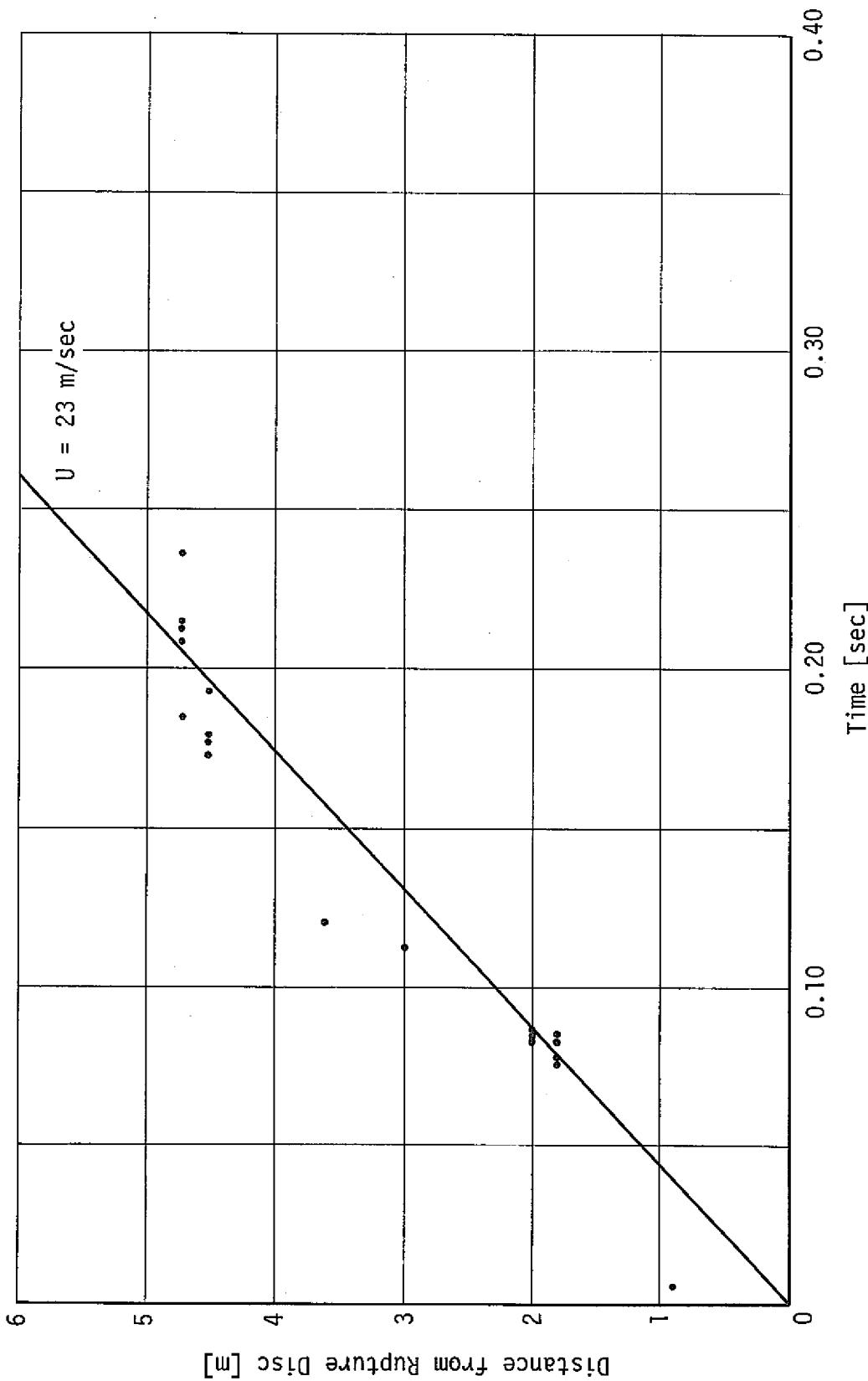


Fig. 3.2.6 Velocity derived from Sodium Void Sensors

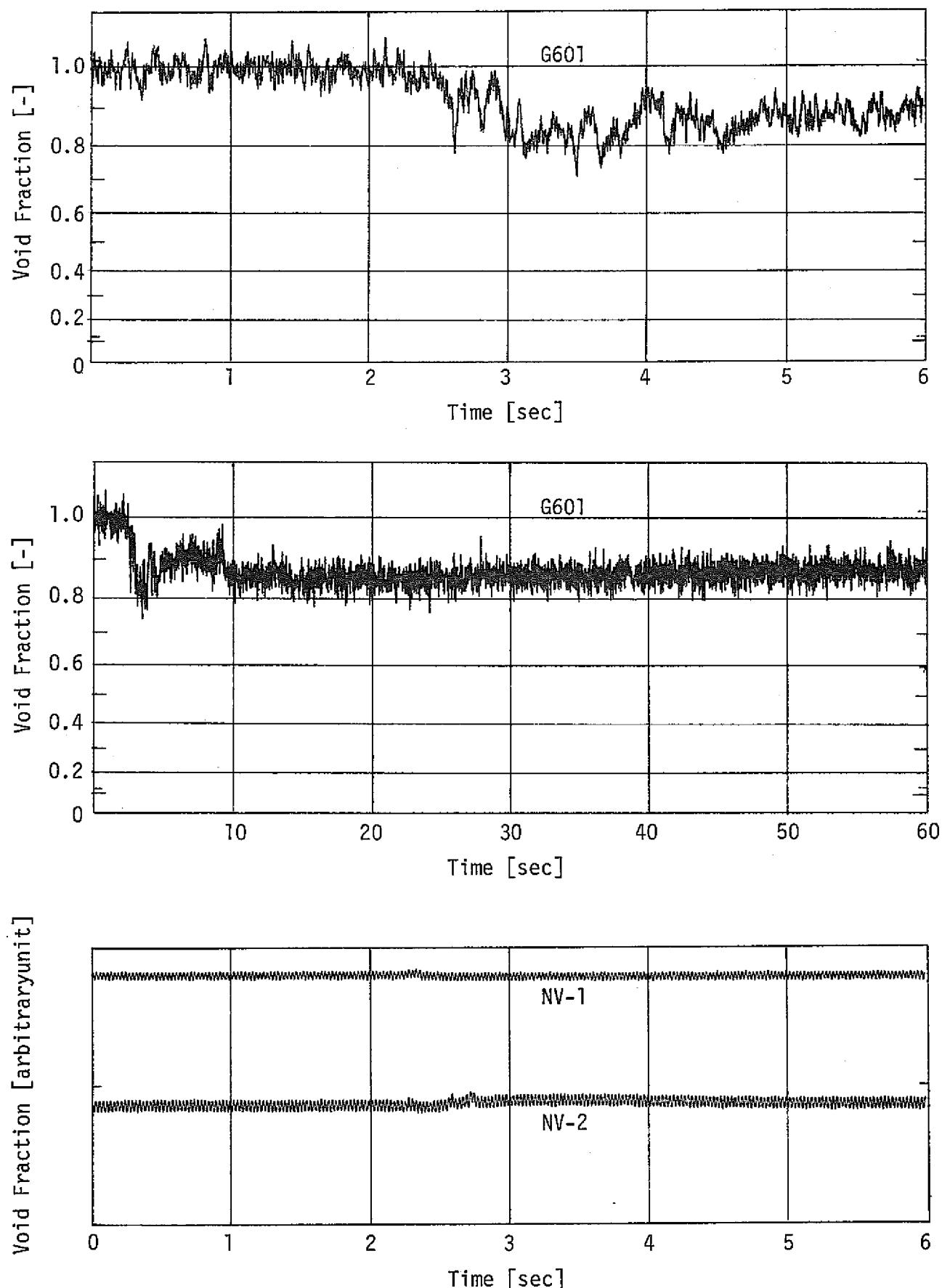


Fig. 3.2.7 Void Fraction in Pressure Relief Line

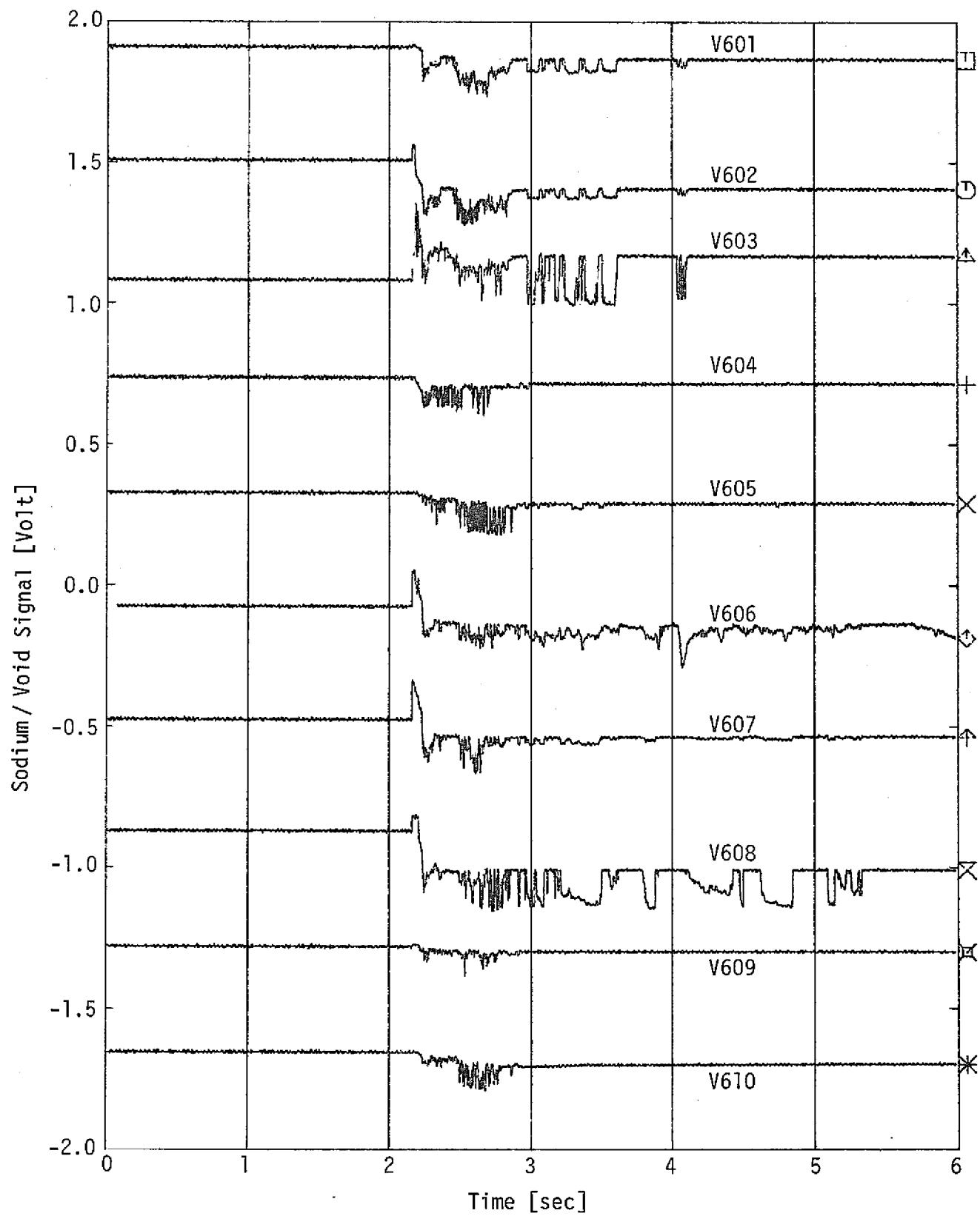


Fig. 3.2.8(a) The Results of Sodium Void Sensor

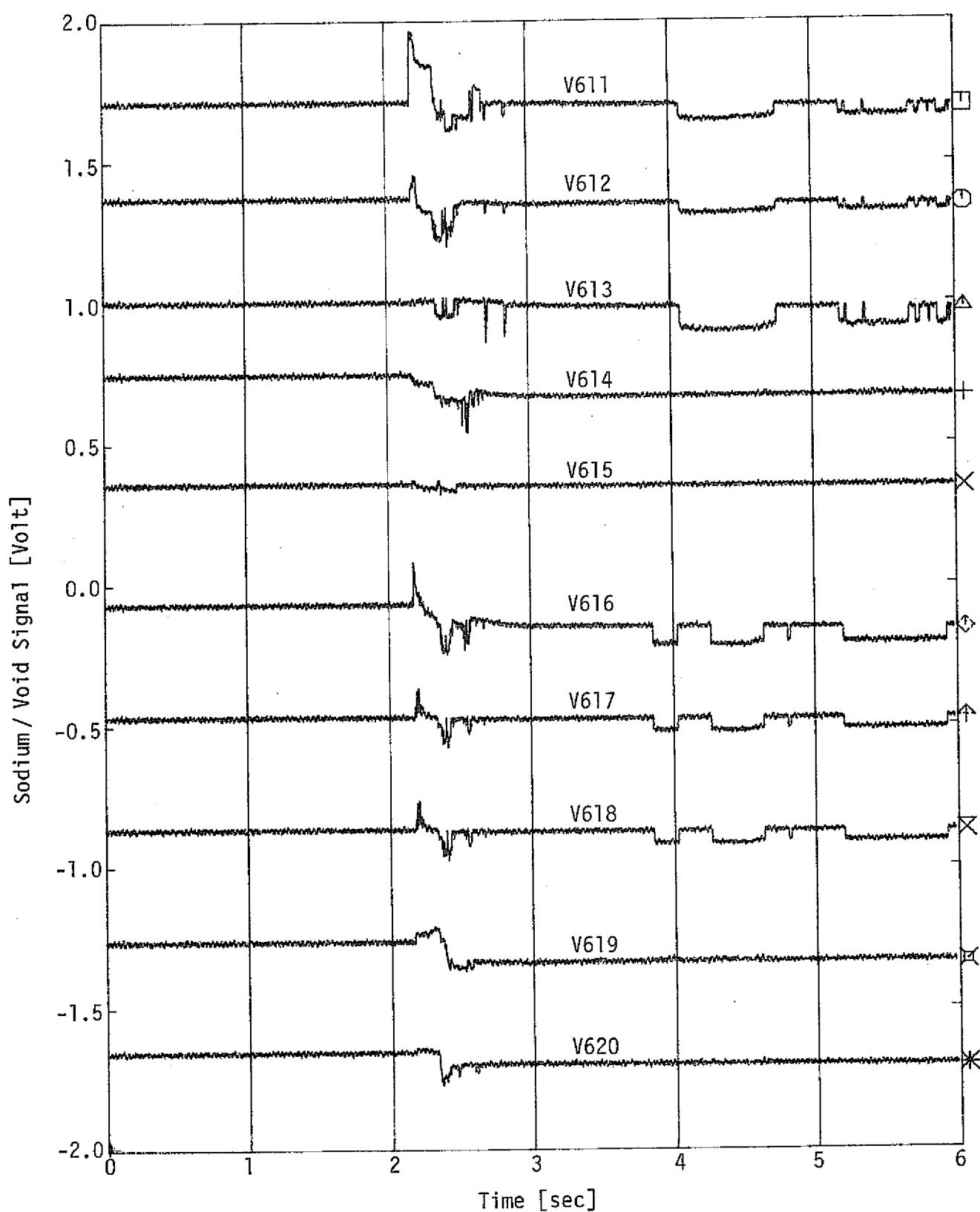


Fig. 3.2.8(b) The Results of Sodium Void Sensor

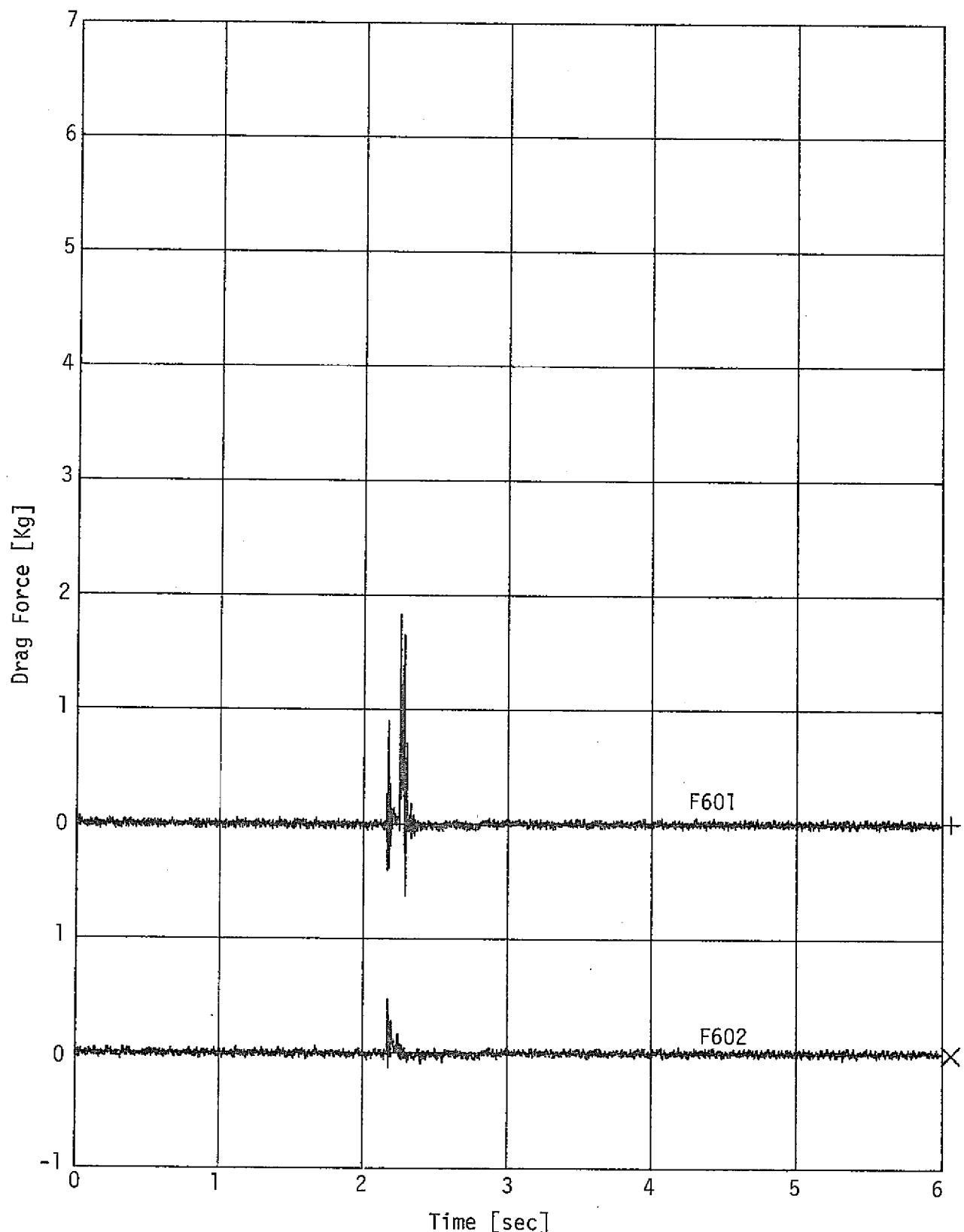


Fig. 3.2.9 Drag Force in Pressure Relief Line

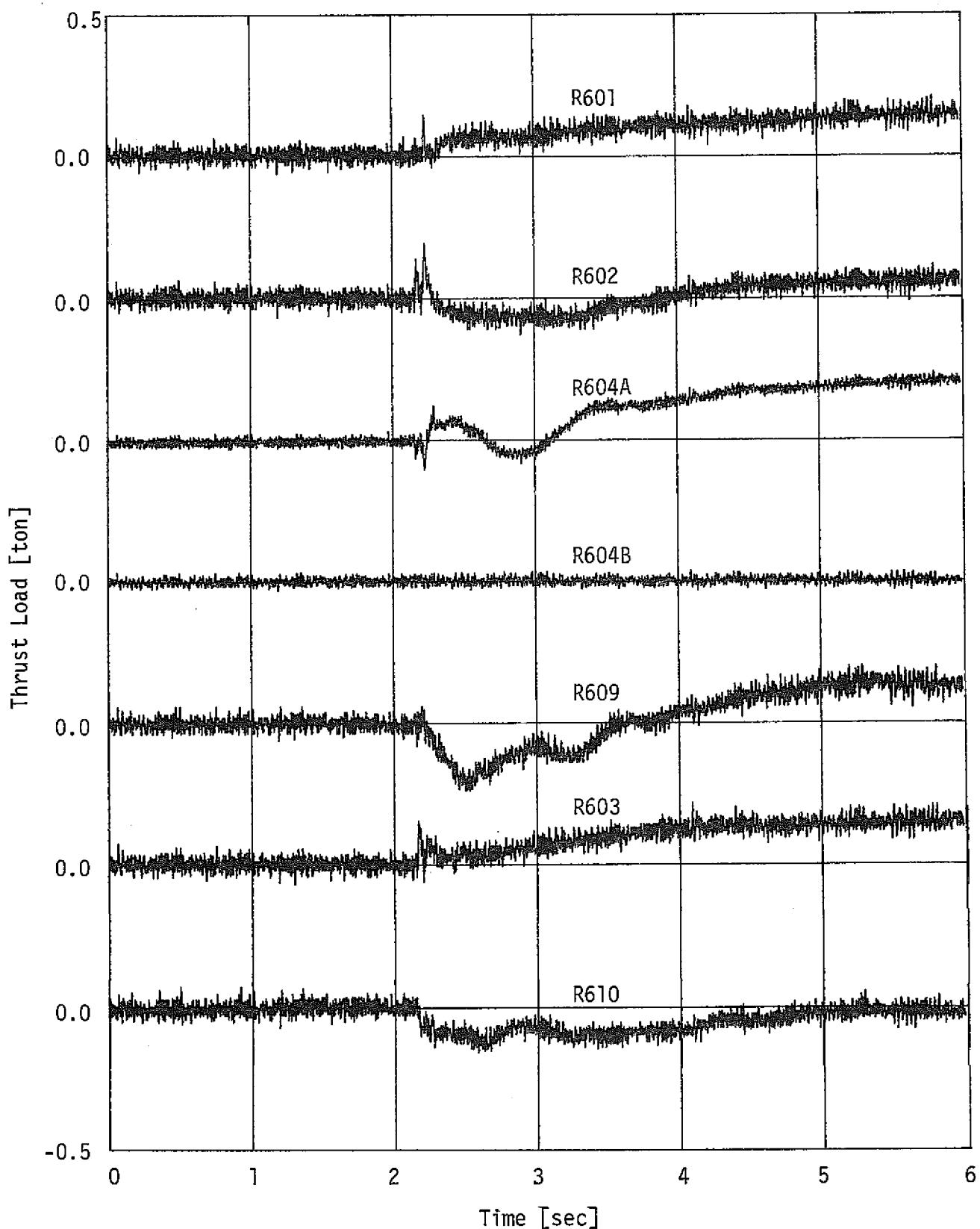


Fig. 3.2.10(a) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

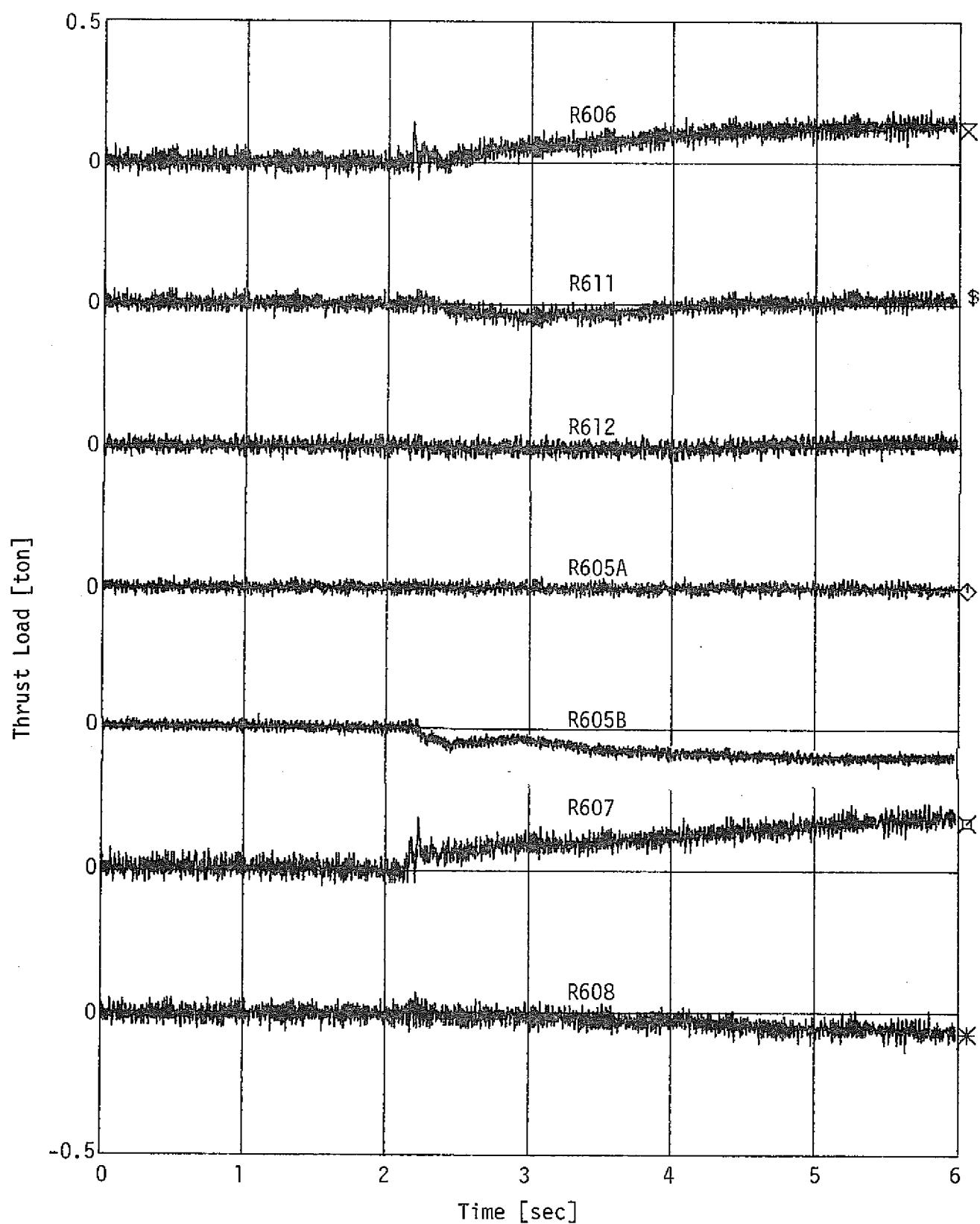


Fig. 3.2.10(b) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

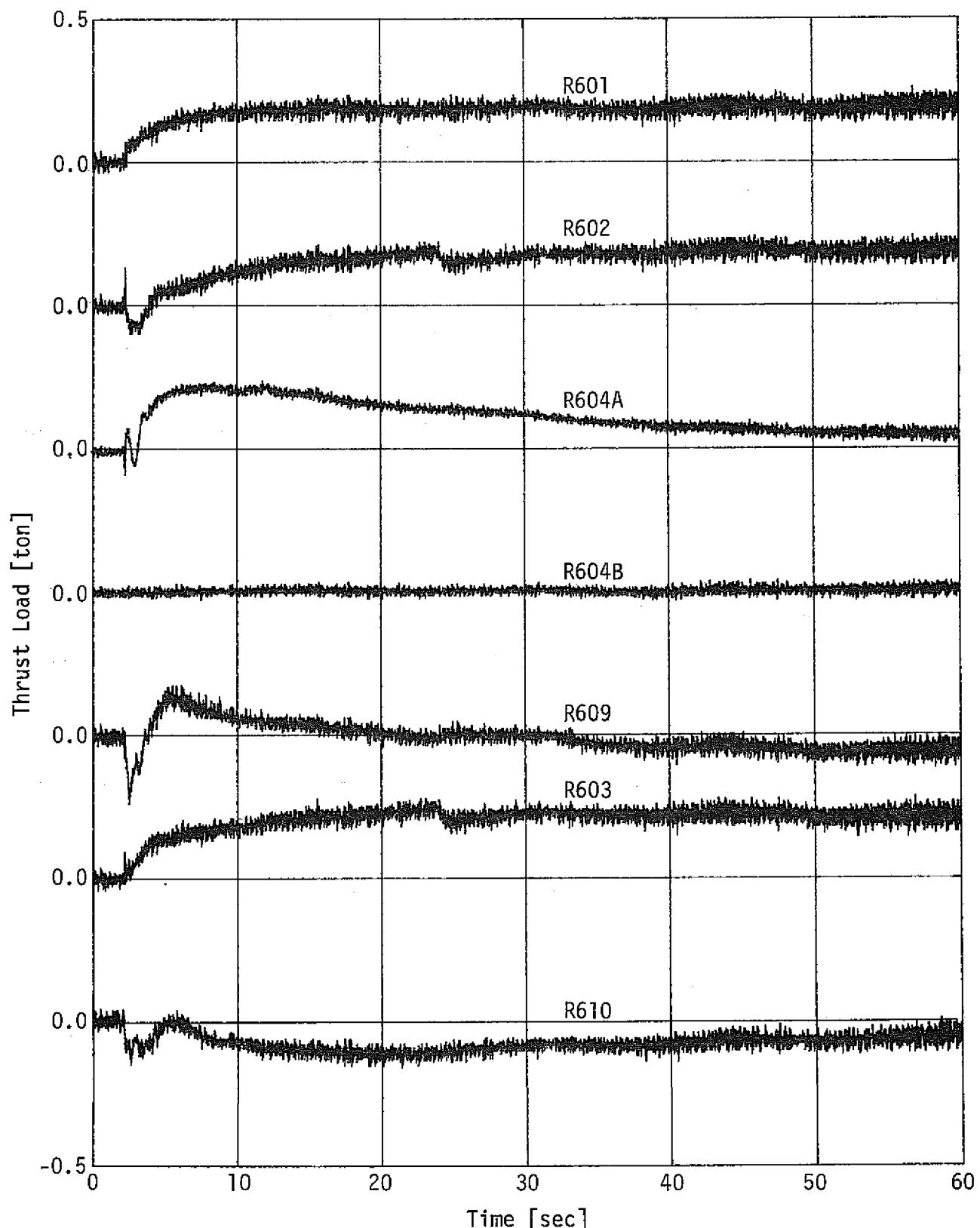


Fig. 3.2.10(c) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

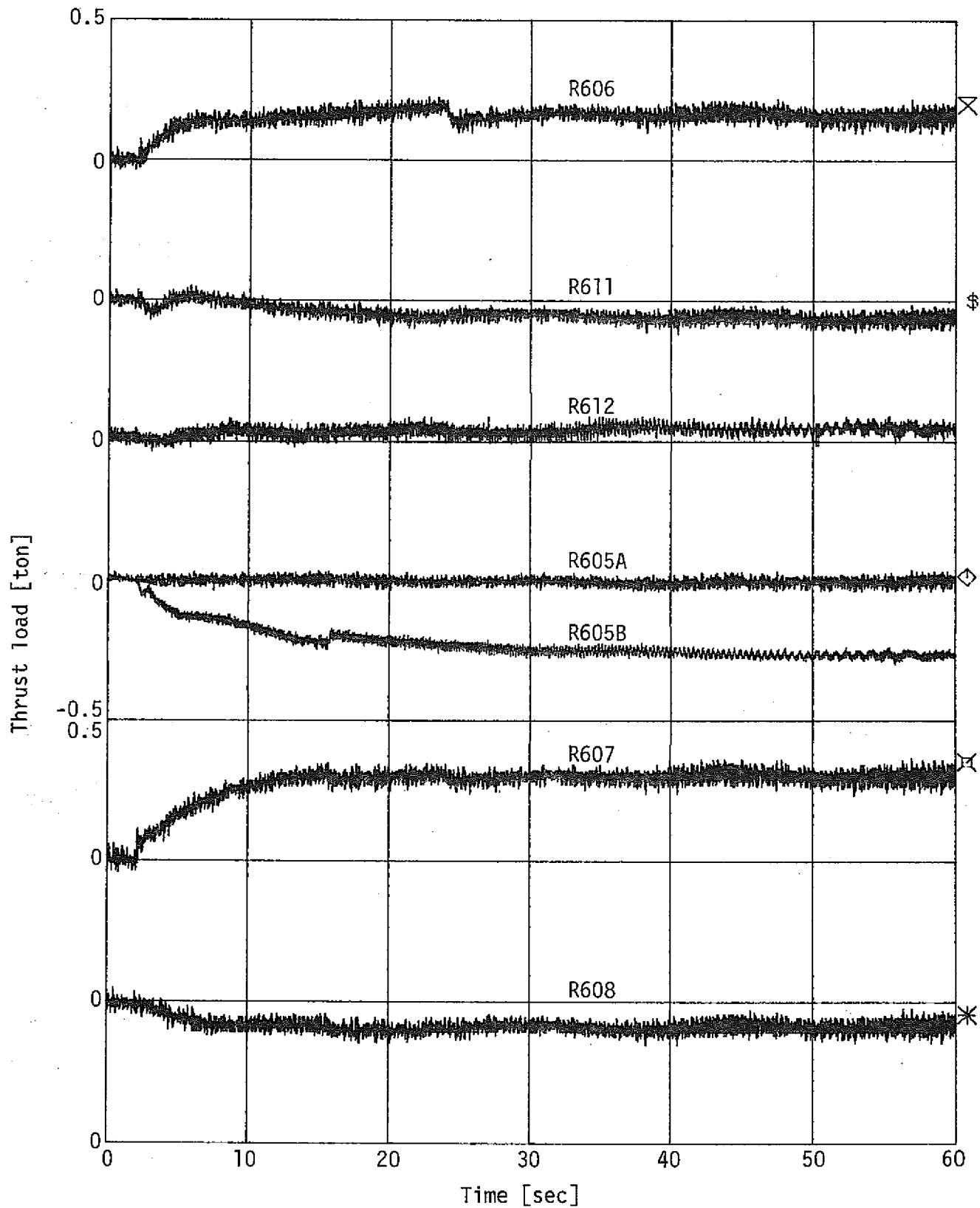


Fig. 3.2.10(d) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

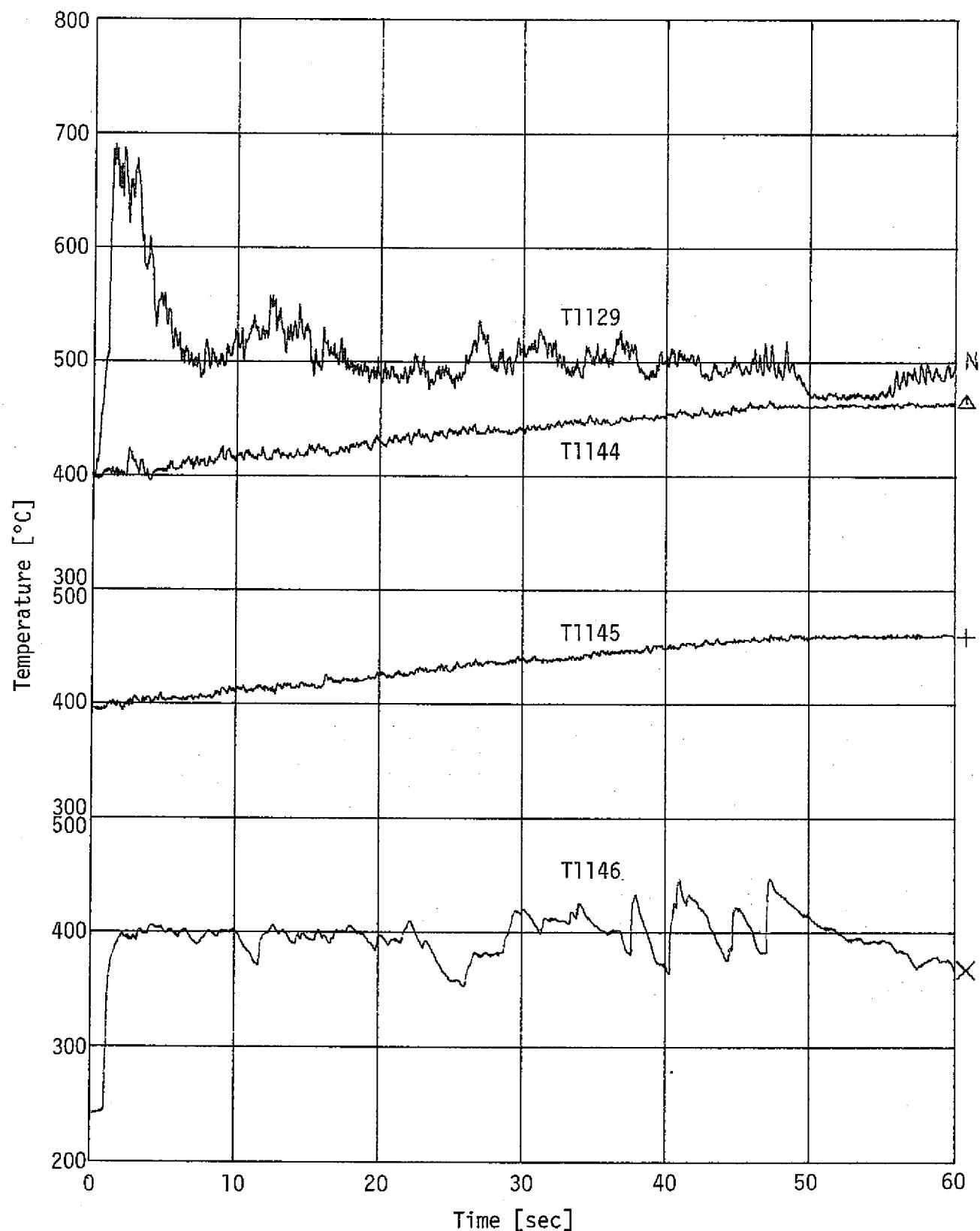


Fig. 3.2.11 Temperatures in Reaction Vessel

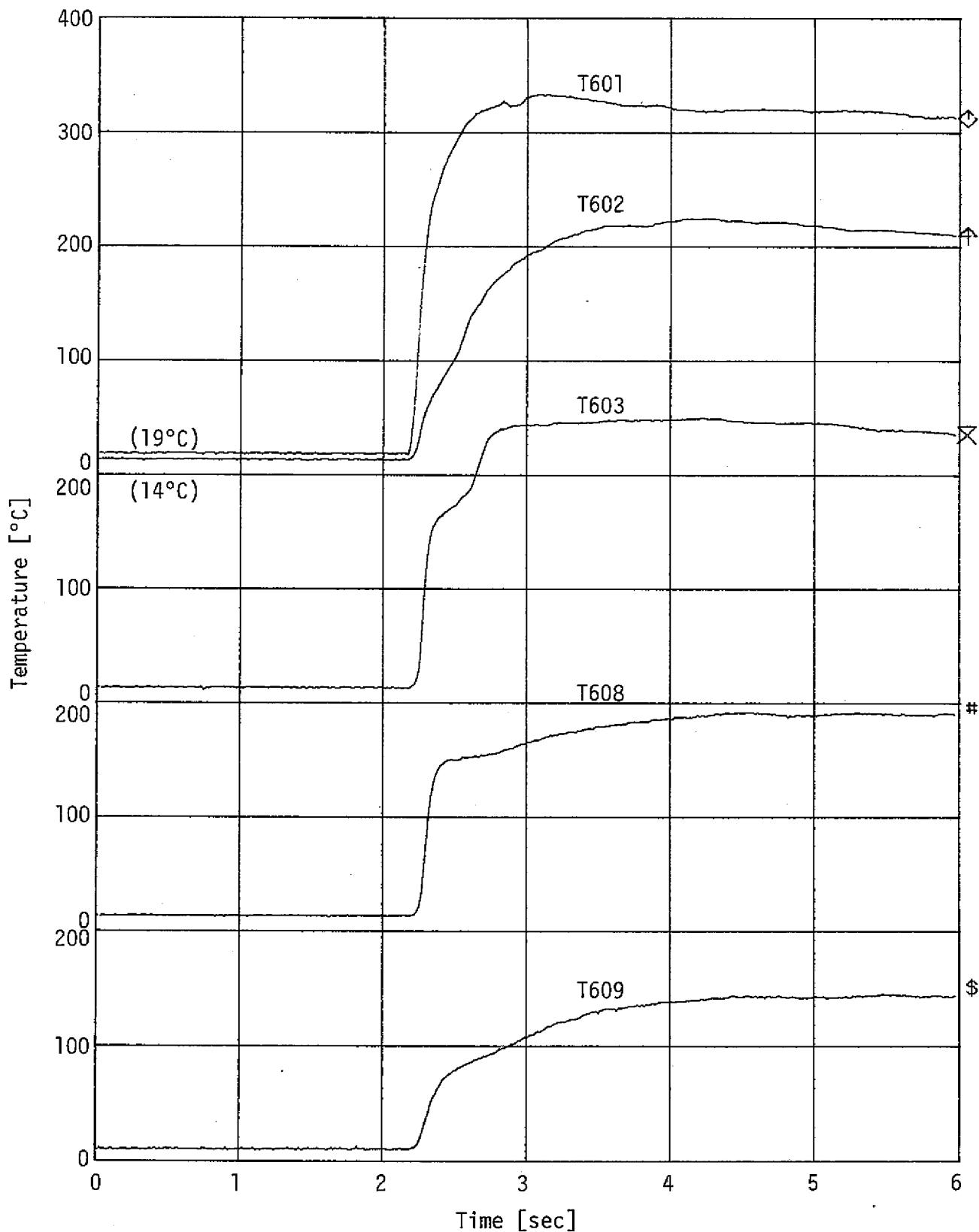


Fig. 3.2.12(a) Temperatures in Pressure Relief Line

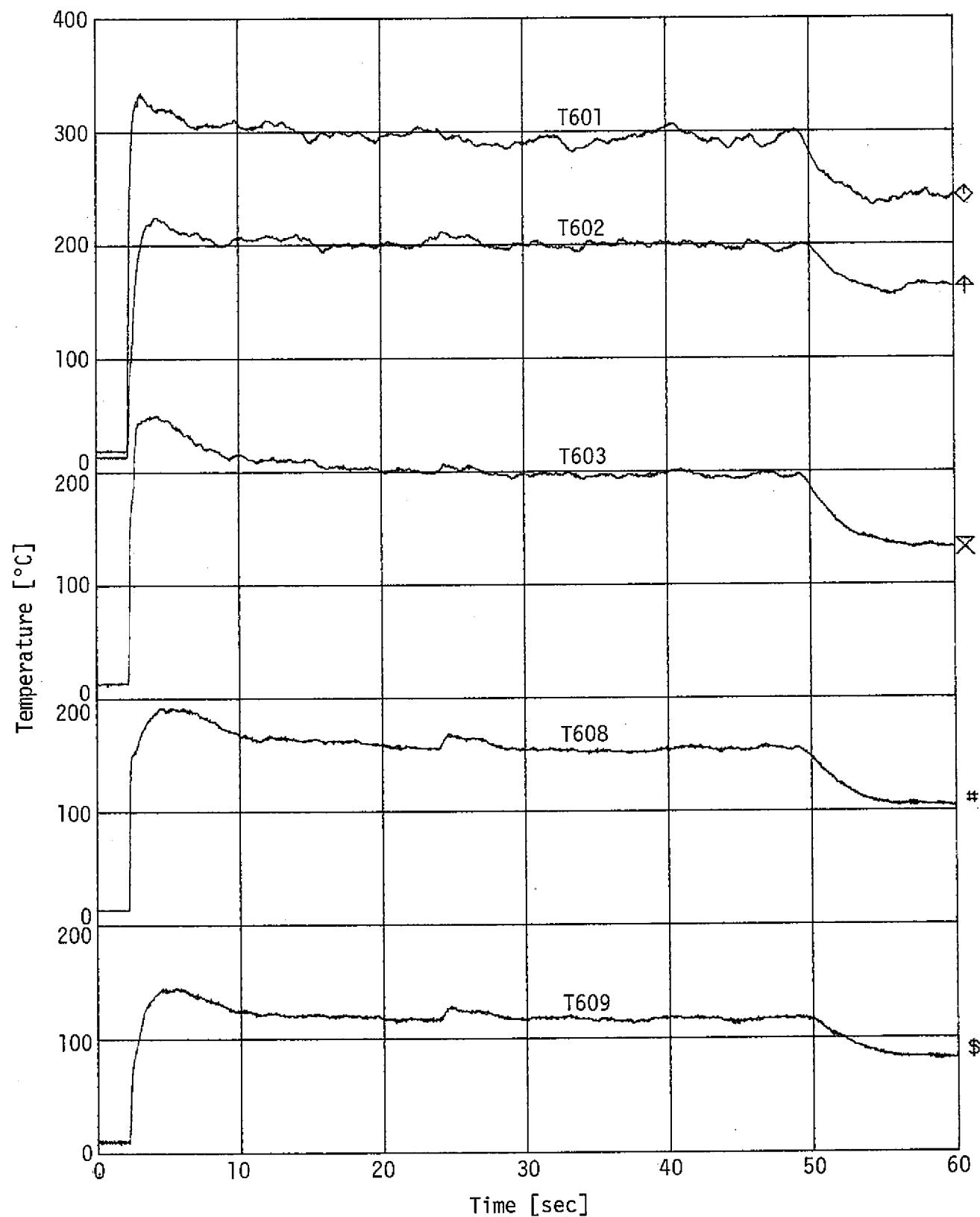


Fig. 3.2.12(b) Temperatures in Pressure Relief Line

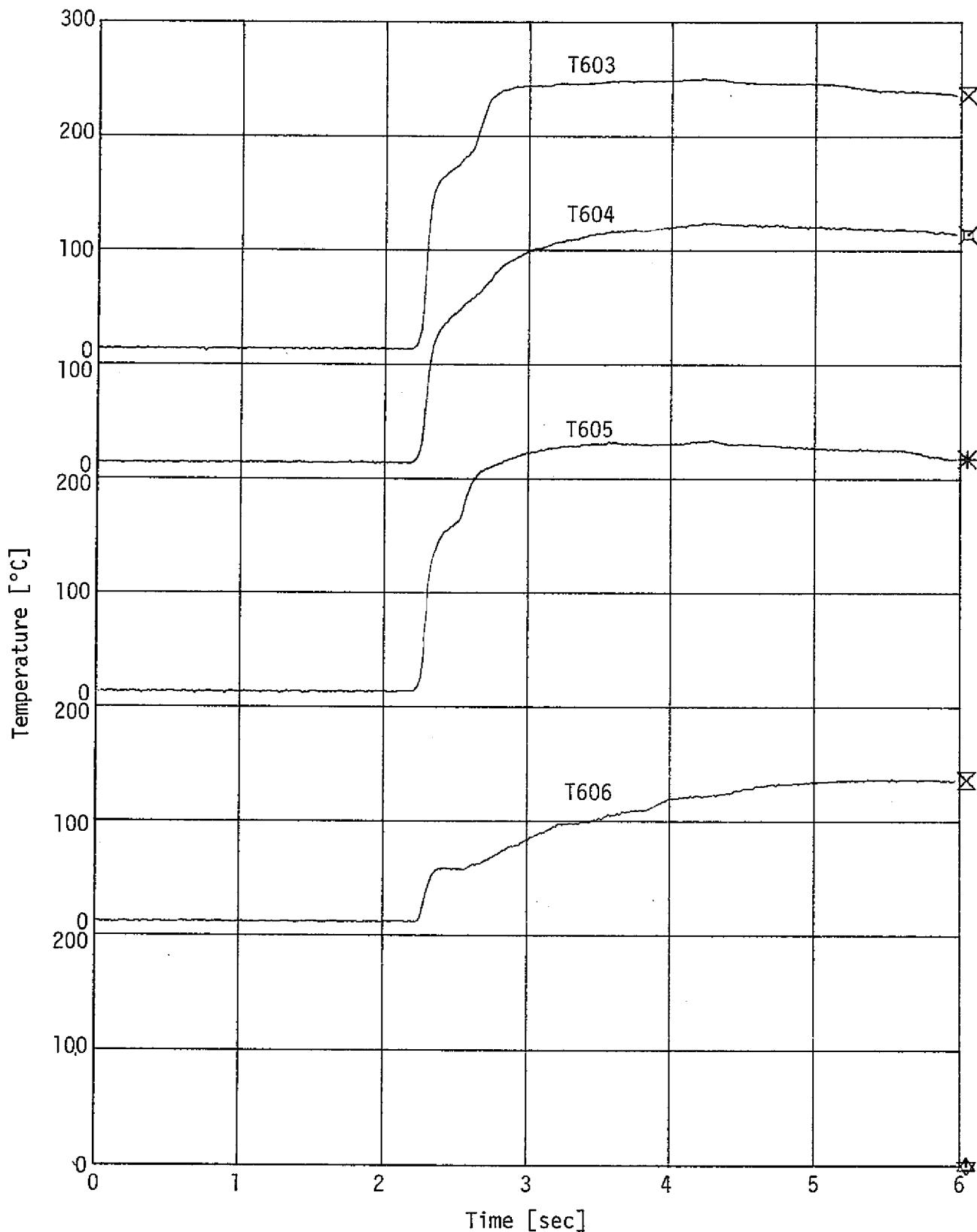


Fig. 3.2.12(c) Temperatures in Pressure Relief Line

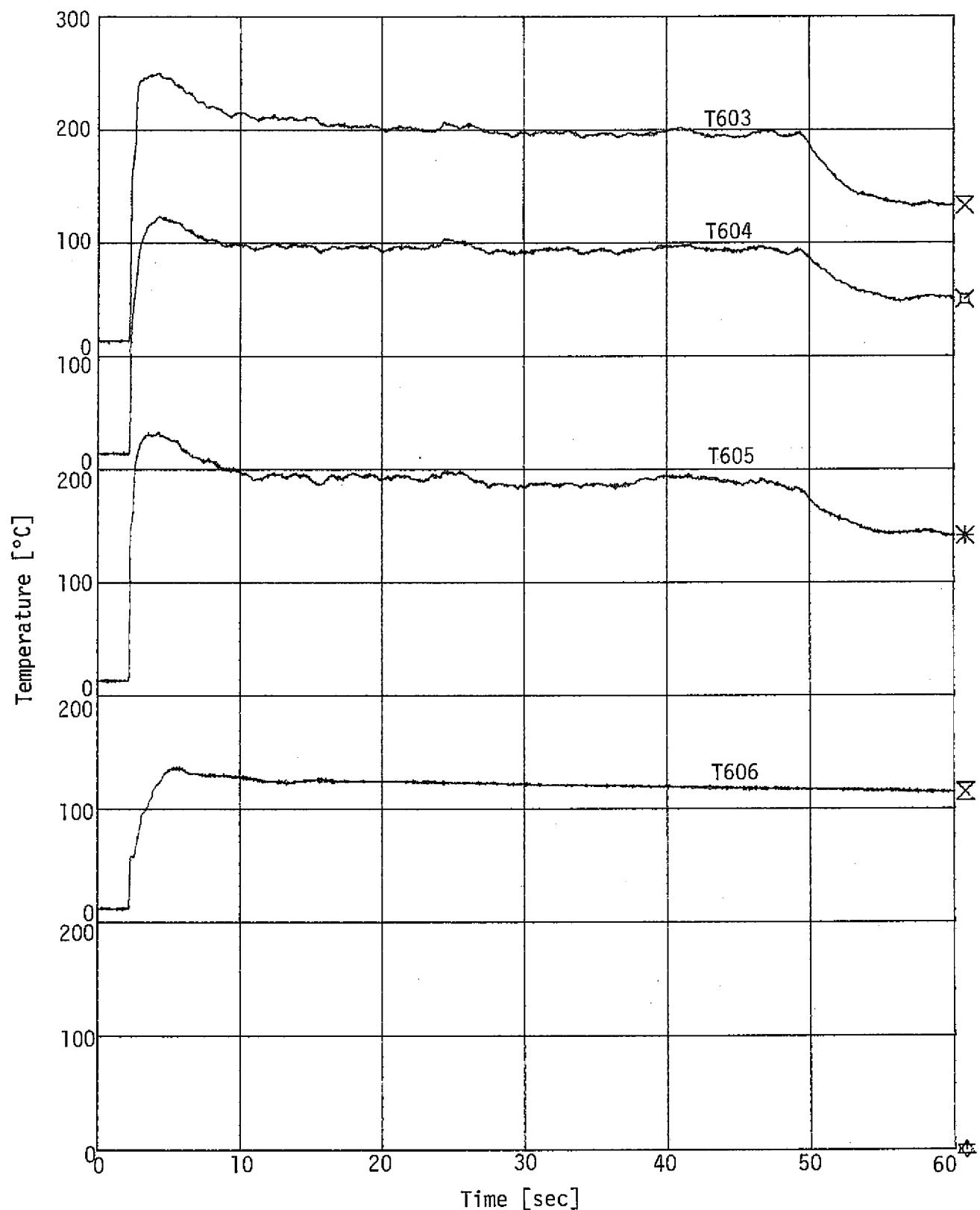


Fig. 3.2.12(d) Temperatures in Pressure Relief Line

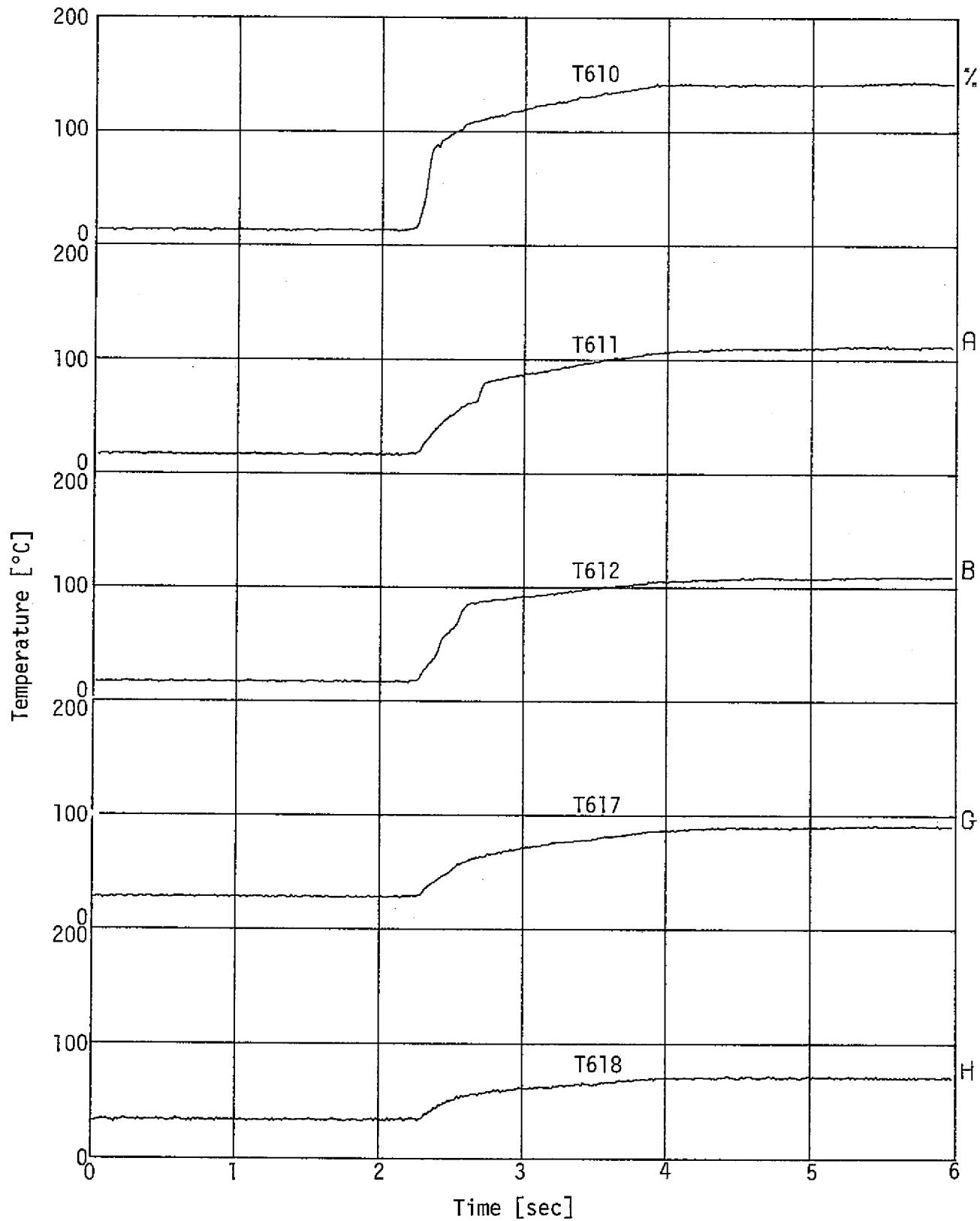


Fig. 3.2.12(e) Temperatures in Pressure Relief Line

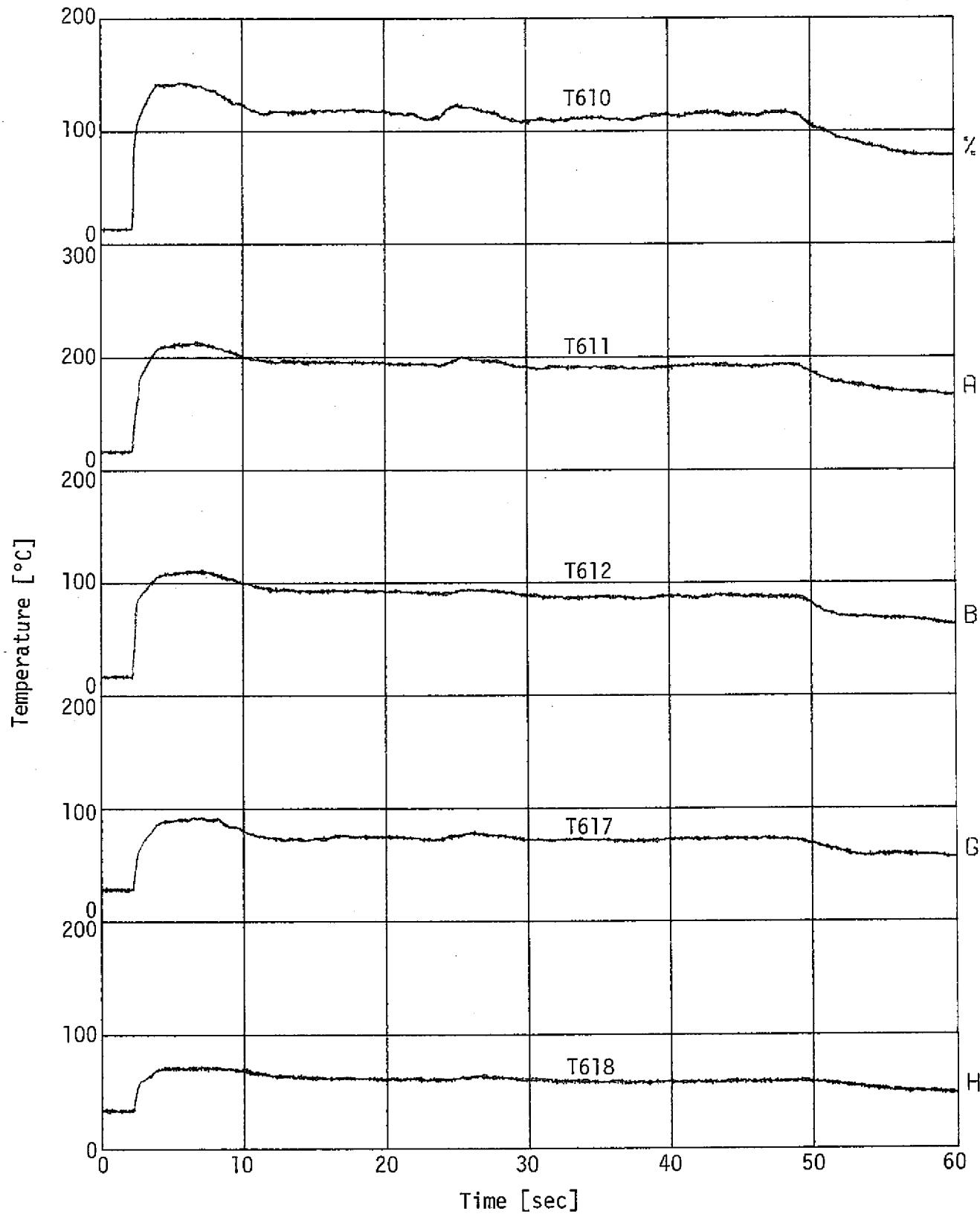


Fig. 3.2.12(f) Temperatures in Pressure Relief Line

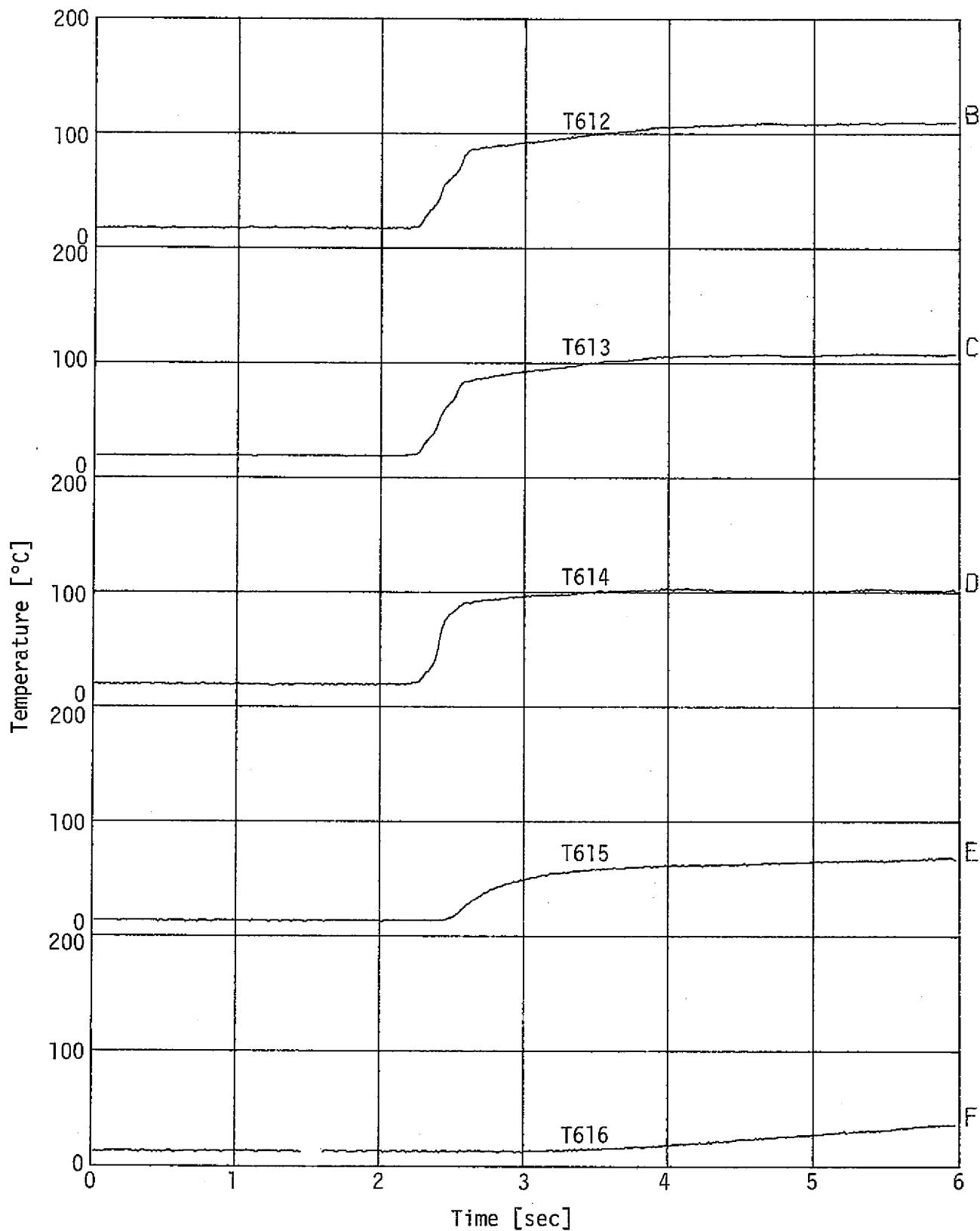


Fig. 3.2.12(g) Temperatures in Pressure Relief Line

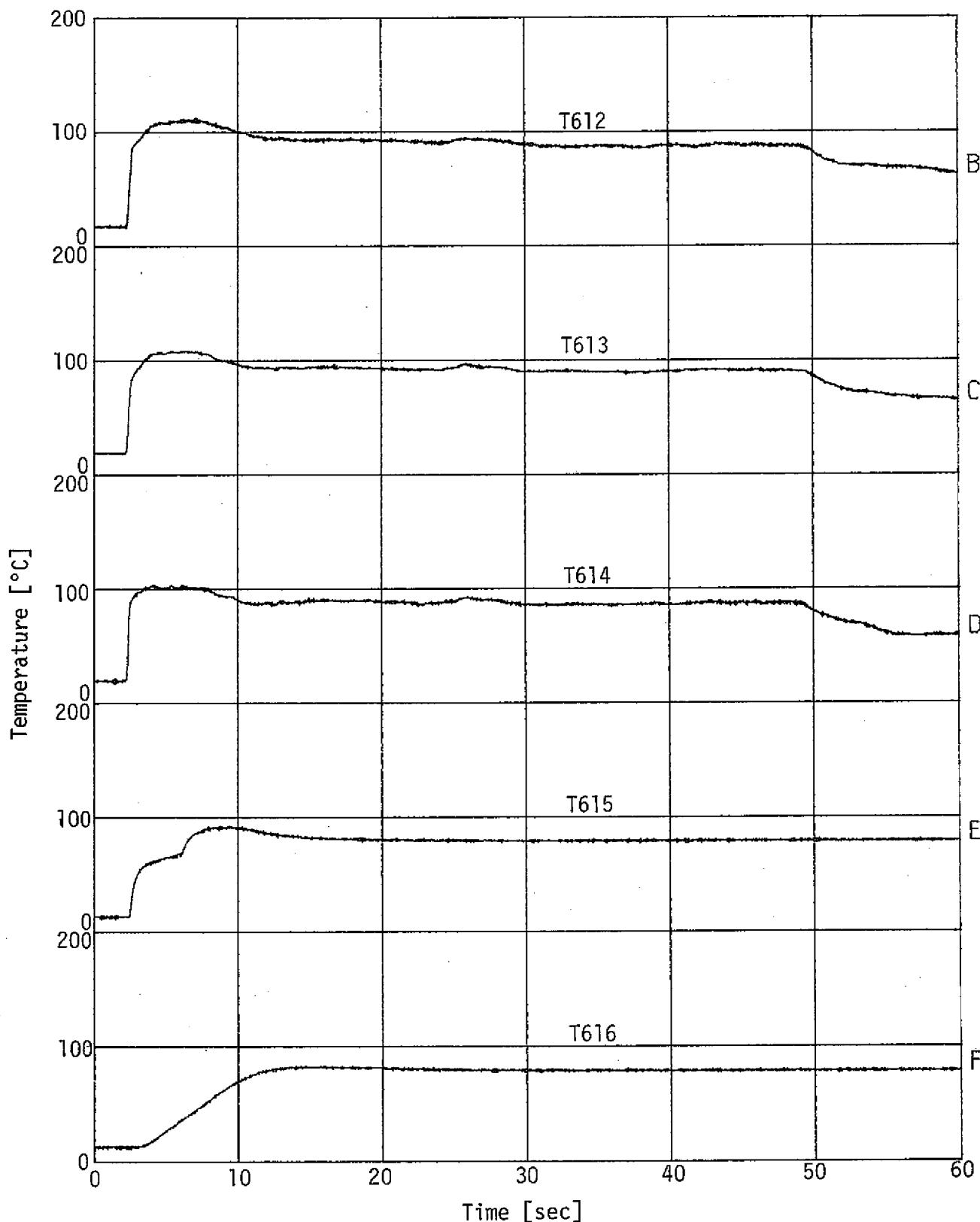


Fig. 3.2.12(h) Temperatures in Pressure Relief Line

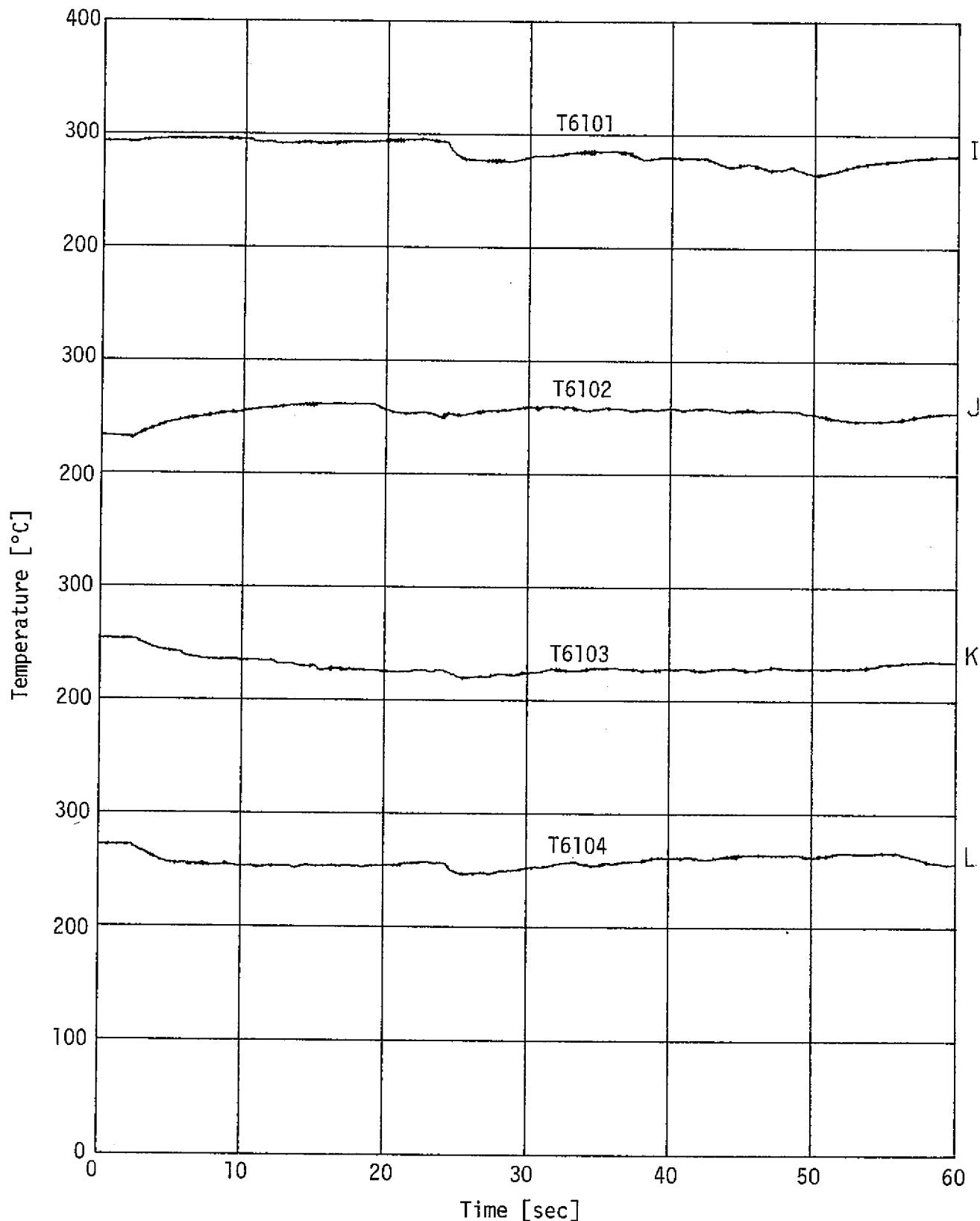


Fig. 3.2.13 Temperatures in Reaction Product Tank

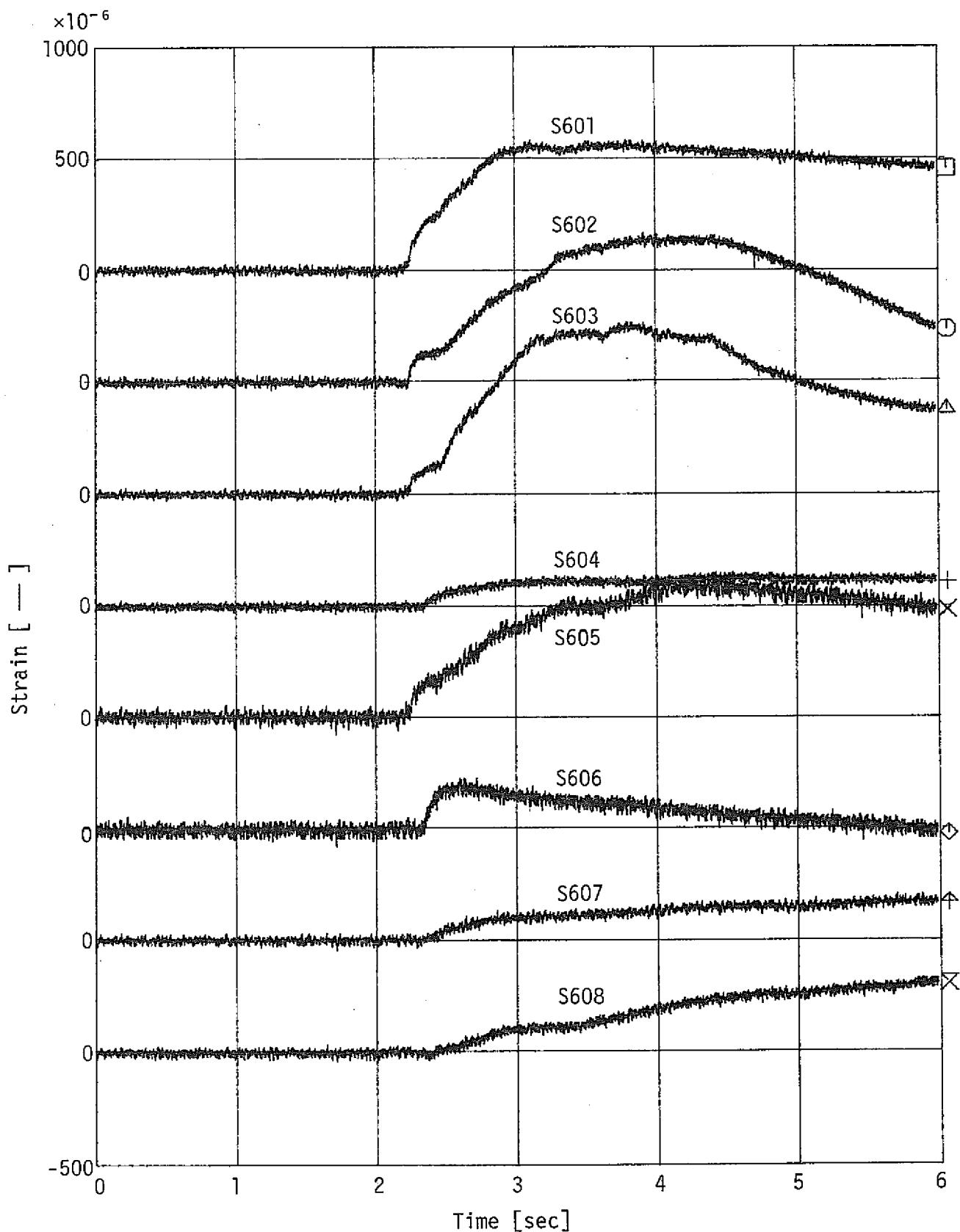


Fig. 3.2.14 Strains on Pressure Relief Piping

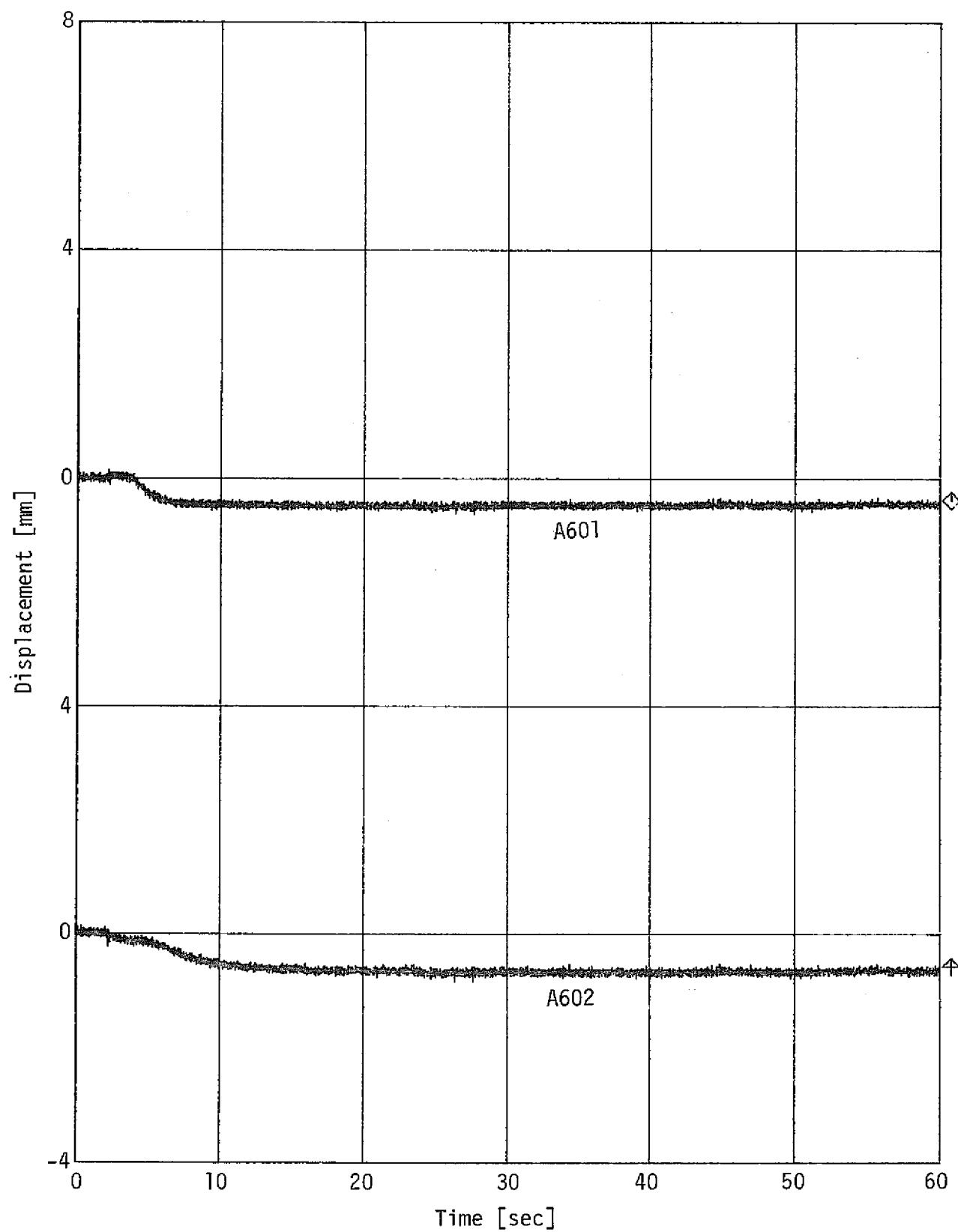


Fig. 3.2.15 Displacement of Pressure Relief Piping.

Run-93 試 驗 結 果

Fig.3.3.1

}
Fig.3.3.17

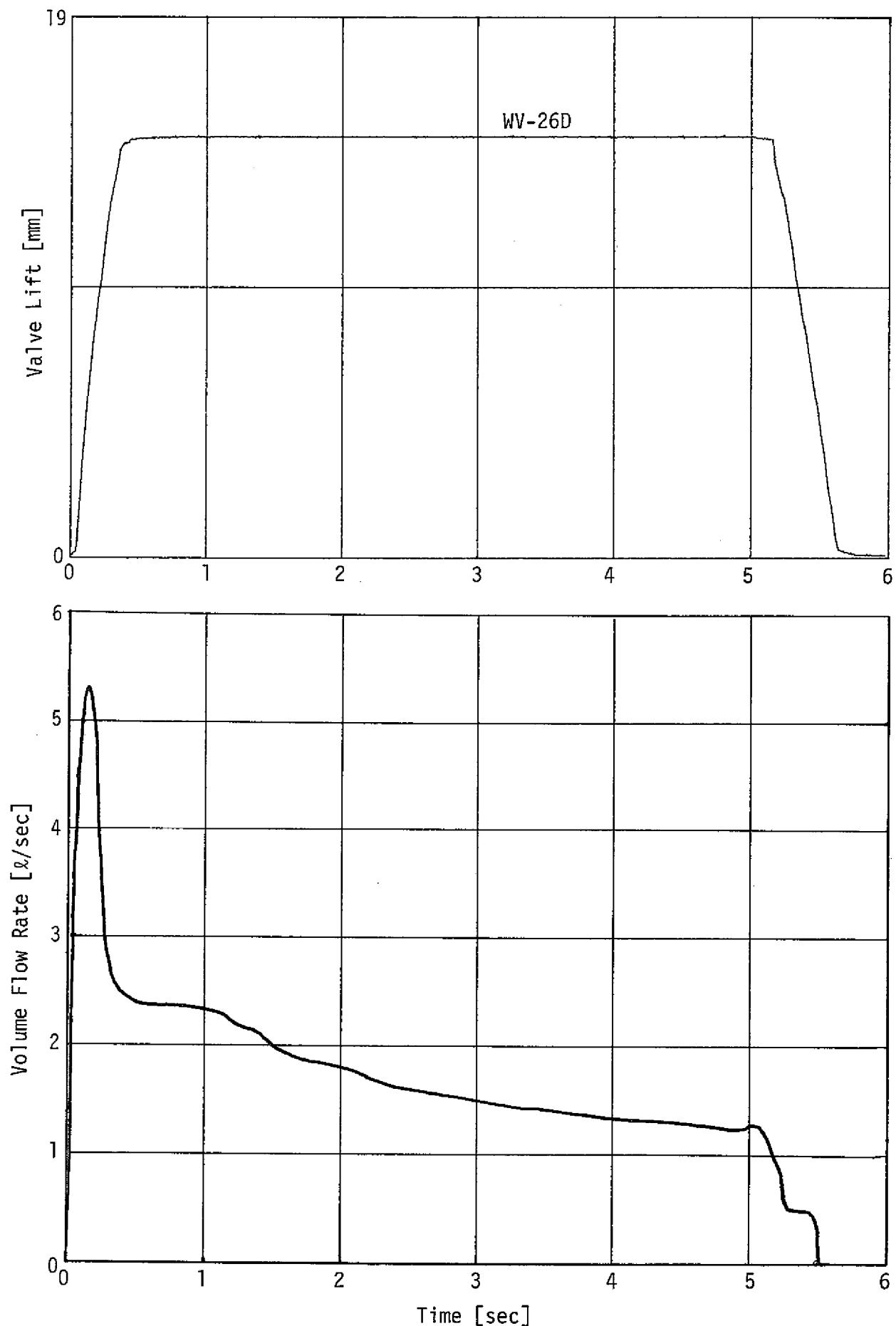


Fig. 3.3.1 Water Injection Valve Openning & Volume Flow Rate

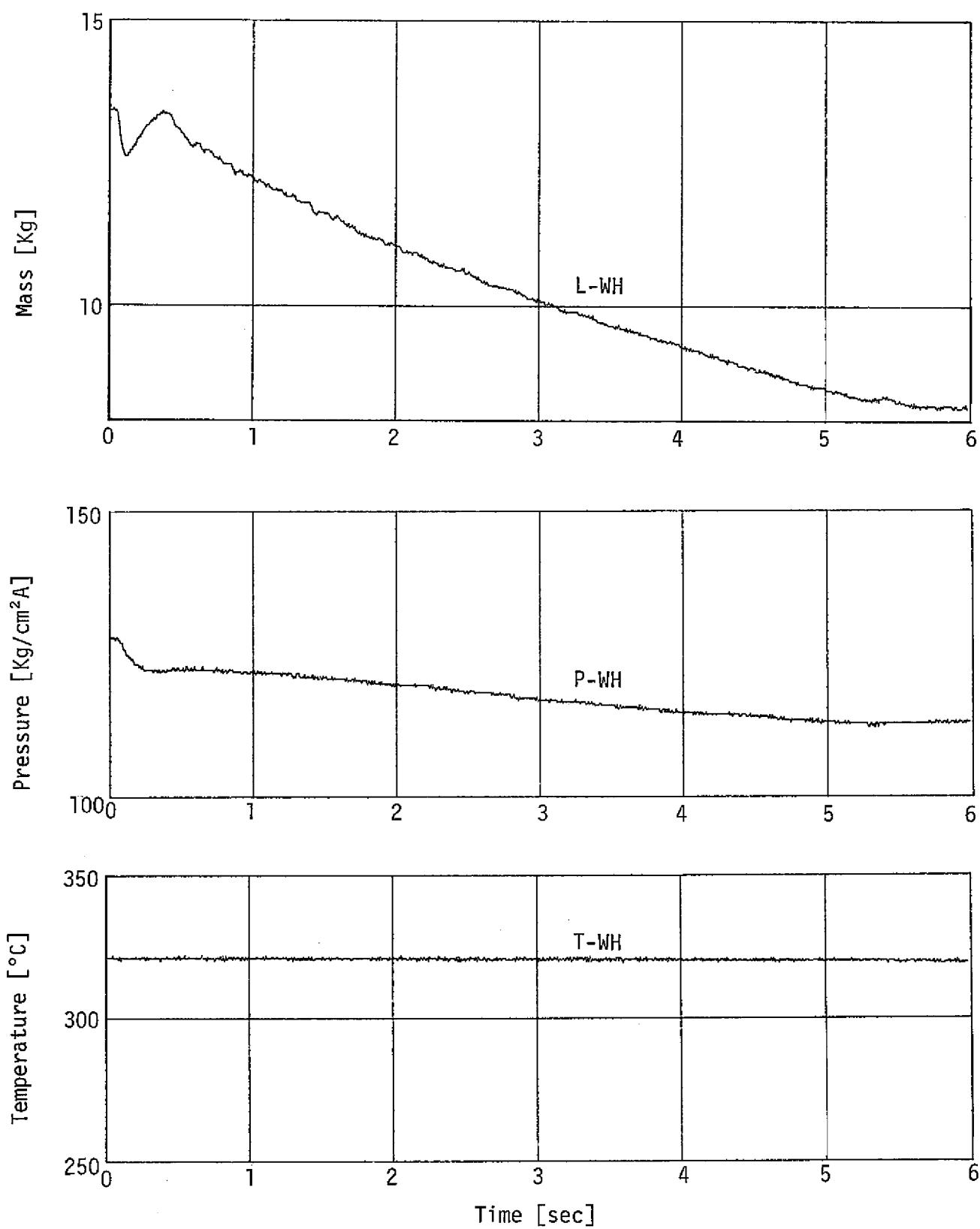


Fig. 3.3.2 Water Heater Conditions

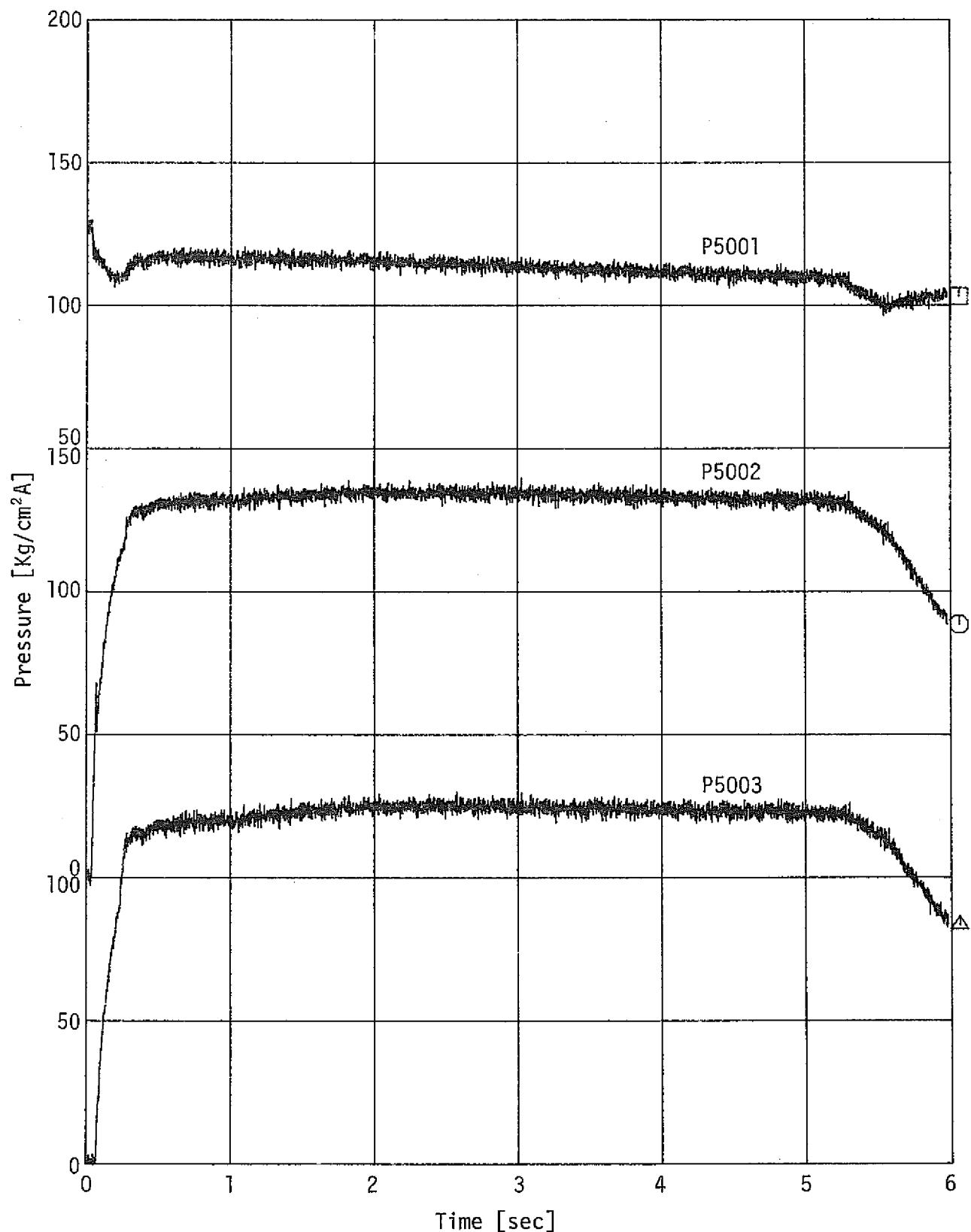


Fig. 3.3.3(a) Pressure in Water Injection Line

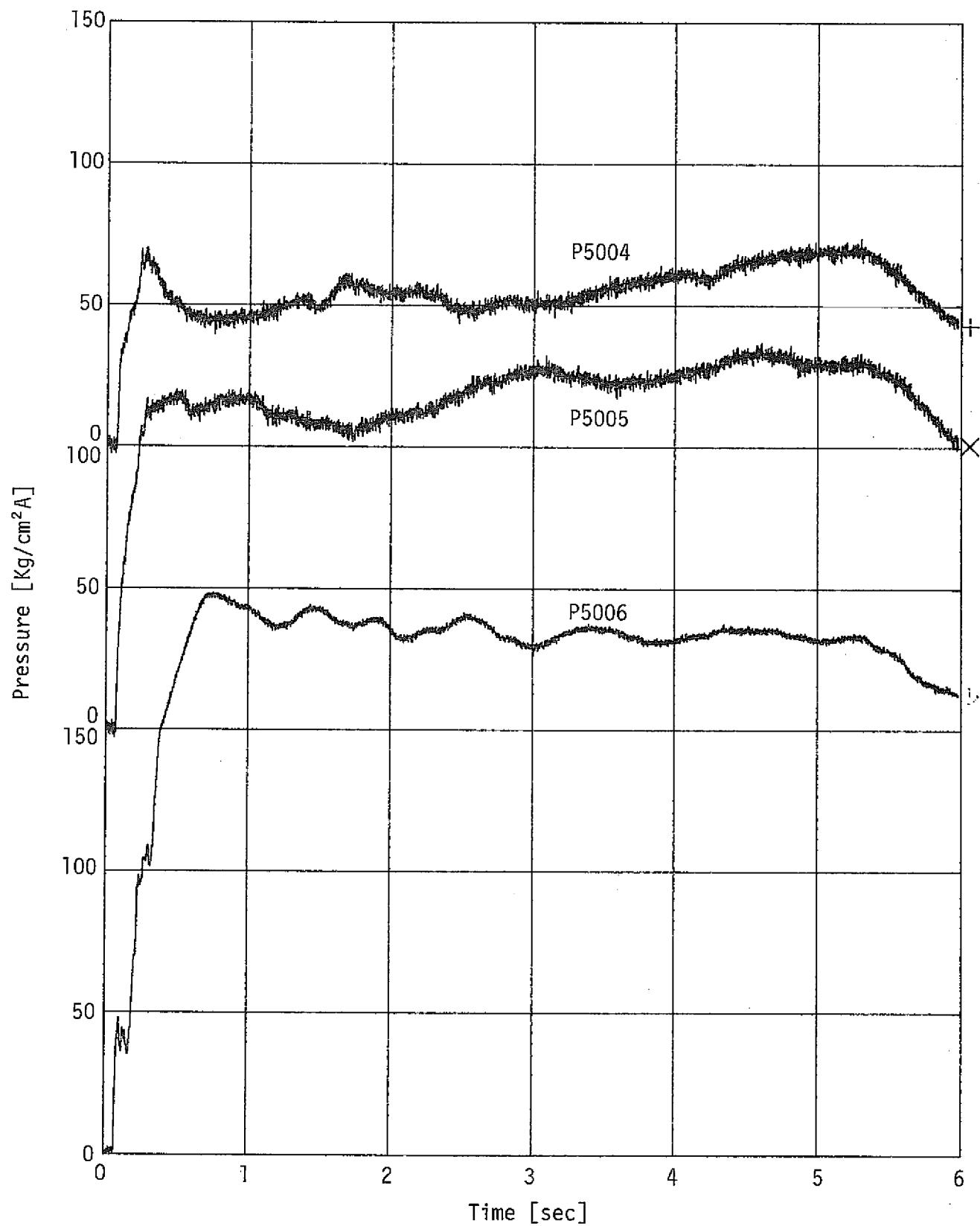


Fig. 3.3.3(b) Pressure in Water Injection Line

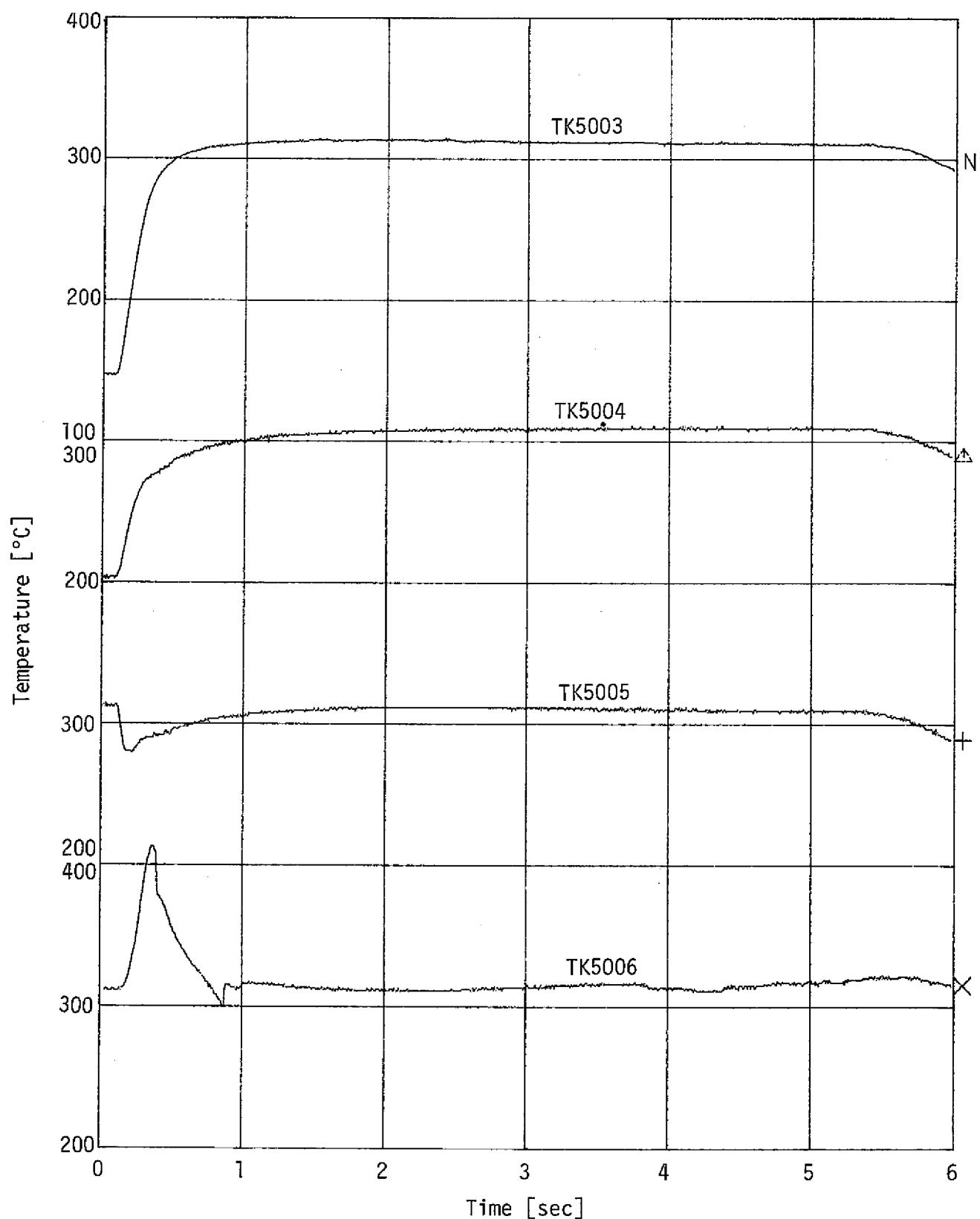


Fig. 3.3.4 Temperatures in Water Injection Line

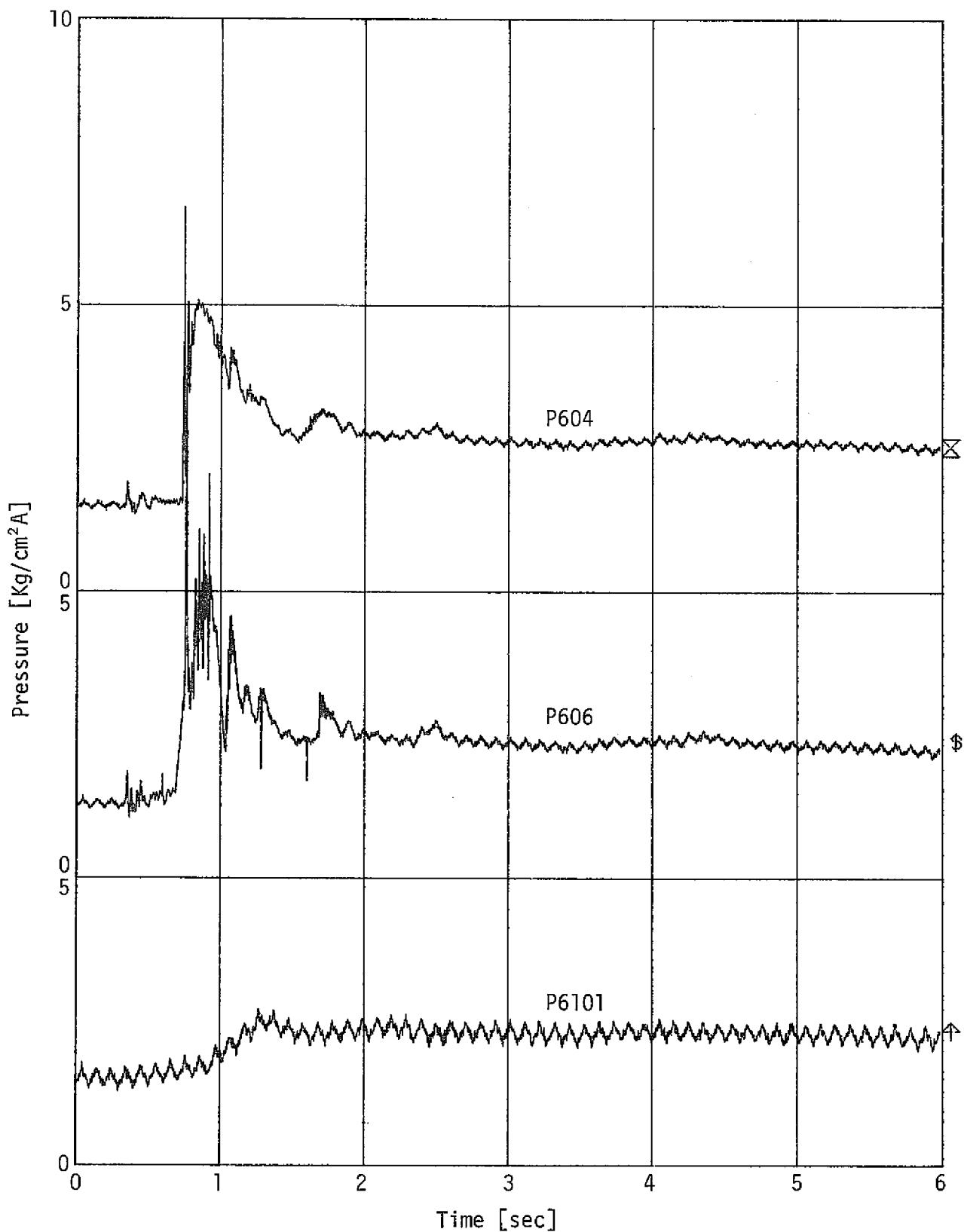


Fig. 3.3.5(a) Pressure in Reaction Vessel and Pressure Relief Line

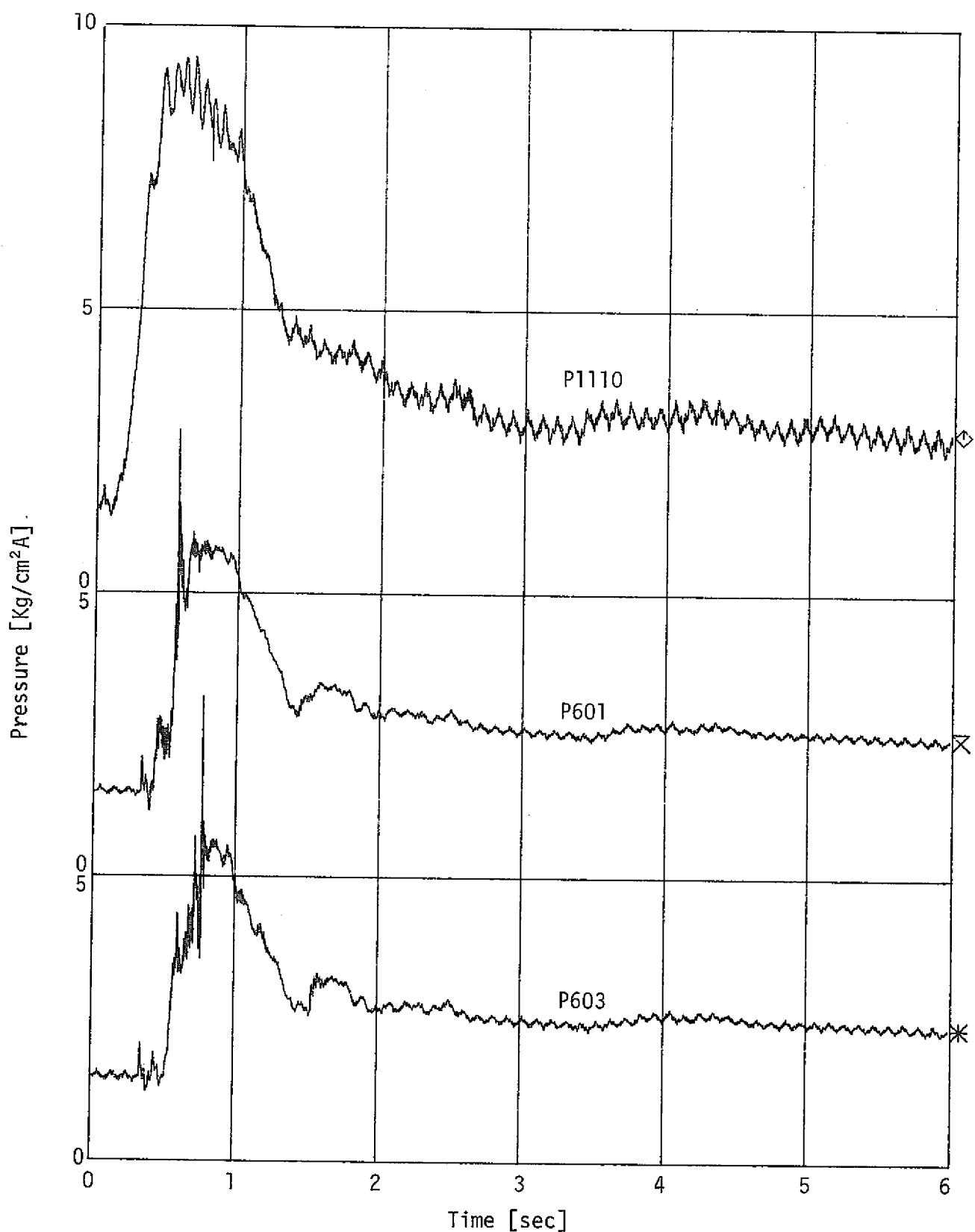


Fig. 3.3.5(b) Pressure in Reaction Vessel and Pressure Relief Line

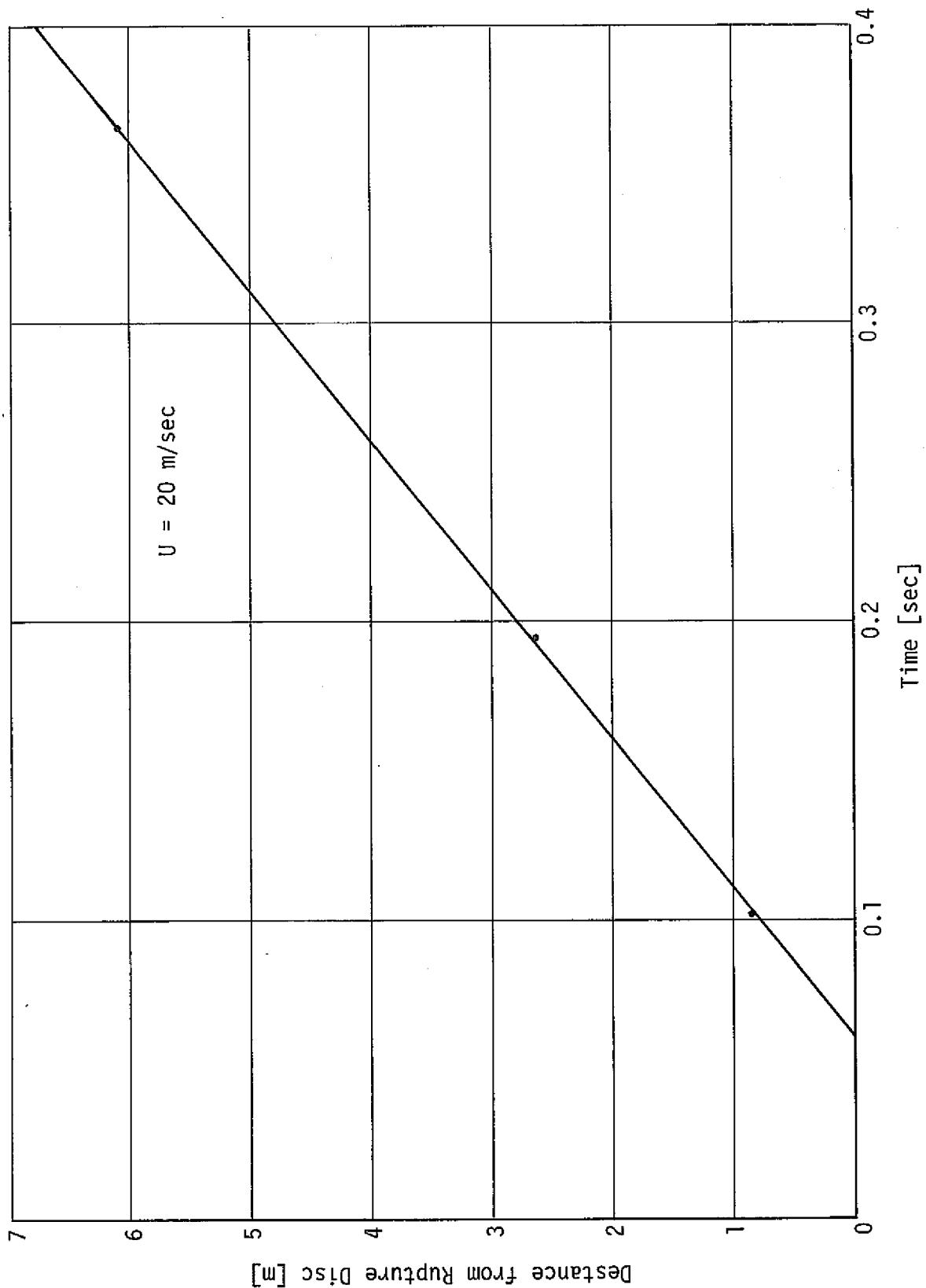


Fig. 3.3.6 Velocity derived from Initial Pressure Rising

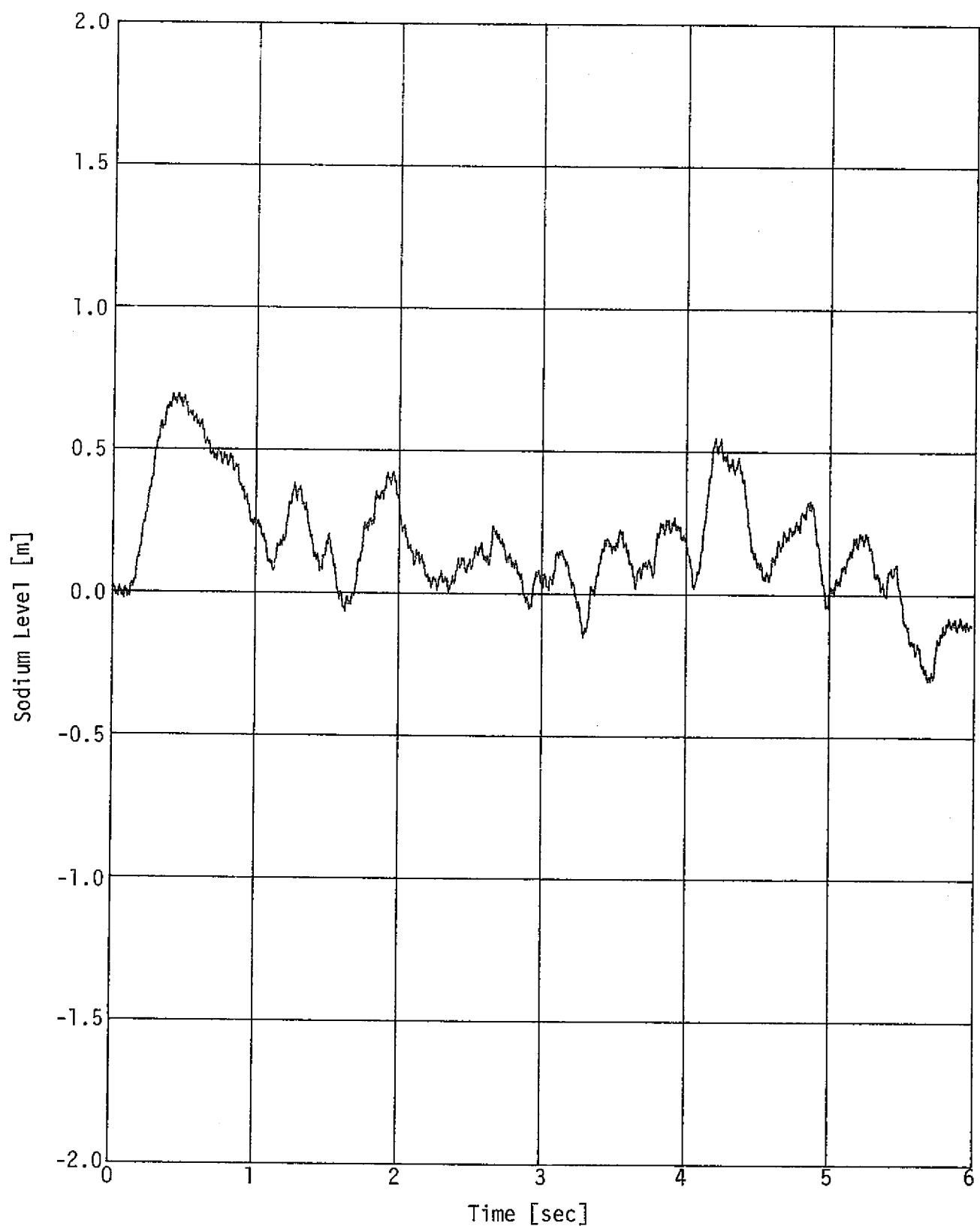


Fig. 3.3.7 Sodium Level in Reaction Vessel

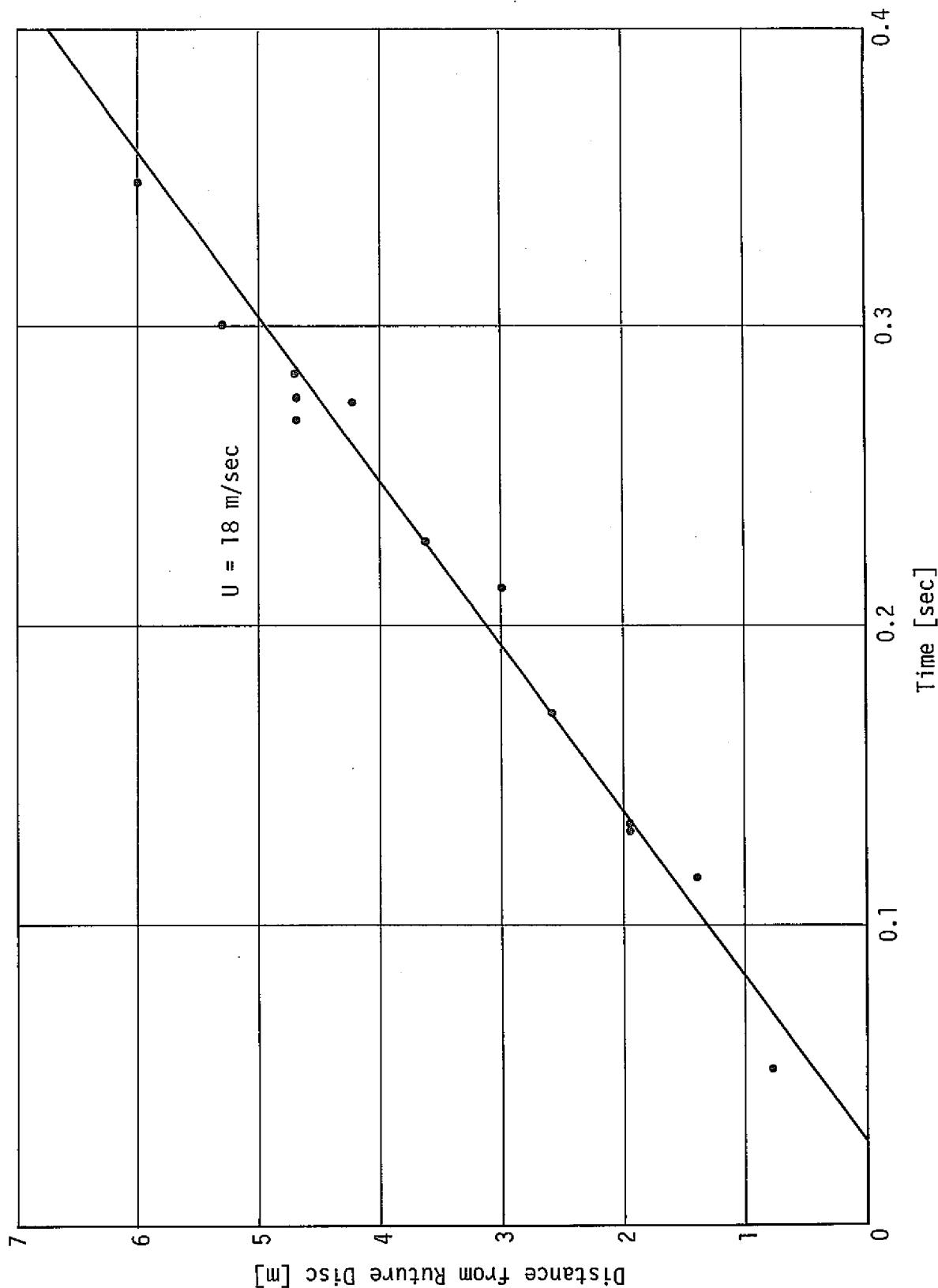


Fig. 3.3.8 Velocity derived from Sodium Void Signals and Temperatures

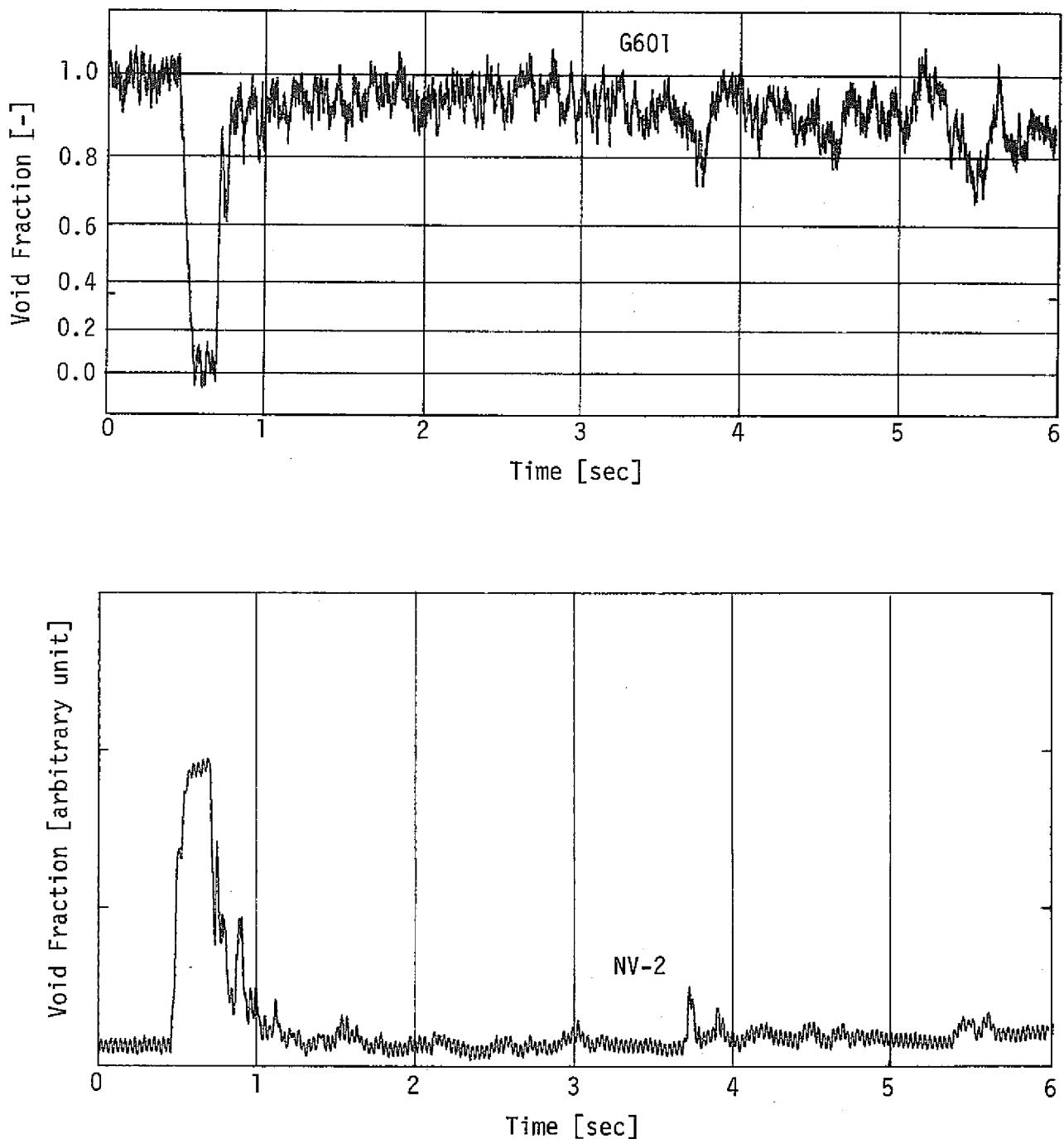


Fig. 3.3.9 Void Fraction in Pressure Relief Piping

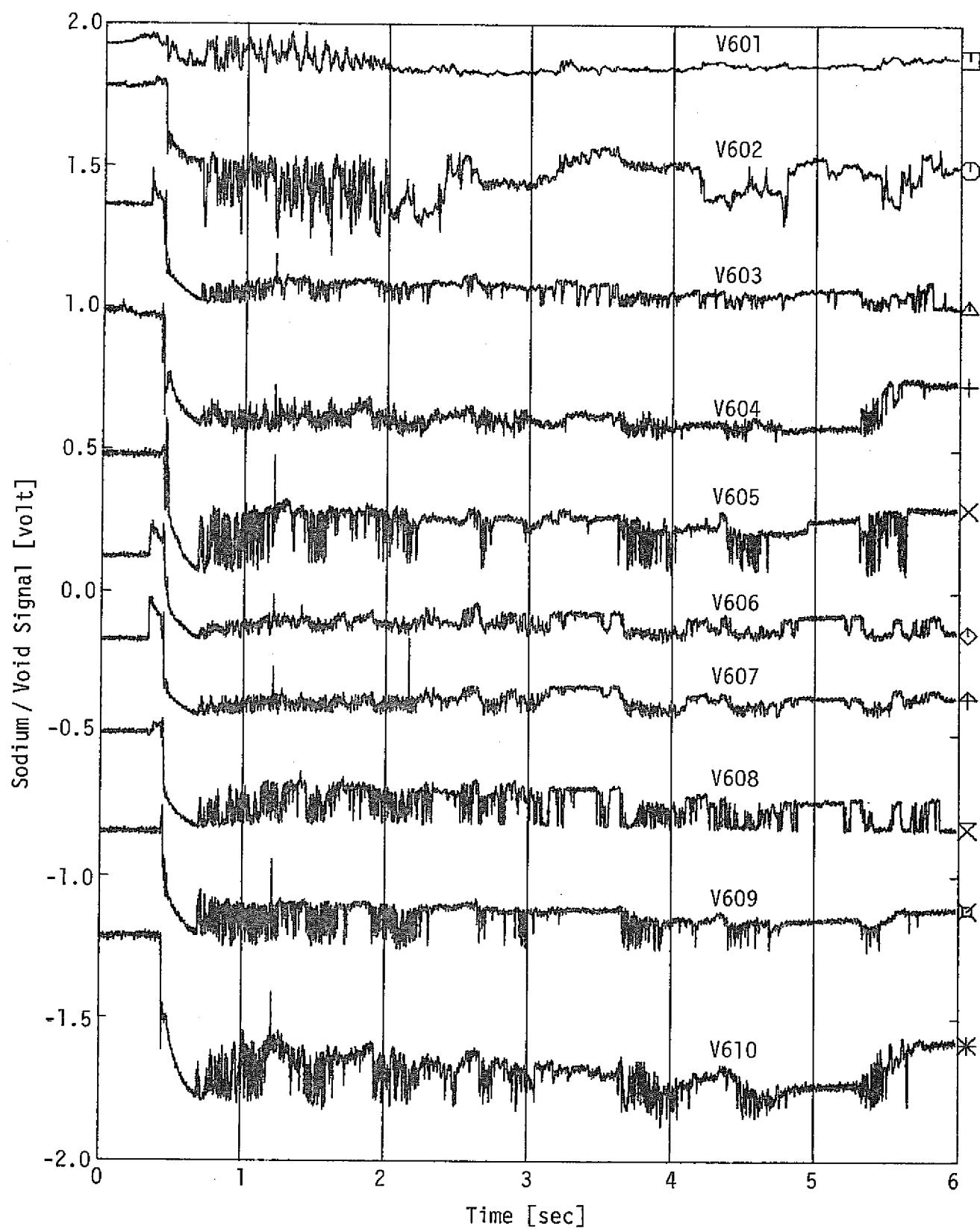


Fig. 3.3.10(a) The Results of Sodium Void Sensor

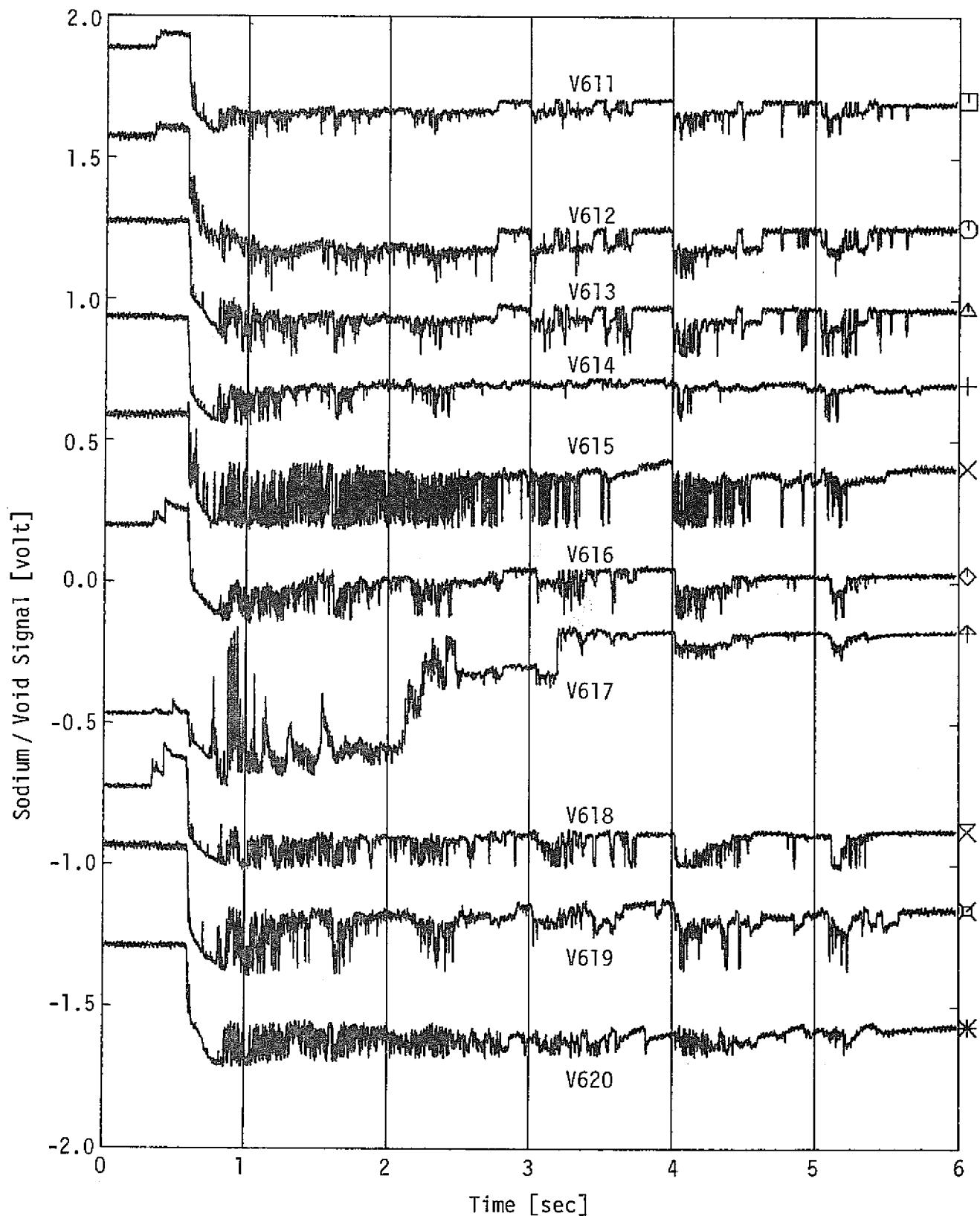


Fig. 3.3.10(b) The Results of Sodium Void Sensor

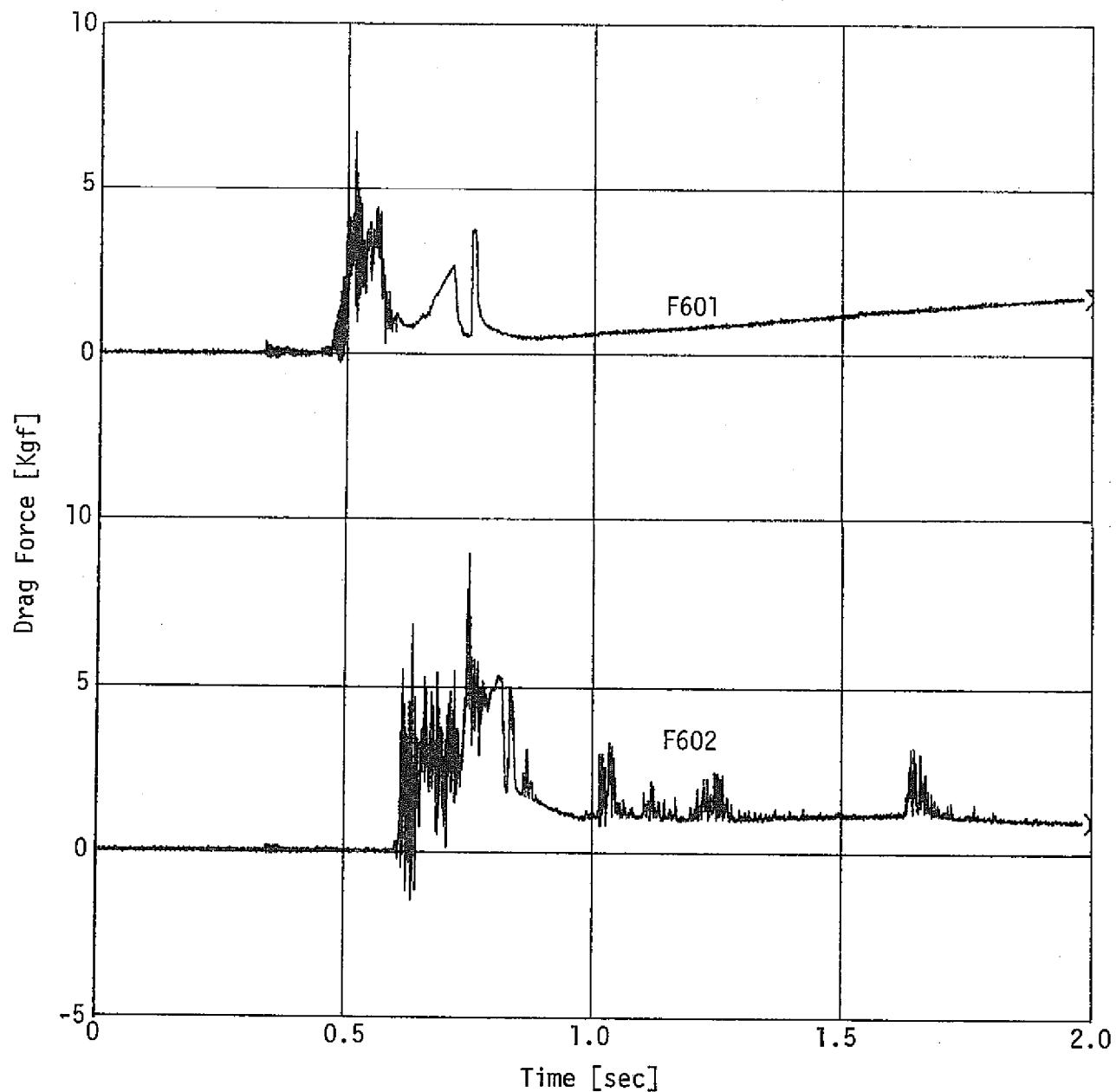


Fig. 3.3.11 Drag Force in Pressure Relief Line

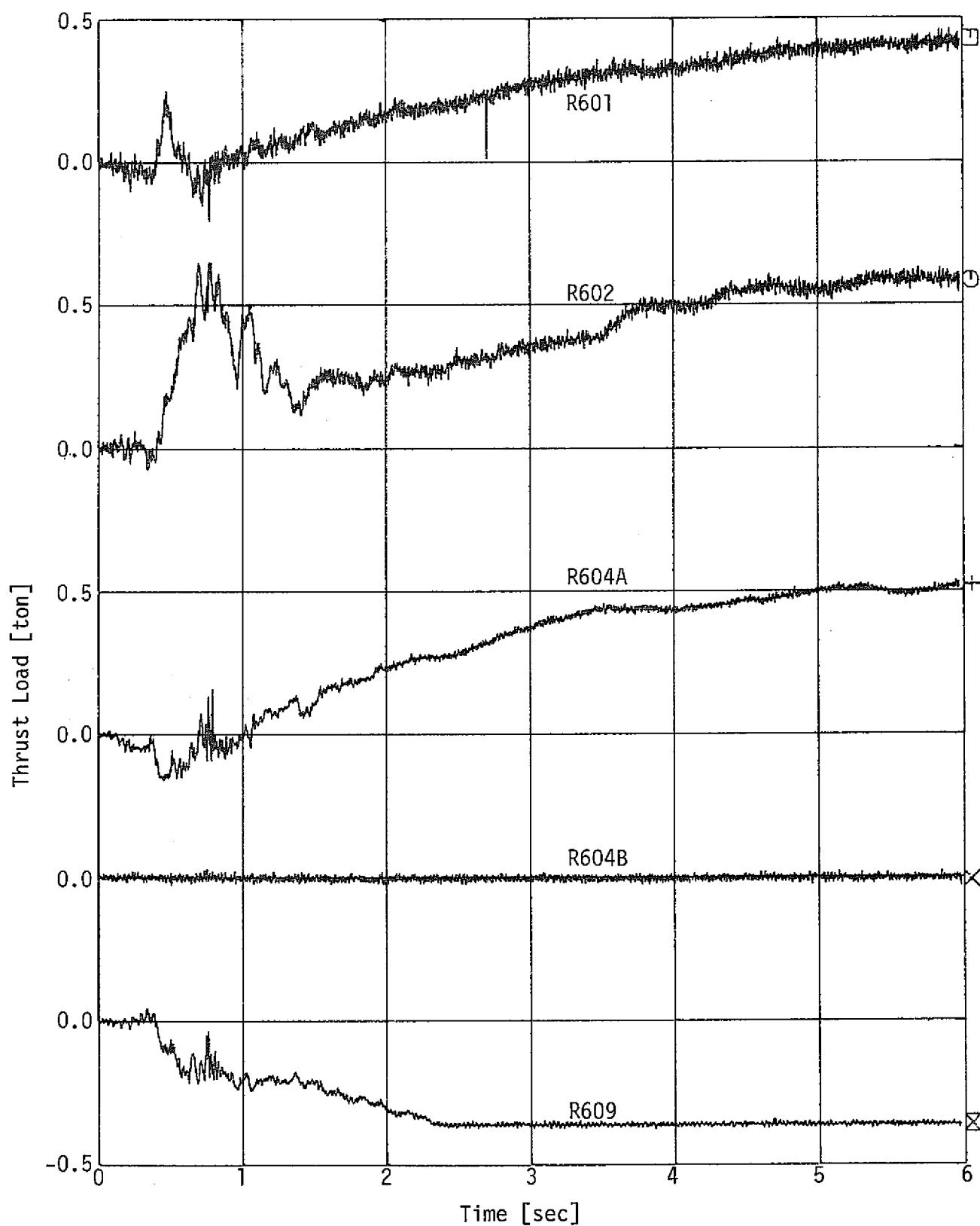


Fig. 3.3.12(a) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

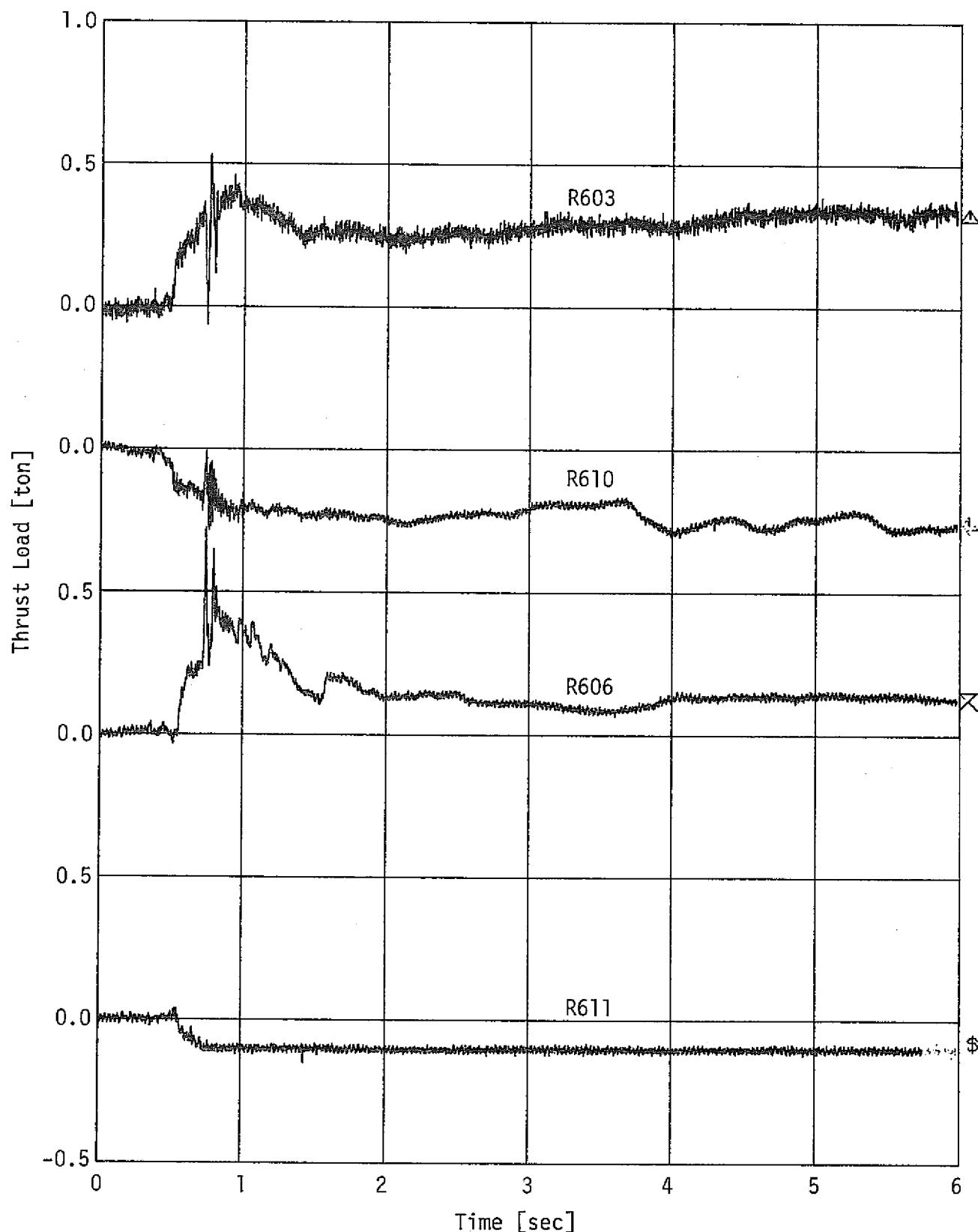


Fig. 3.3.12(b) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

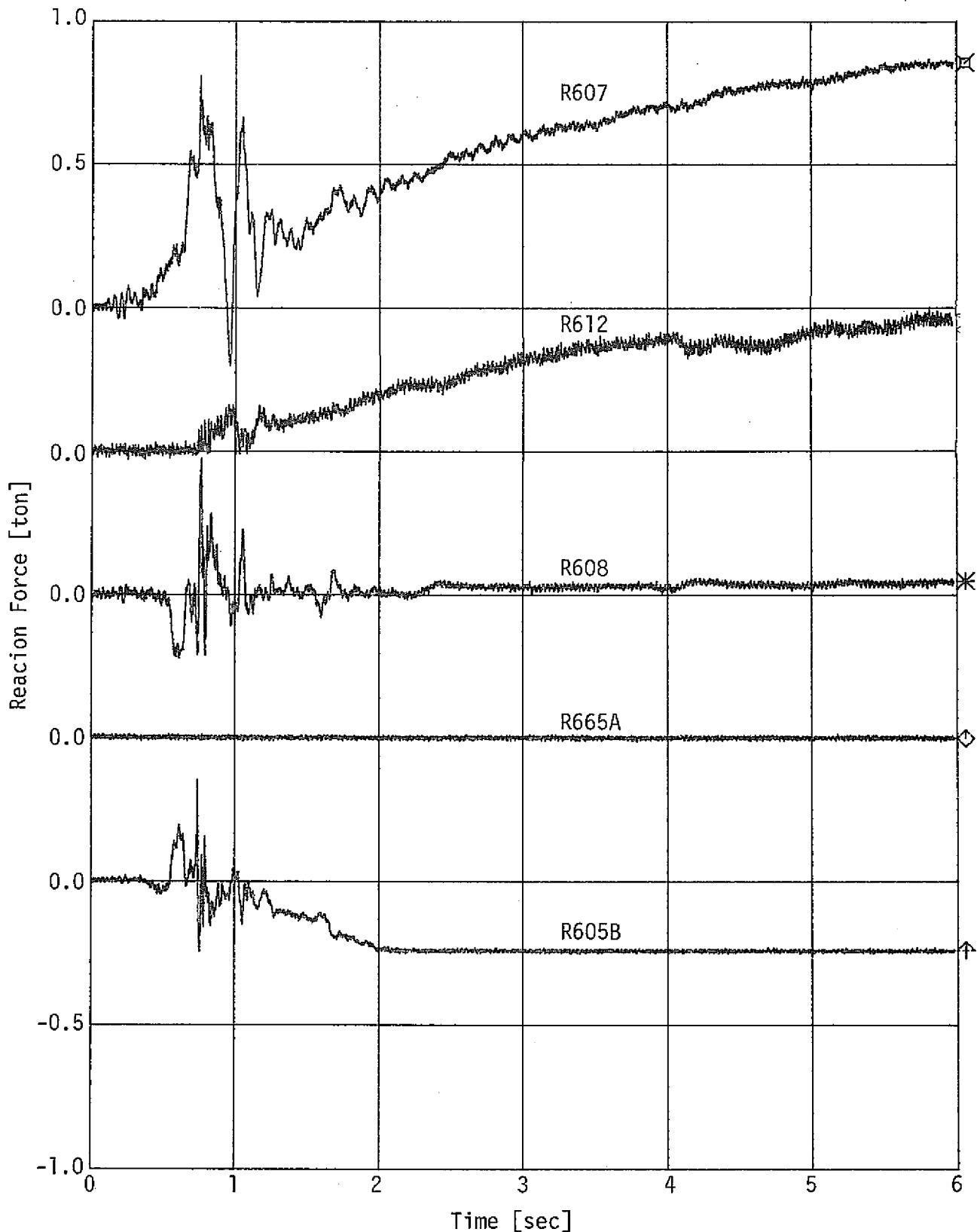


Fig. 3.3.12(c) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

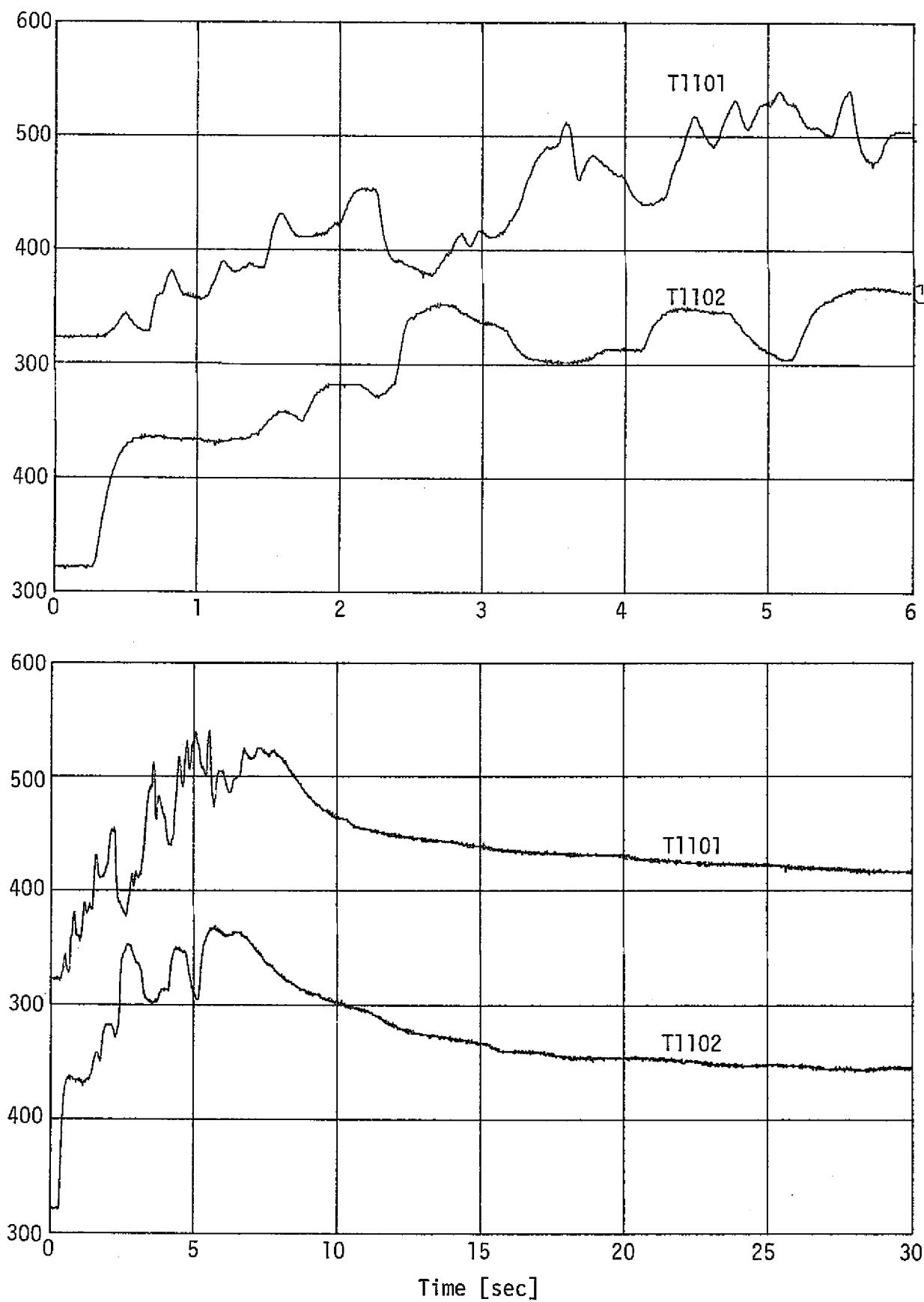


Fig. 3.3.13 Temperatures in Reaction Vessel

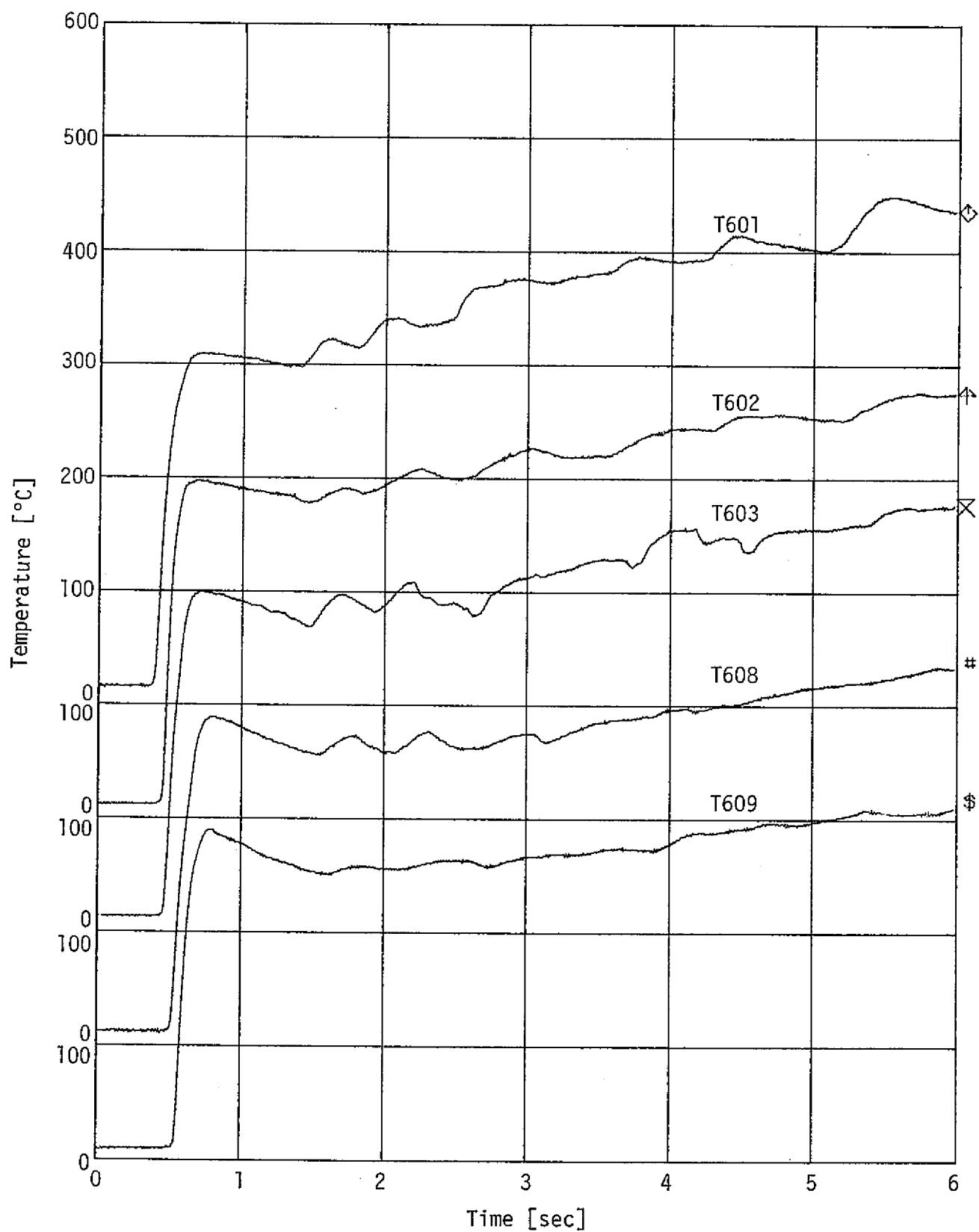


Fig. 3.3.14(a) Temperatures in Pressure Relief Line

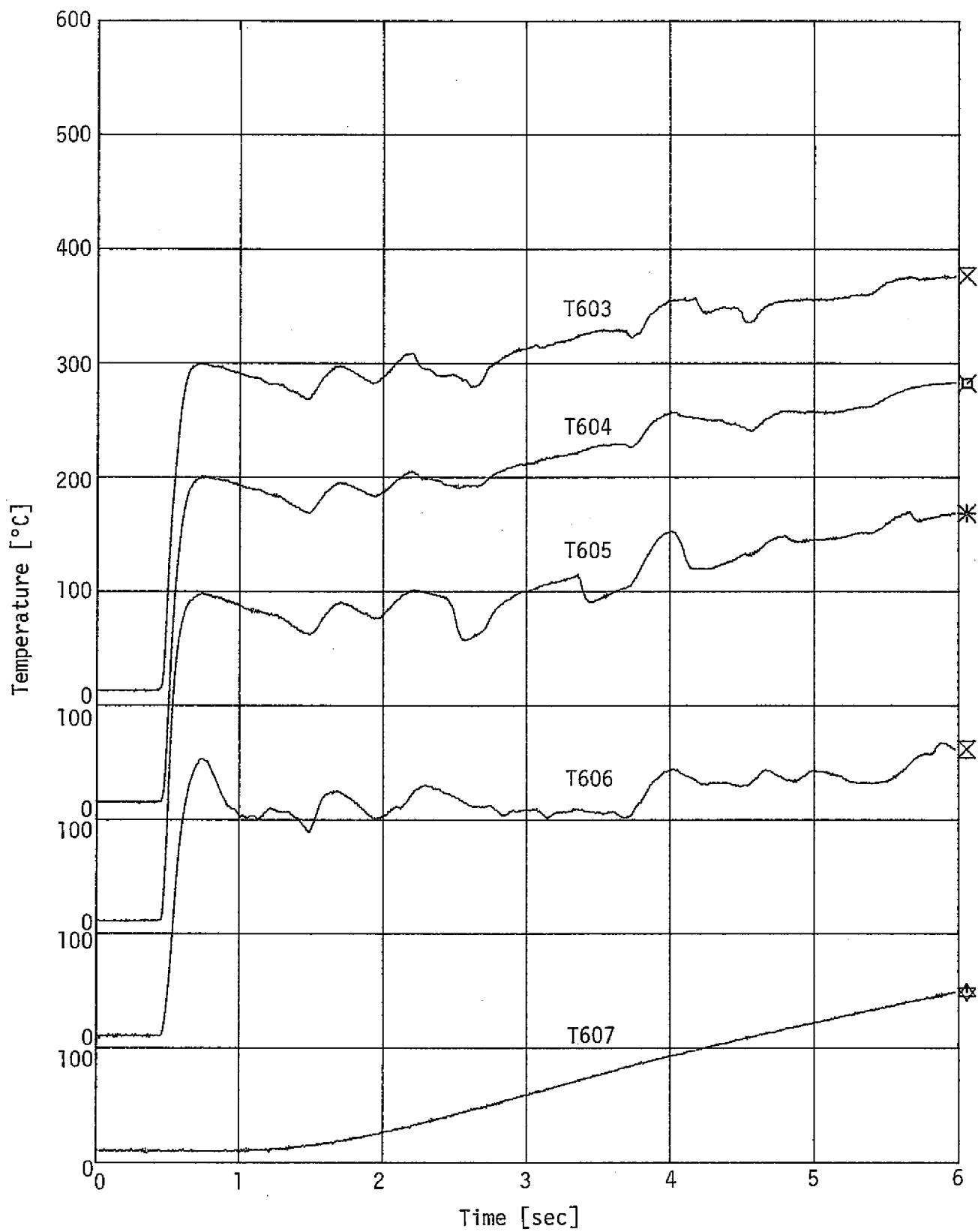


Fig. 3.3.14(b) Temperatures in Pressure Relief Line

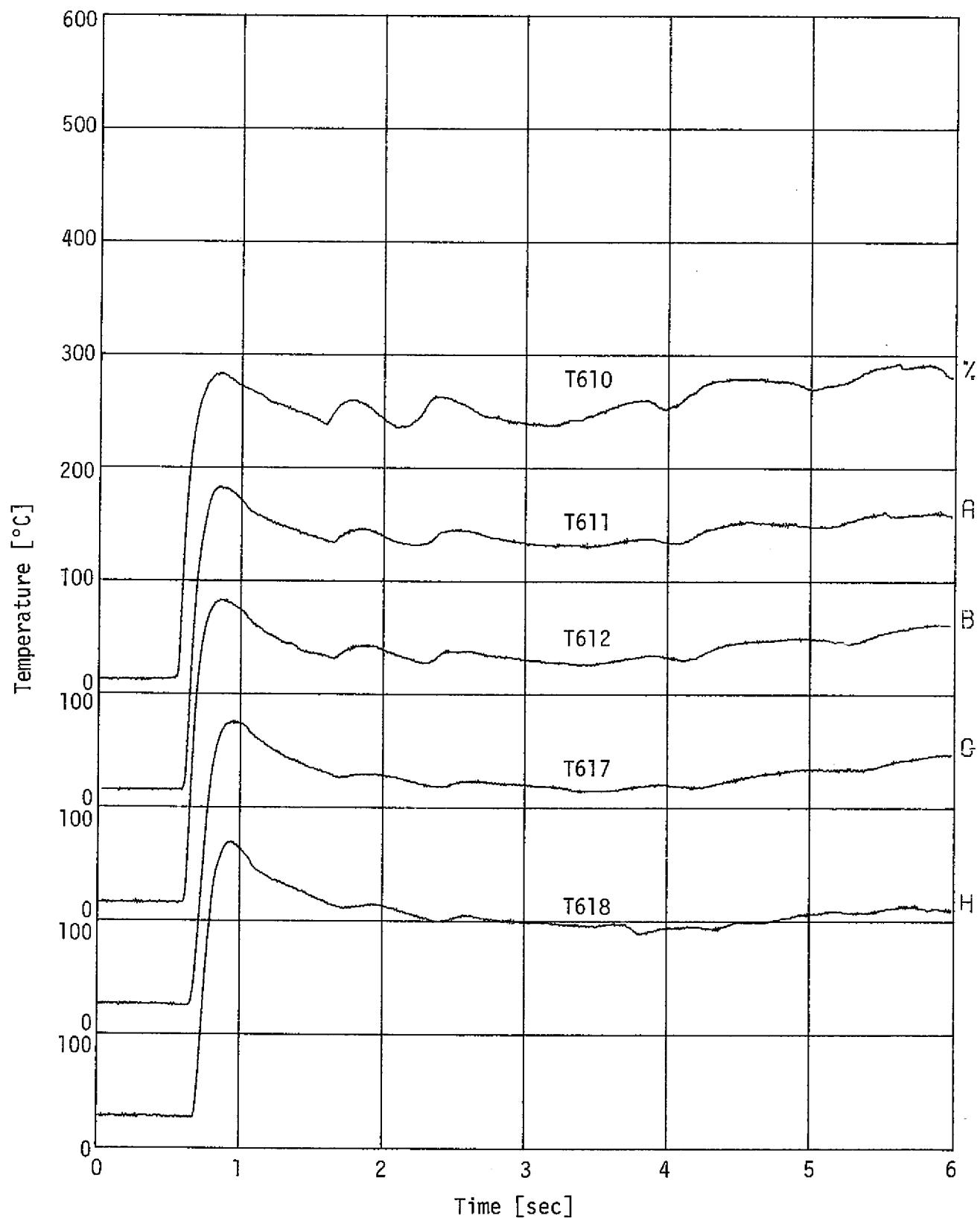


Fig. 3.3.14(c) Temperatures in Pressure Relief Line

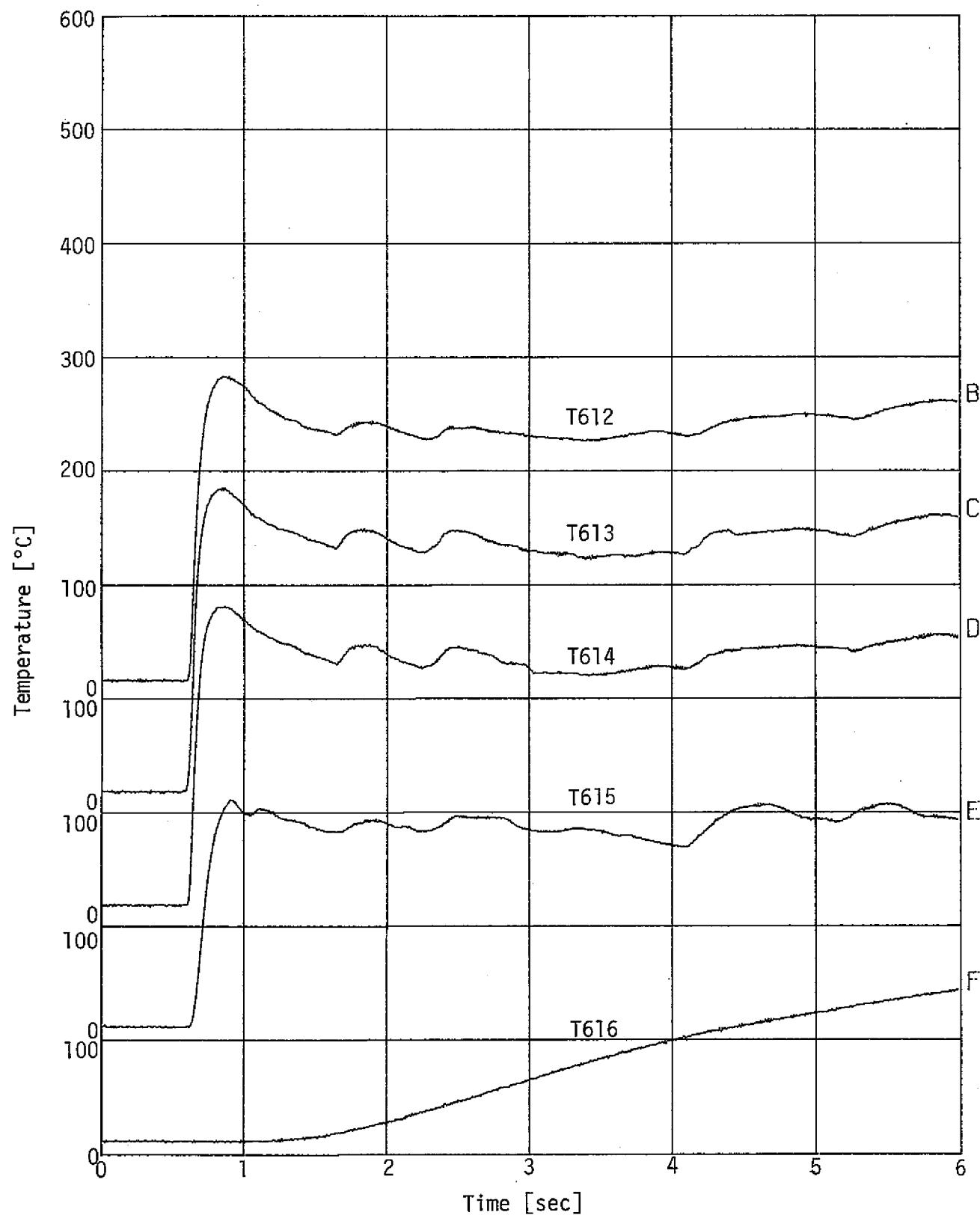


Fig. 3.3.14(d) Temperatures in Pressure Relief Line

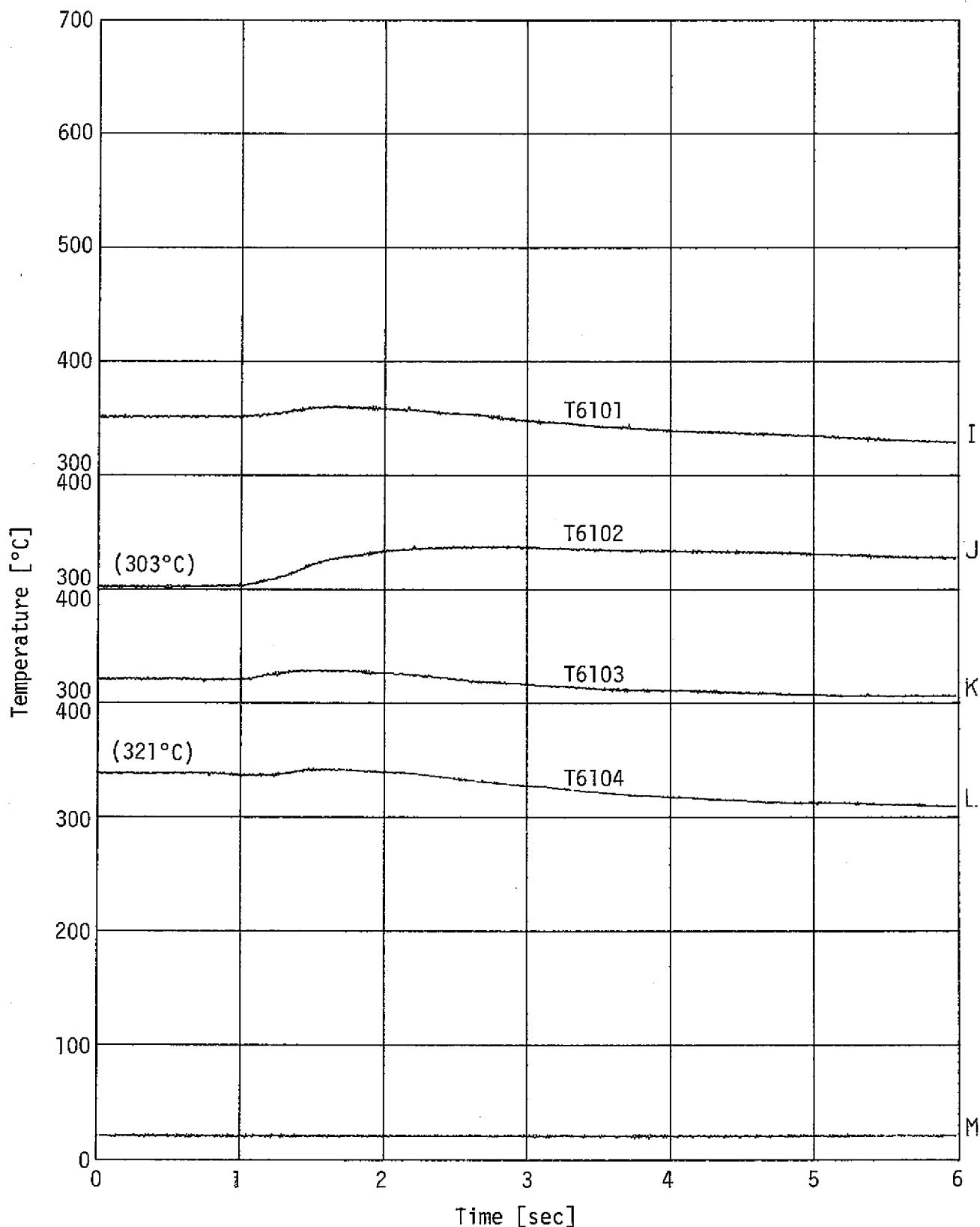


Fig. 3.3.15 Temperatures in Reaction Product Tank

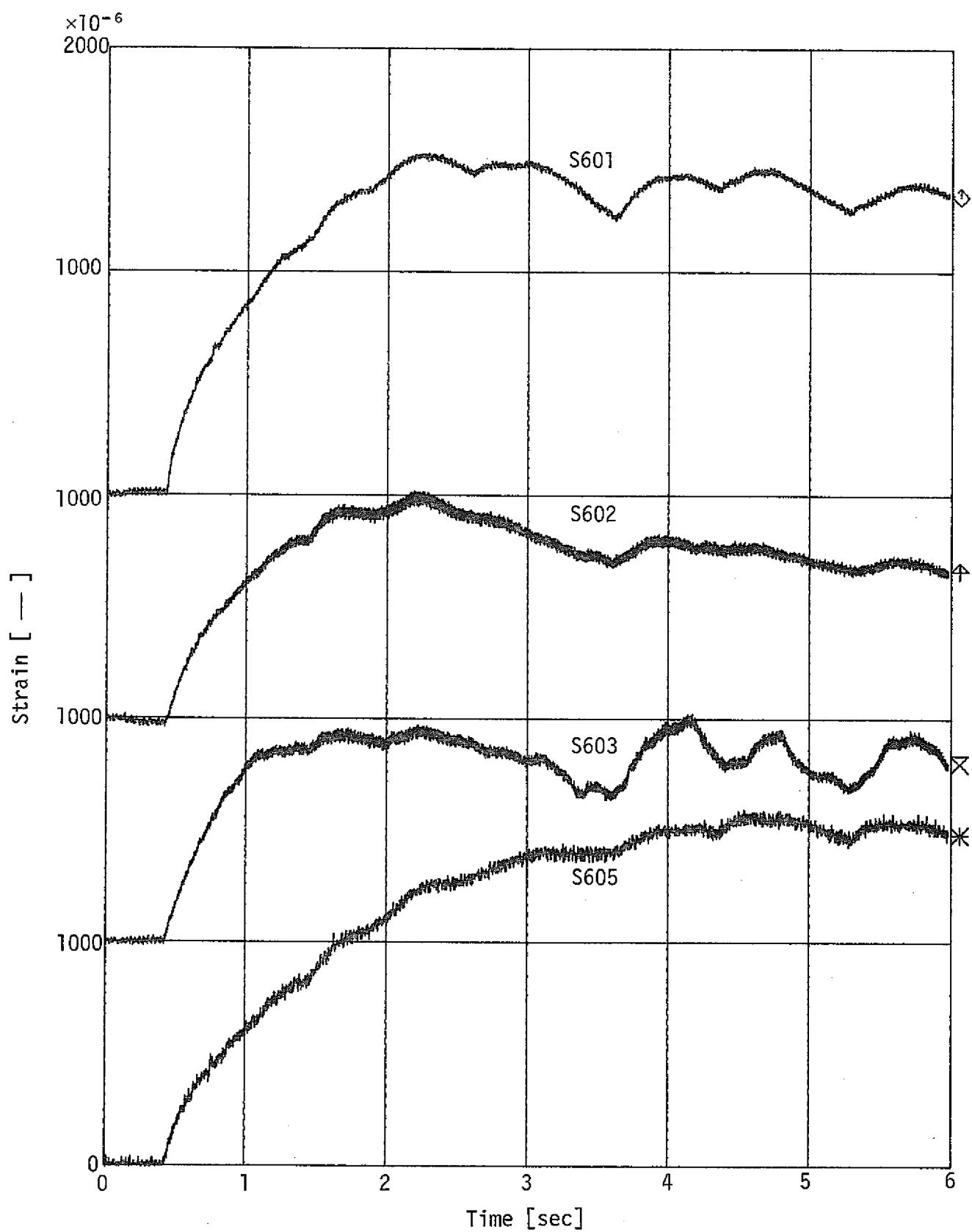


Fig. 3.3.16(a) Strains on Pressure Relief Piping

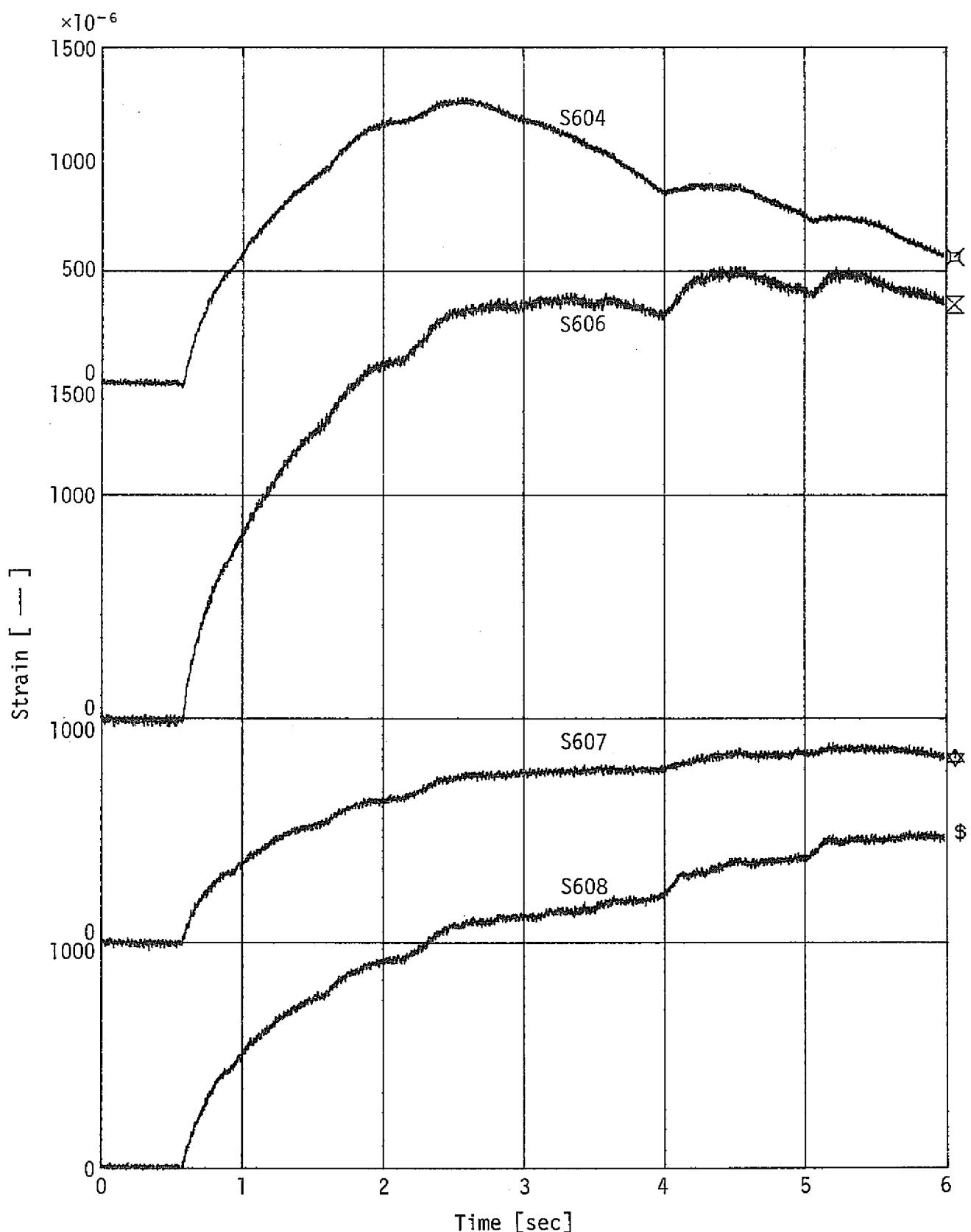


Fig. 3.3.16(b) Strains on Pressure Relief Piping

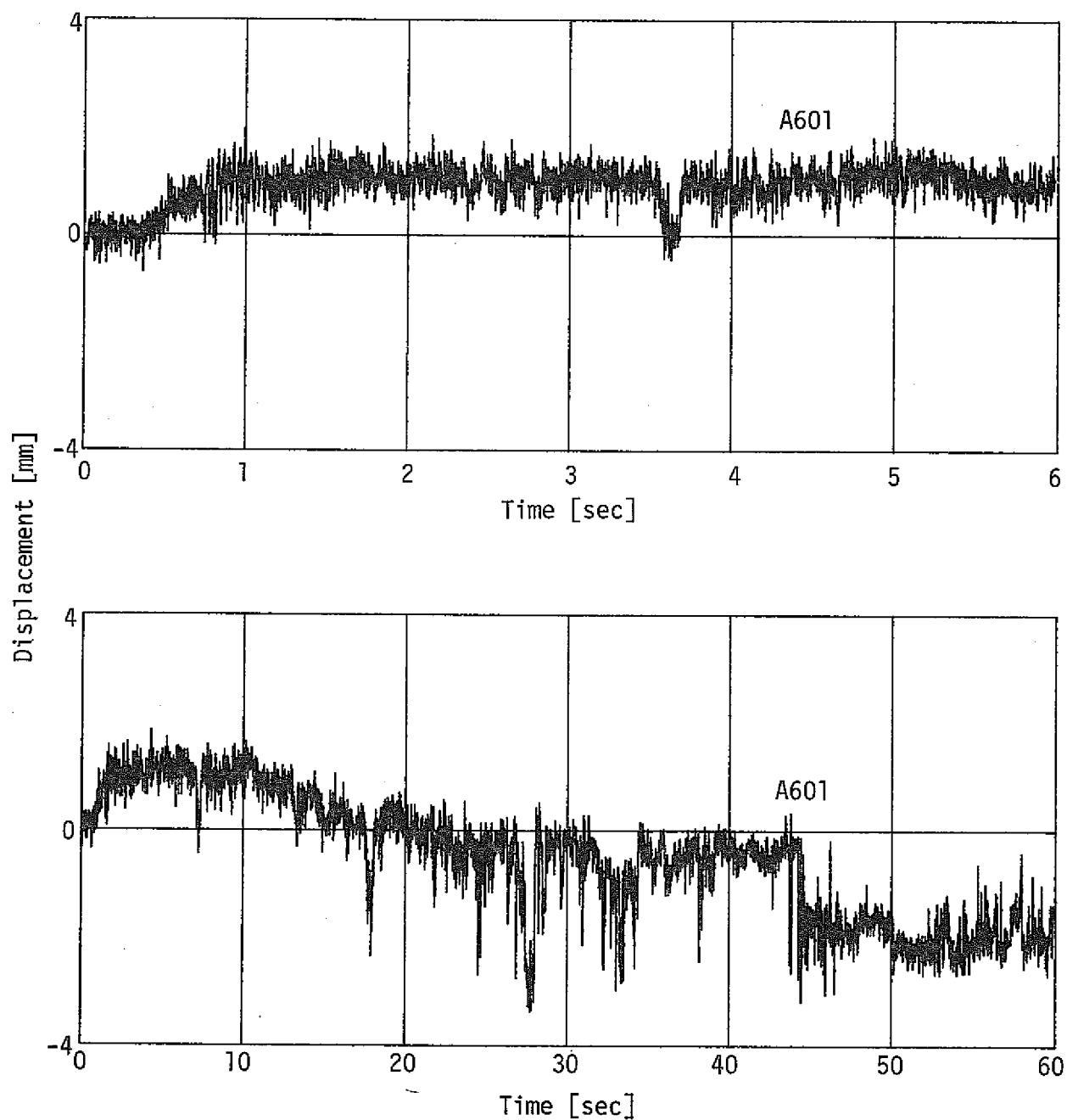


Fig. 3.3.17 Displacement of Pressure Relief Piping

Run-94 試 驗 結 果

Fig.3.4.1

↓

Fig.3.4.17

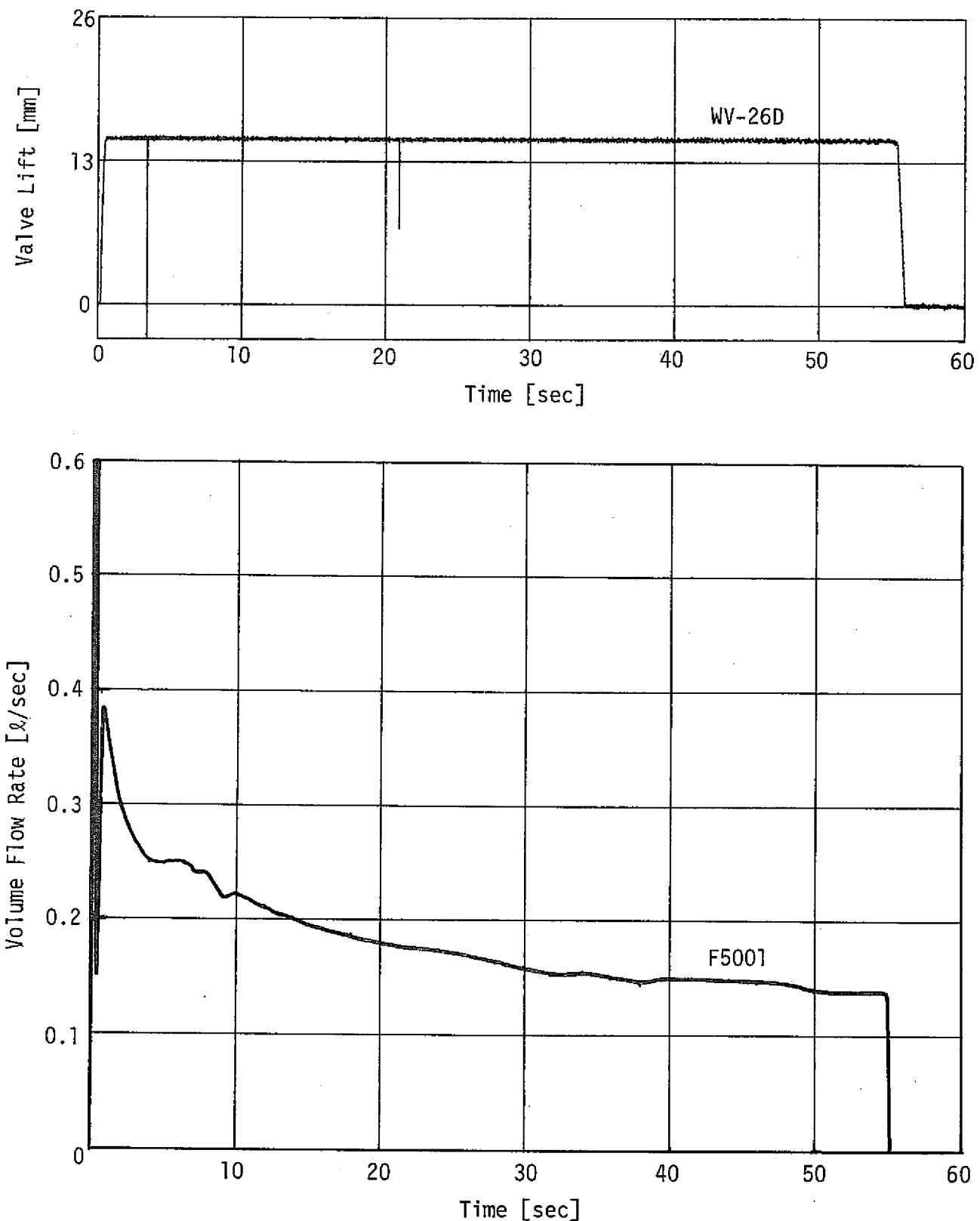


Fig. 3.4.1 Water Injection Valve Opening & Volume Flow Rate

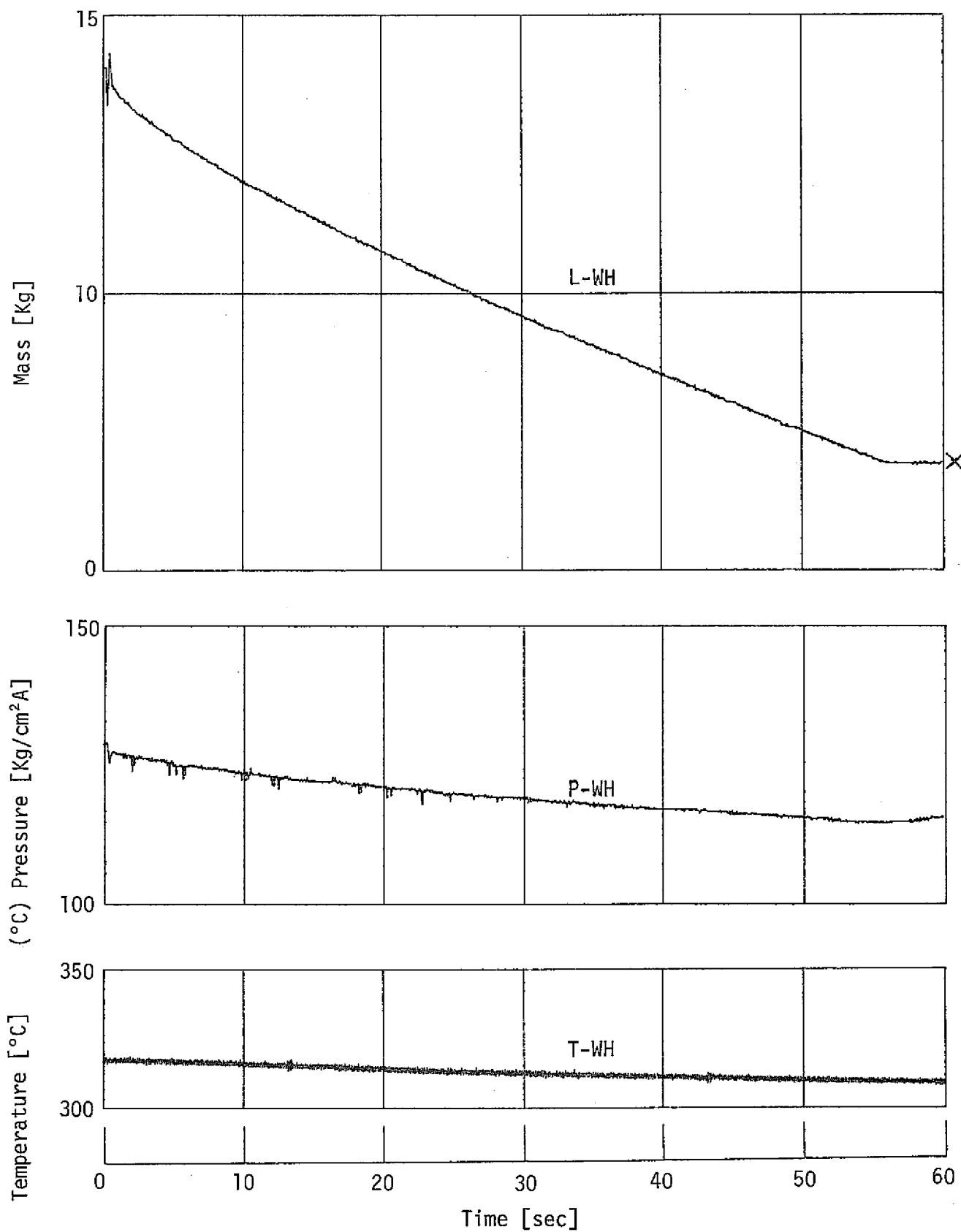


Fig. 3.4.2 Water Heater Conditions

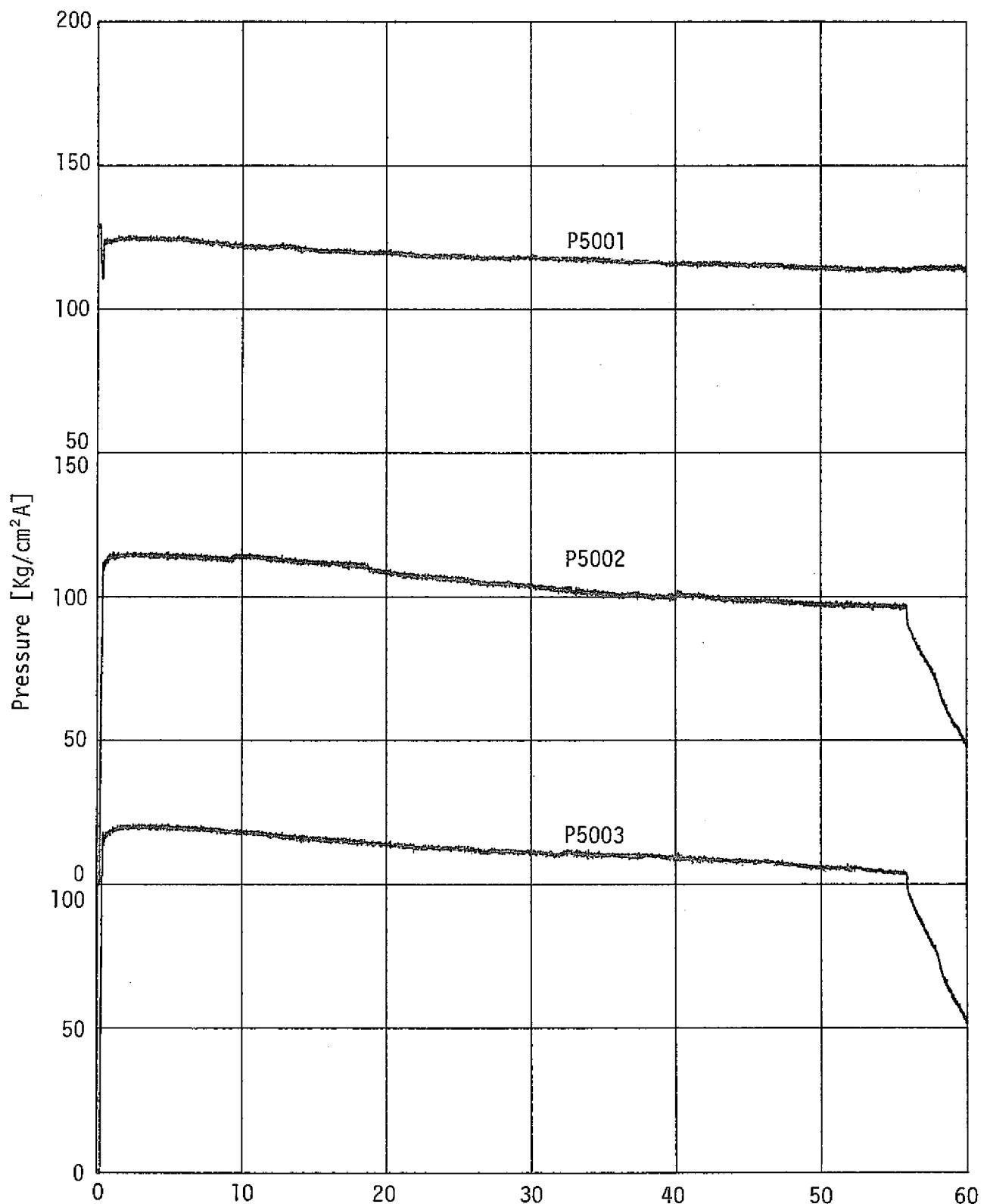


Fig. 3.4.3 Pressures in Water Injection Line

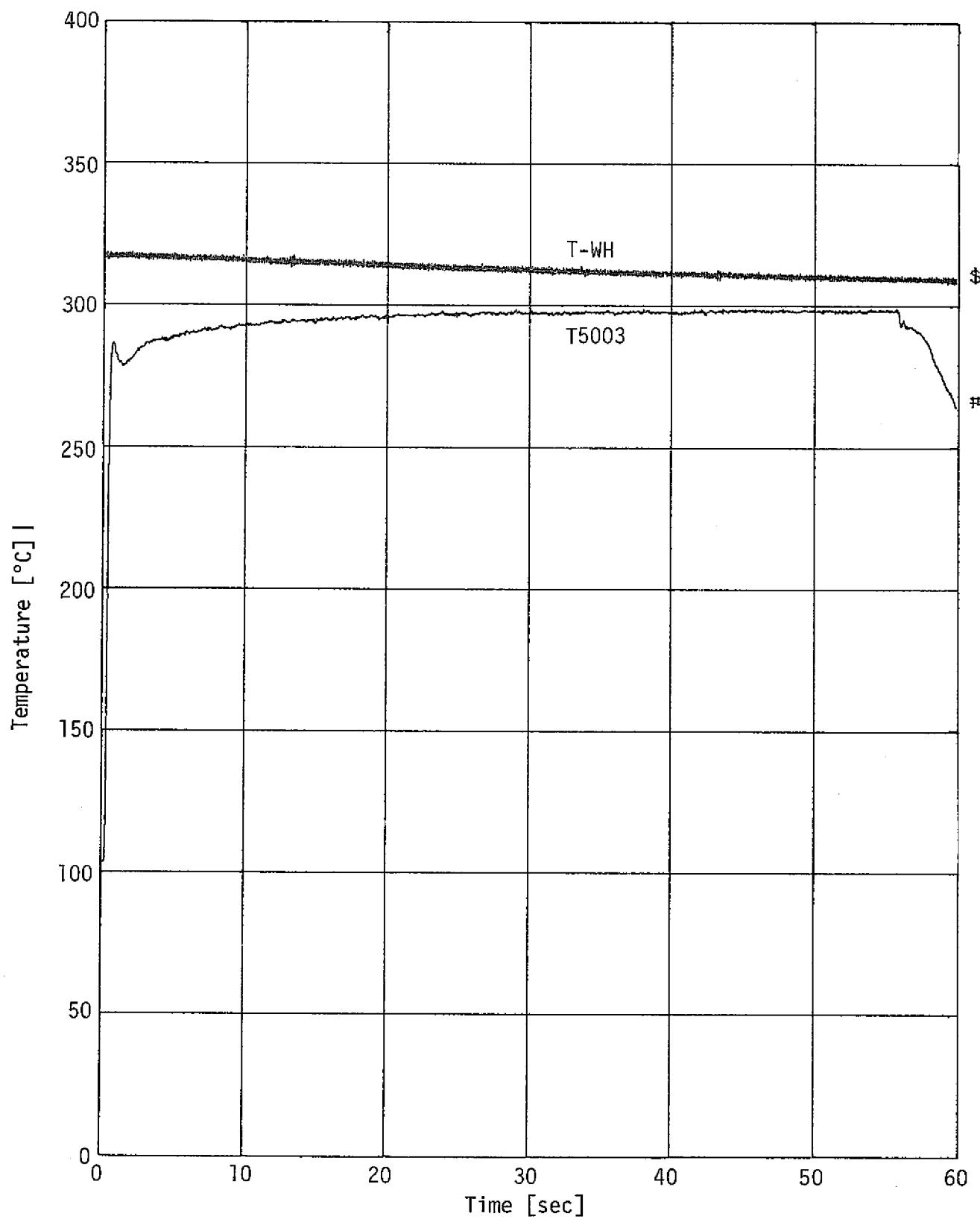


Fig. 3.4.4 Temperatures in Water Injection Line

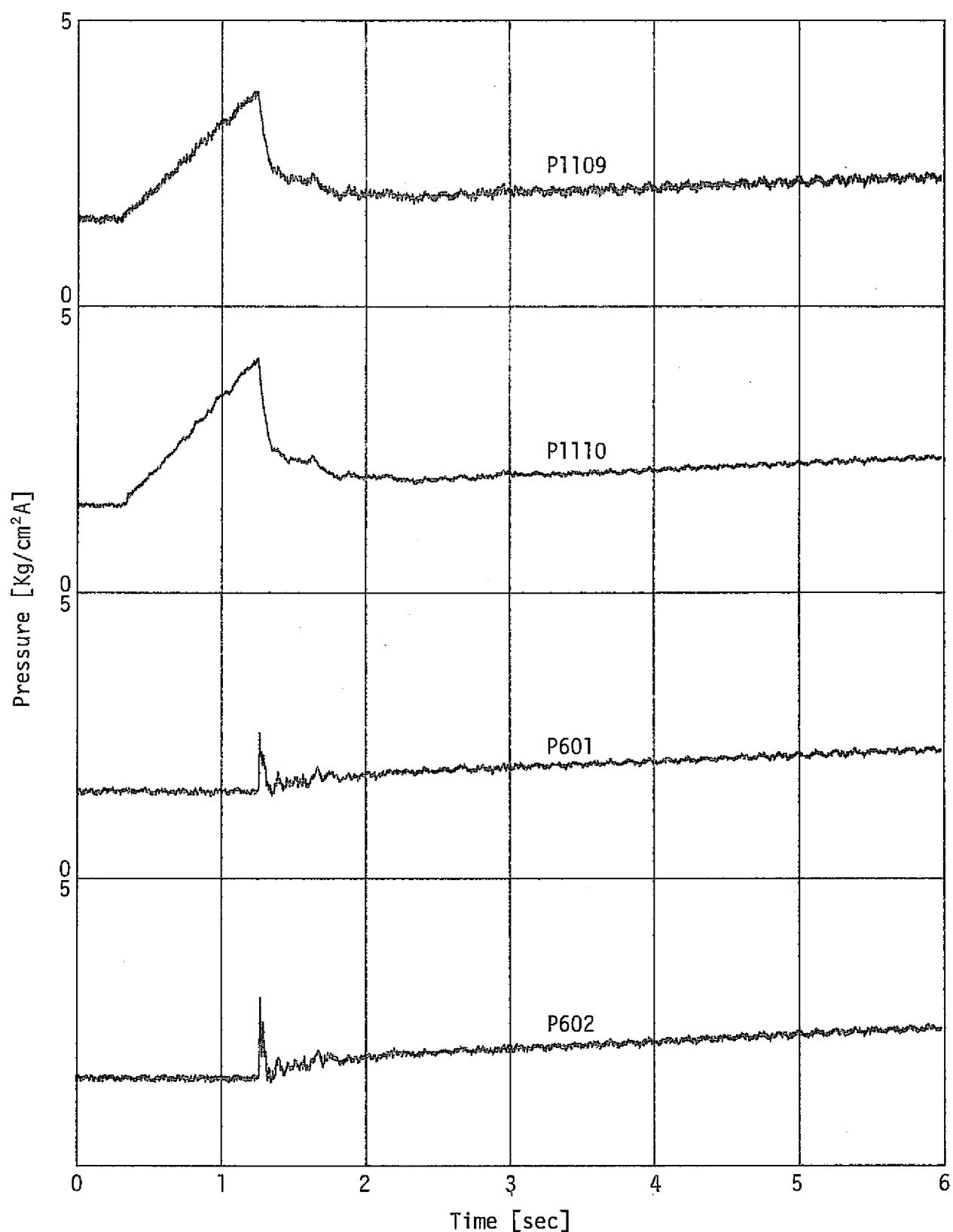


Fig. 3.4.5(a) Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line

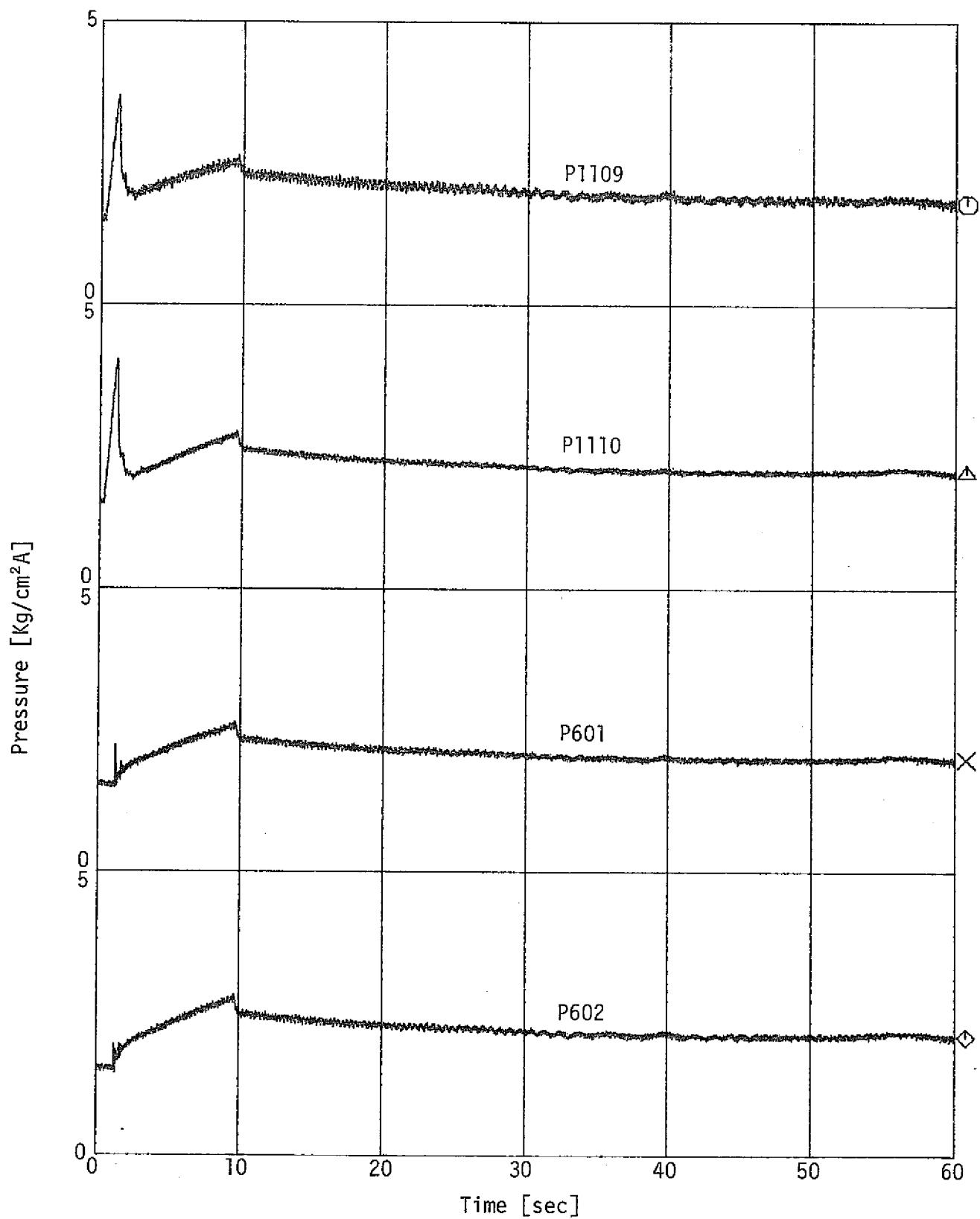


Fig. 3.4.5(b) Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line

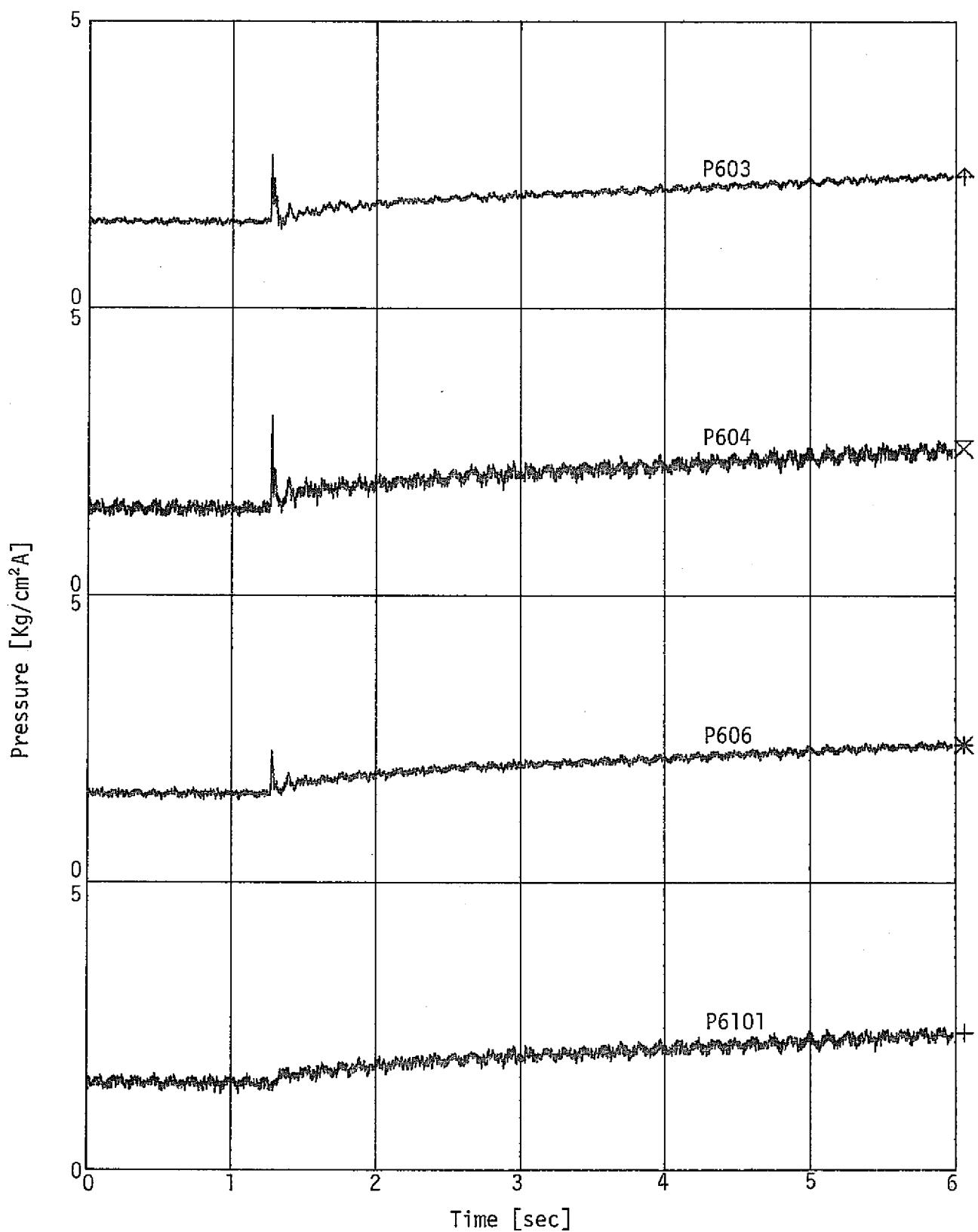


Fig. 3.4.5(c) Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line

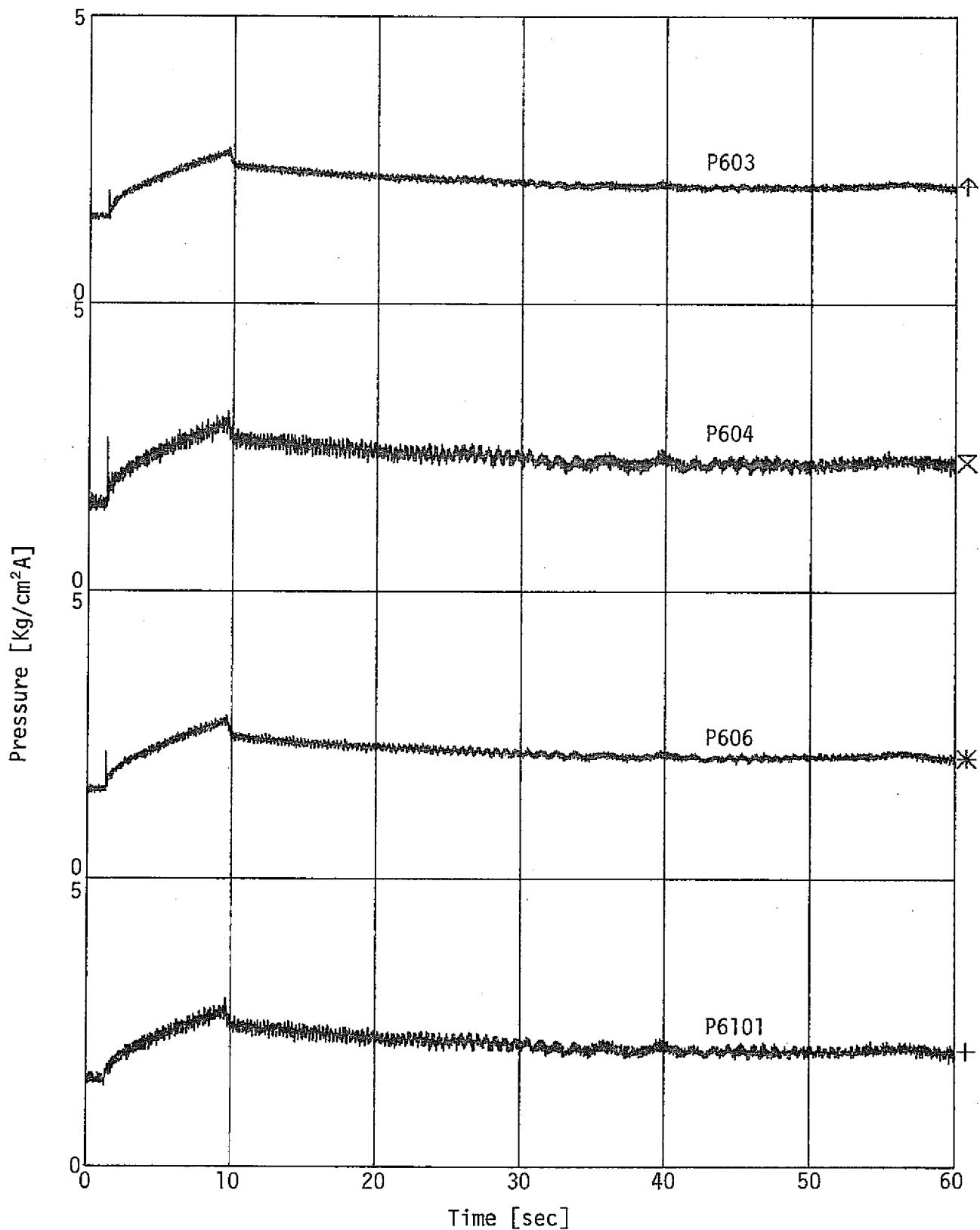


Fig. 3.4.5(d) Pressures in Reaction Vessel and Pressure Relief Line

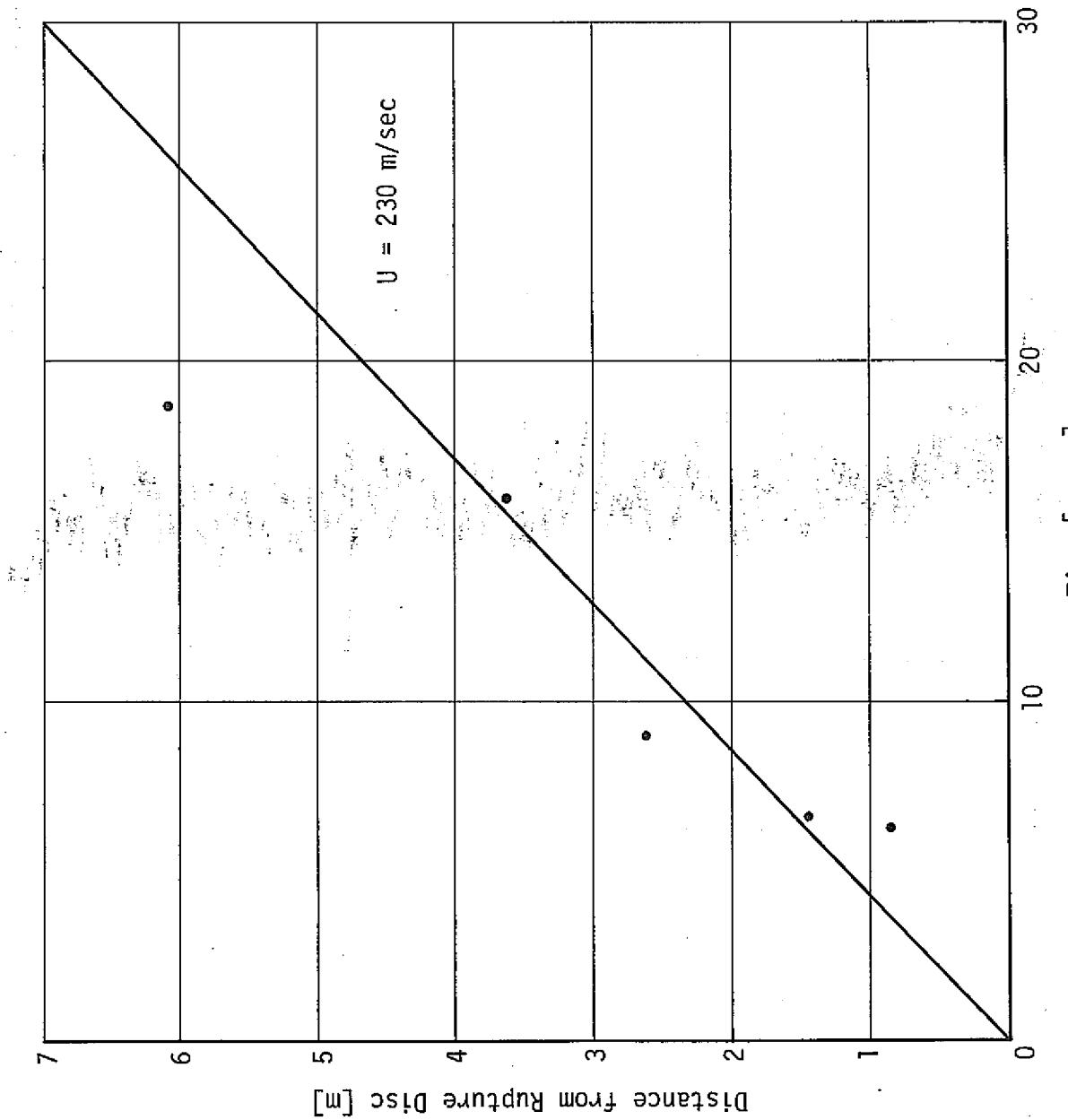


Fig. 3.4.6 Pressure Spike Propagation Velocity

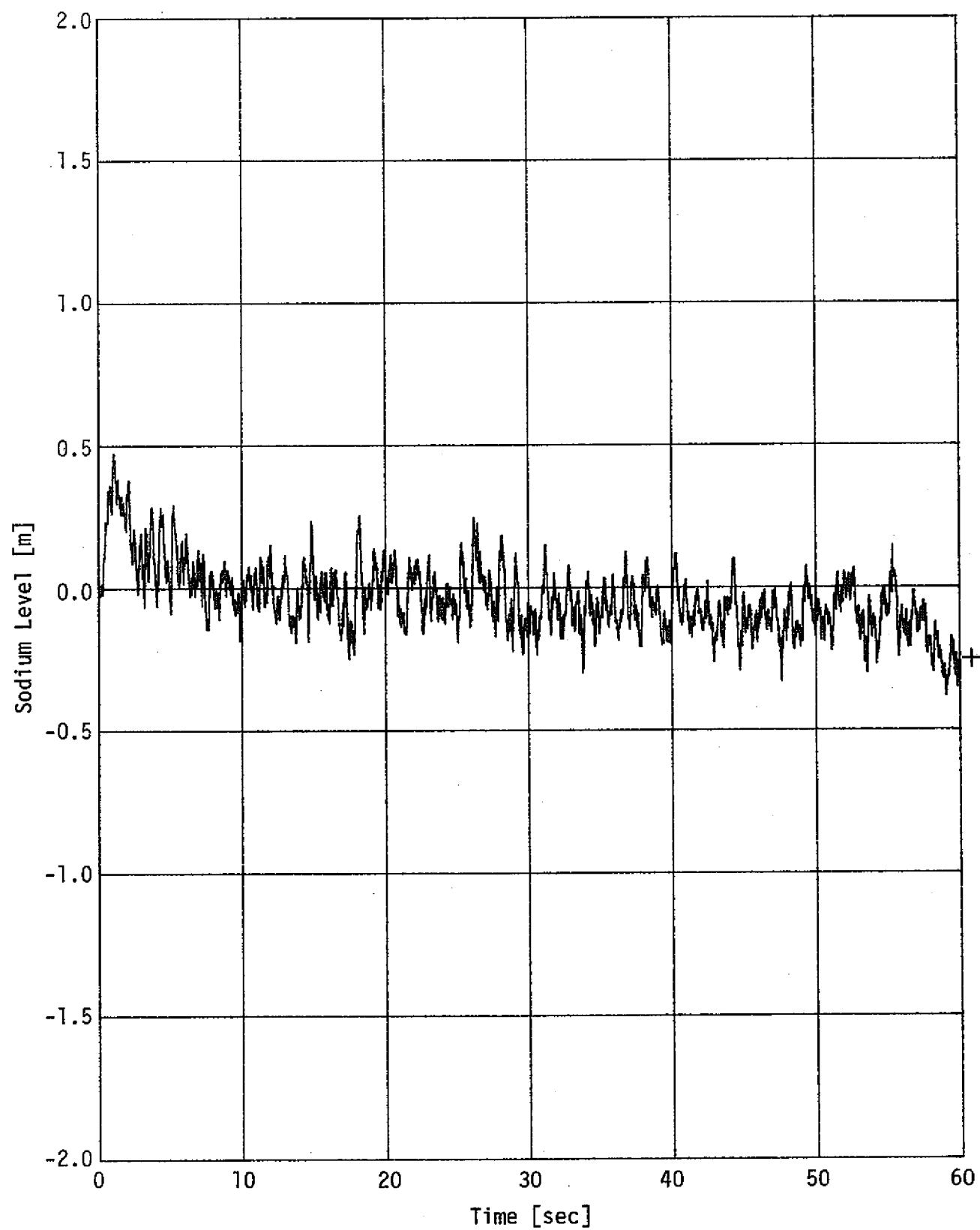


Fig. 3.4.7 Sodium Level in Reaction Vessel

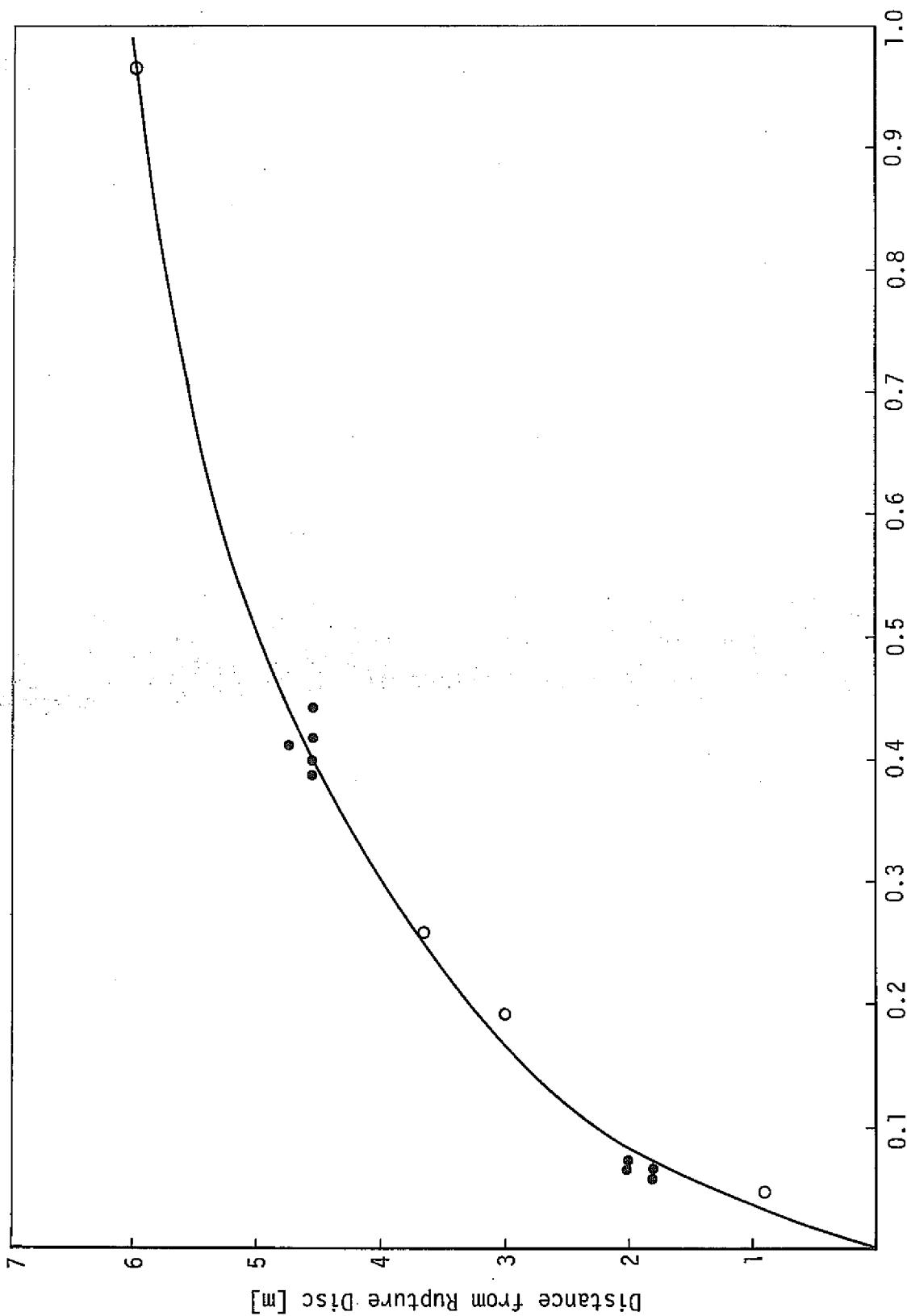


Fig. 3.4.8 Velocity Derived from the Sodium void Signals

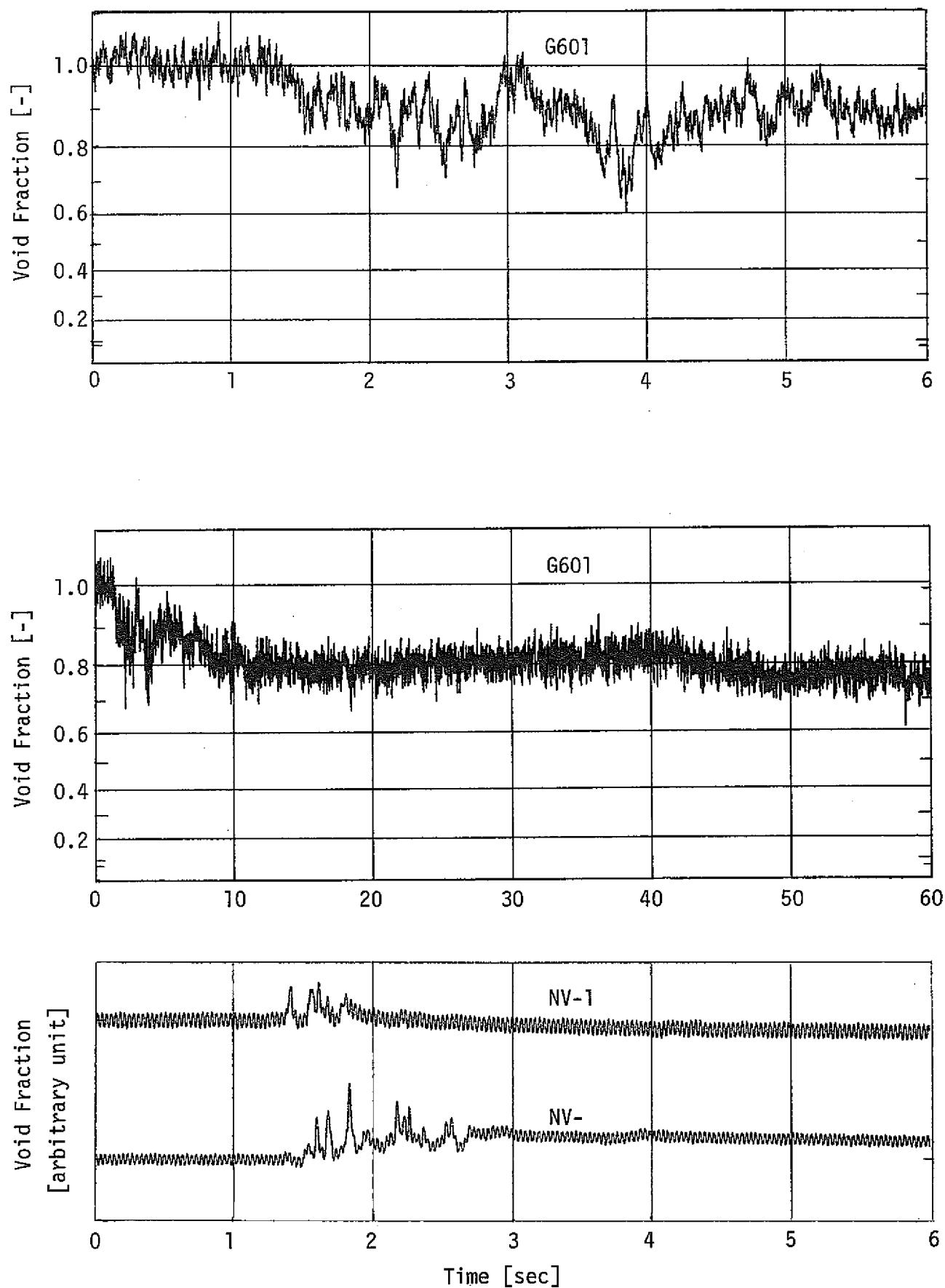


Fig. 3.4.9 Void Fraction in Pressure Relief Line

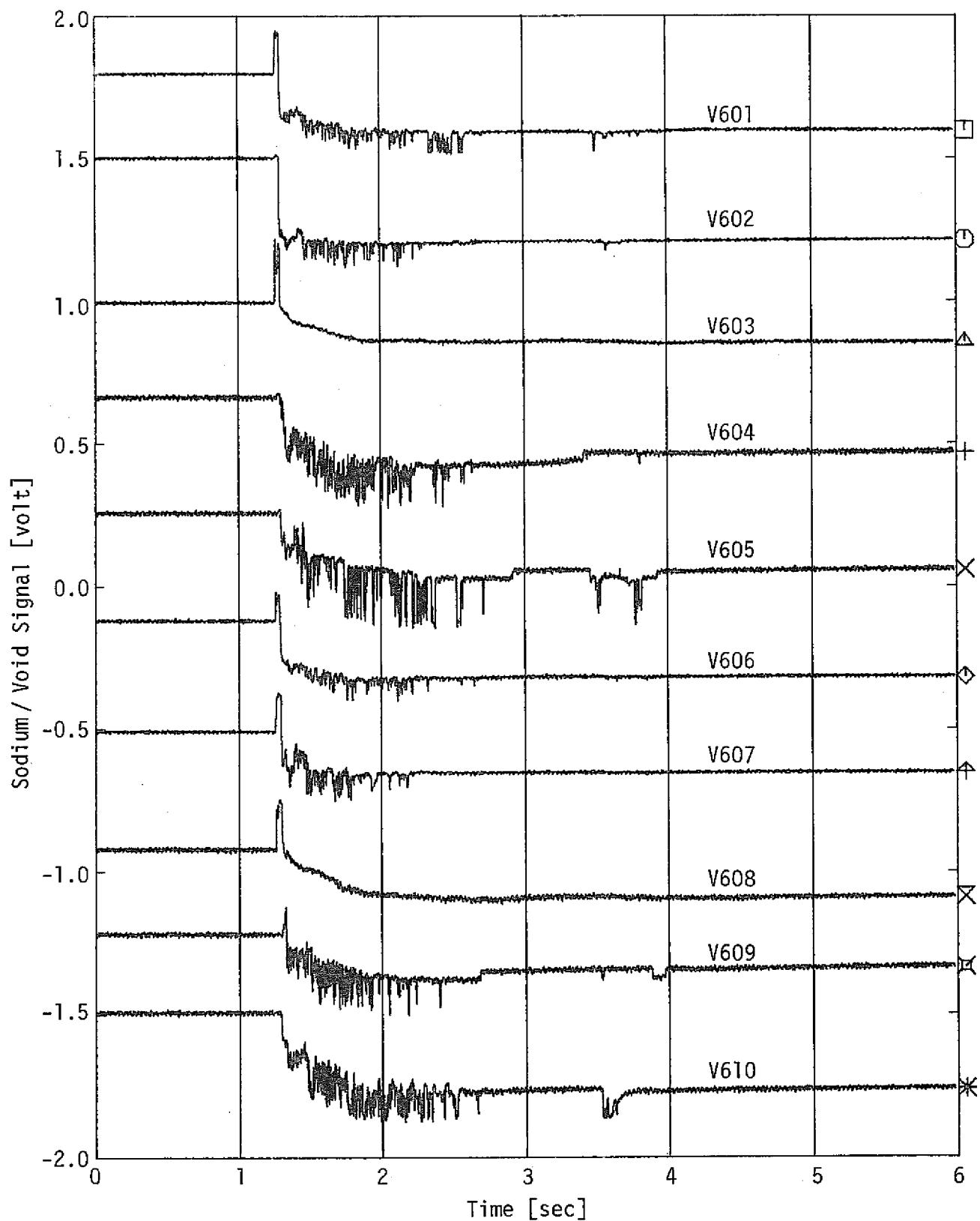


Fig. 3.4.10(a) The Results of Sodium Void Sensor

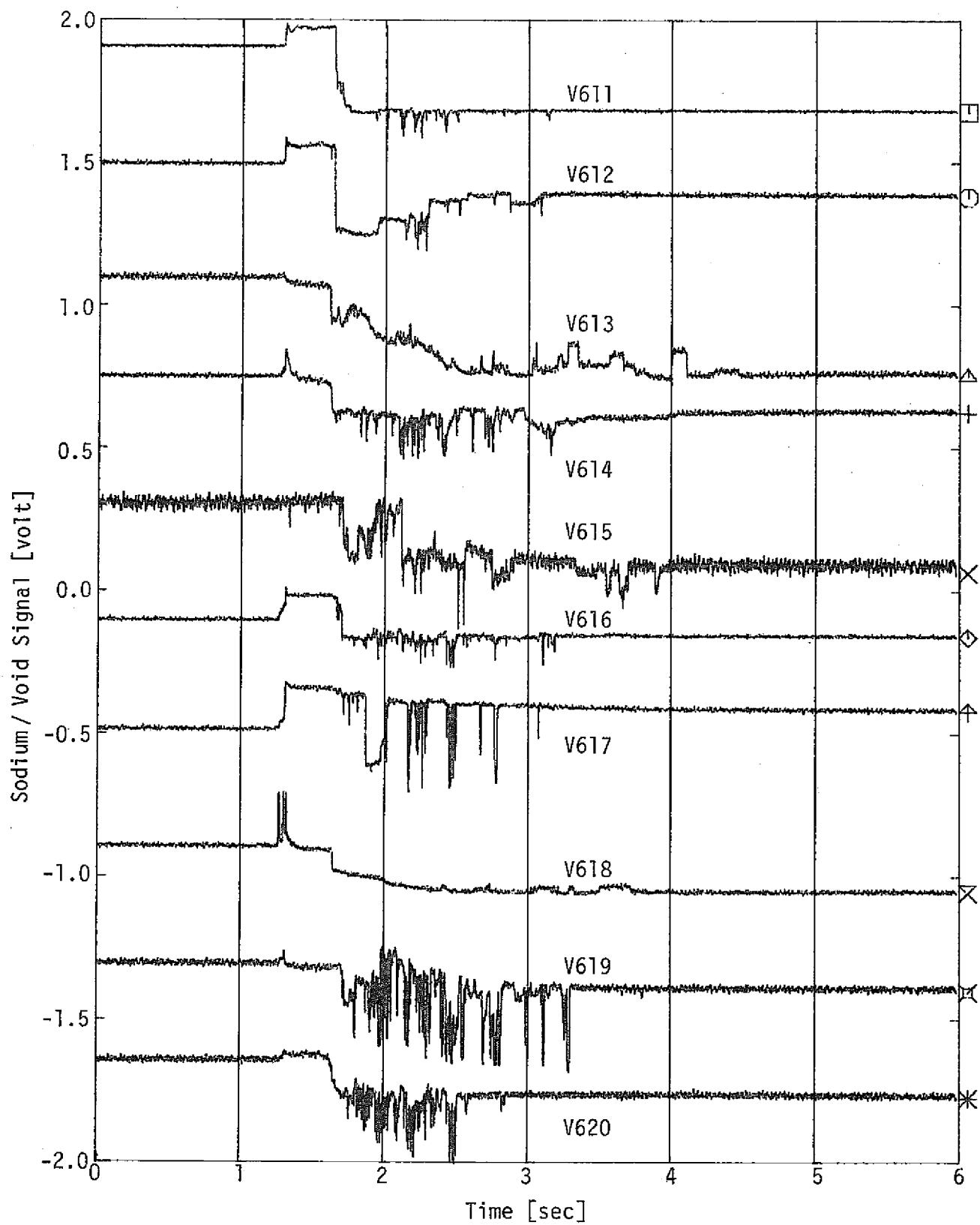


Fig. 3.4.10(b) The Results of Sodium Void Sensor

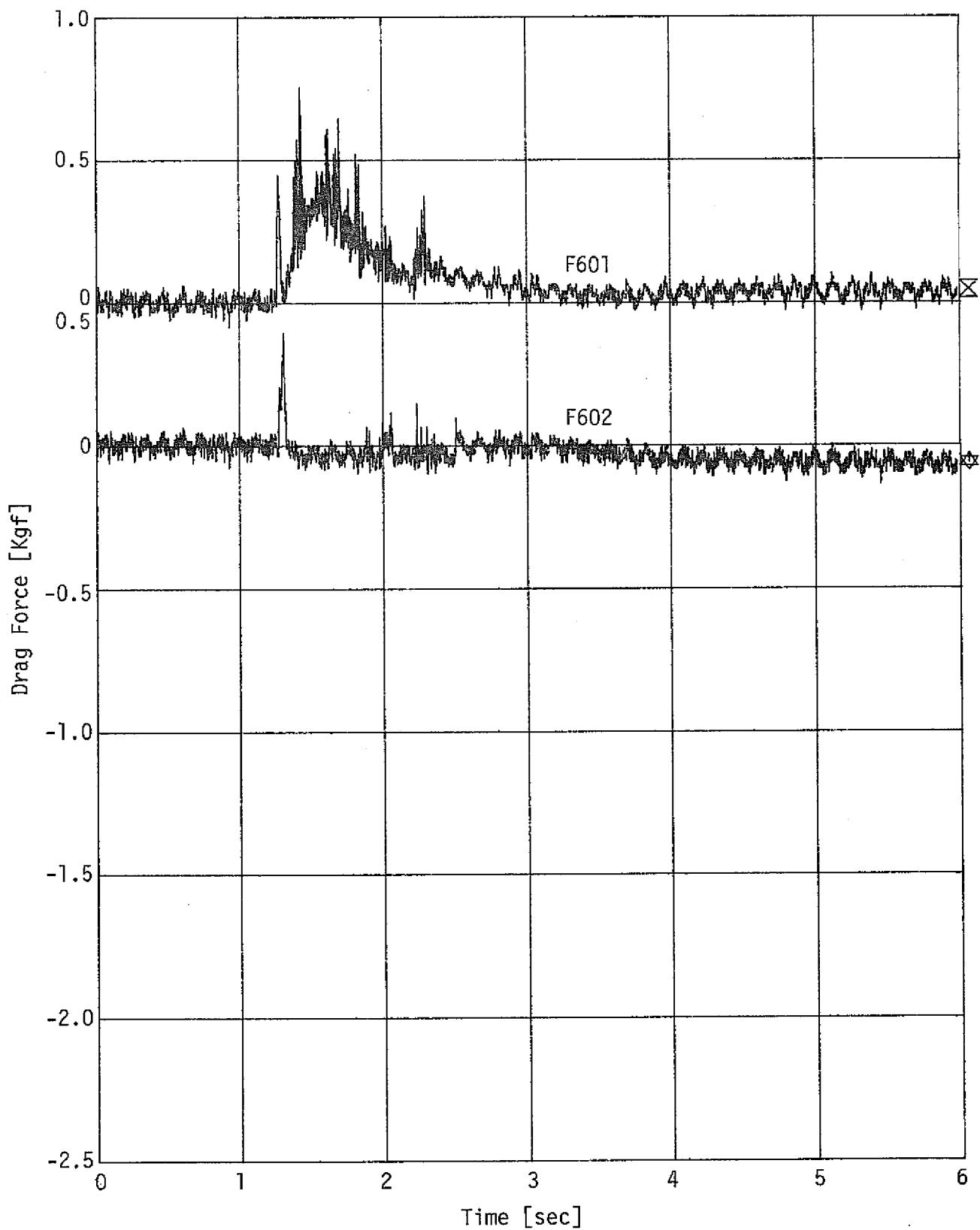


Fig. 3.4.11 Drag Force in Pressure Relief Line

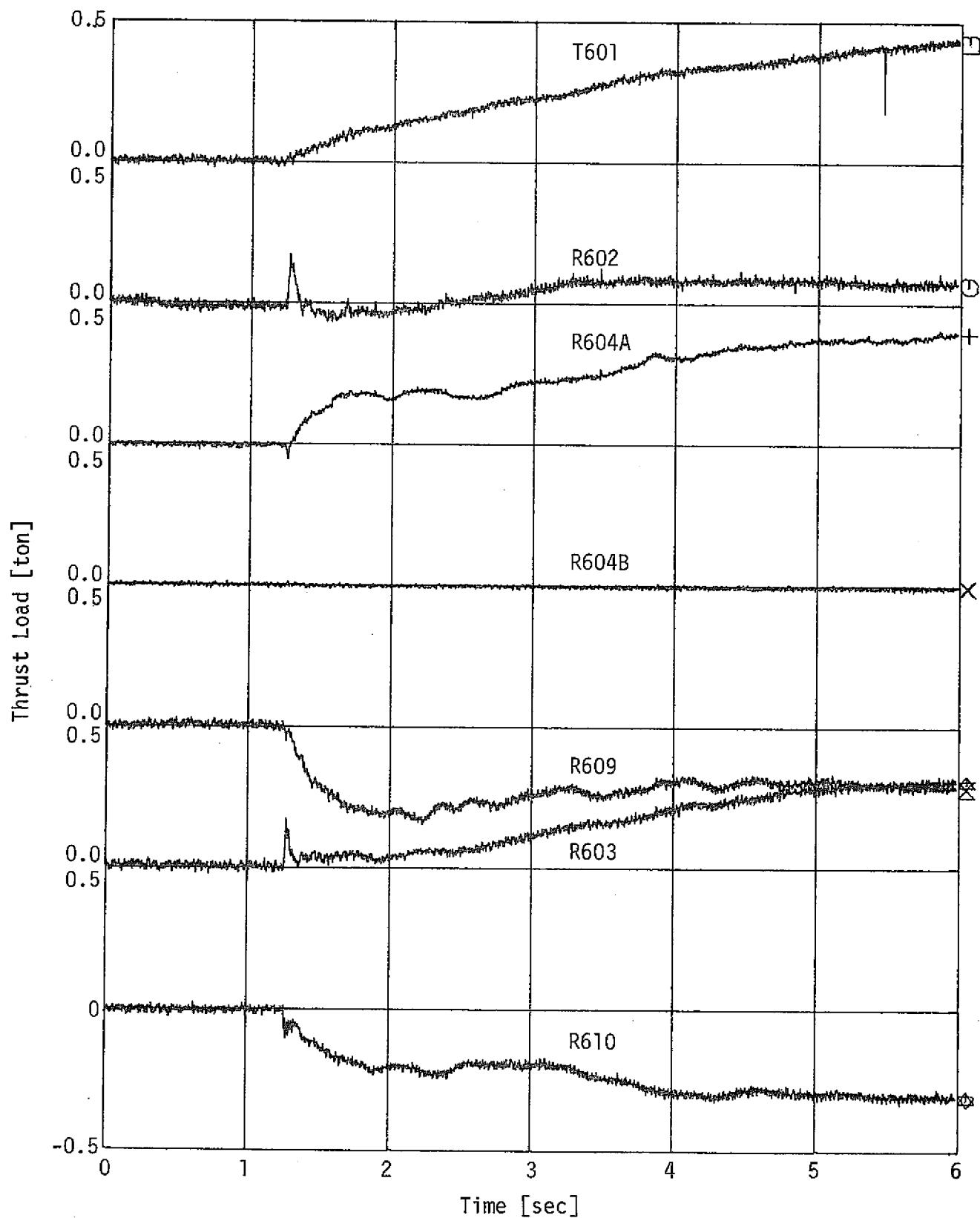


Fig. 3.4.12(a) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

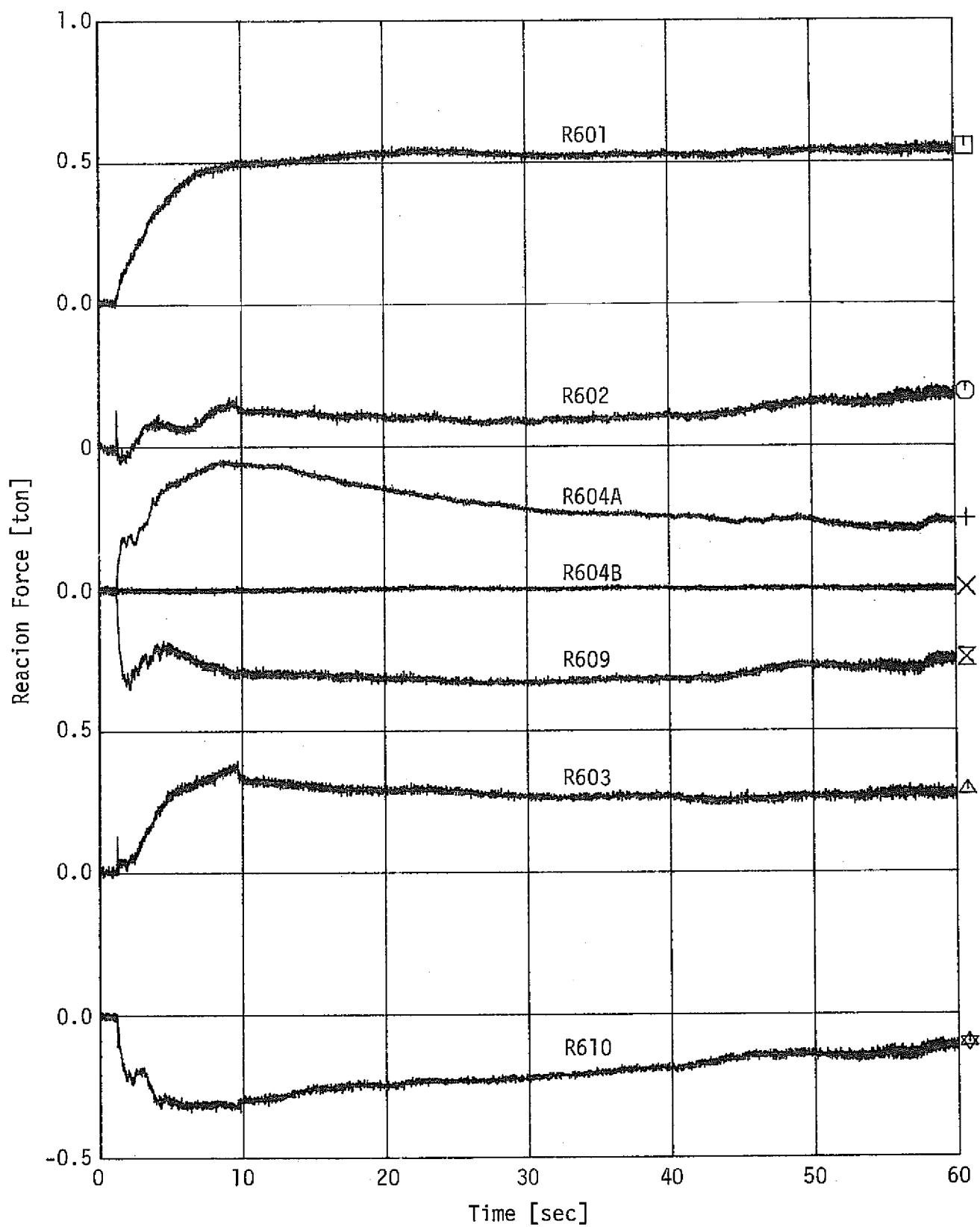


Fig. 3.4.12(b) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

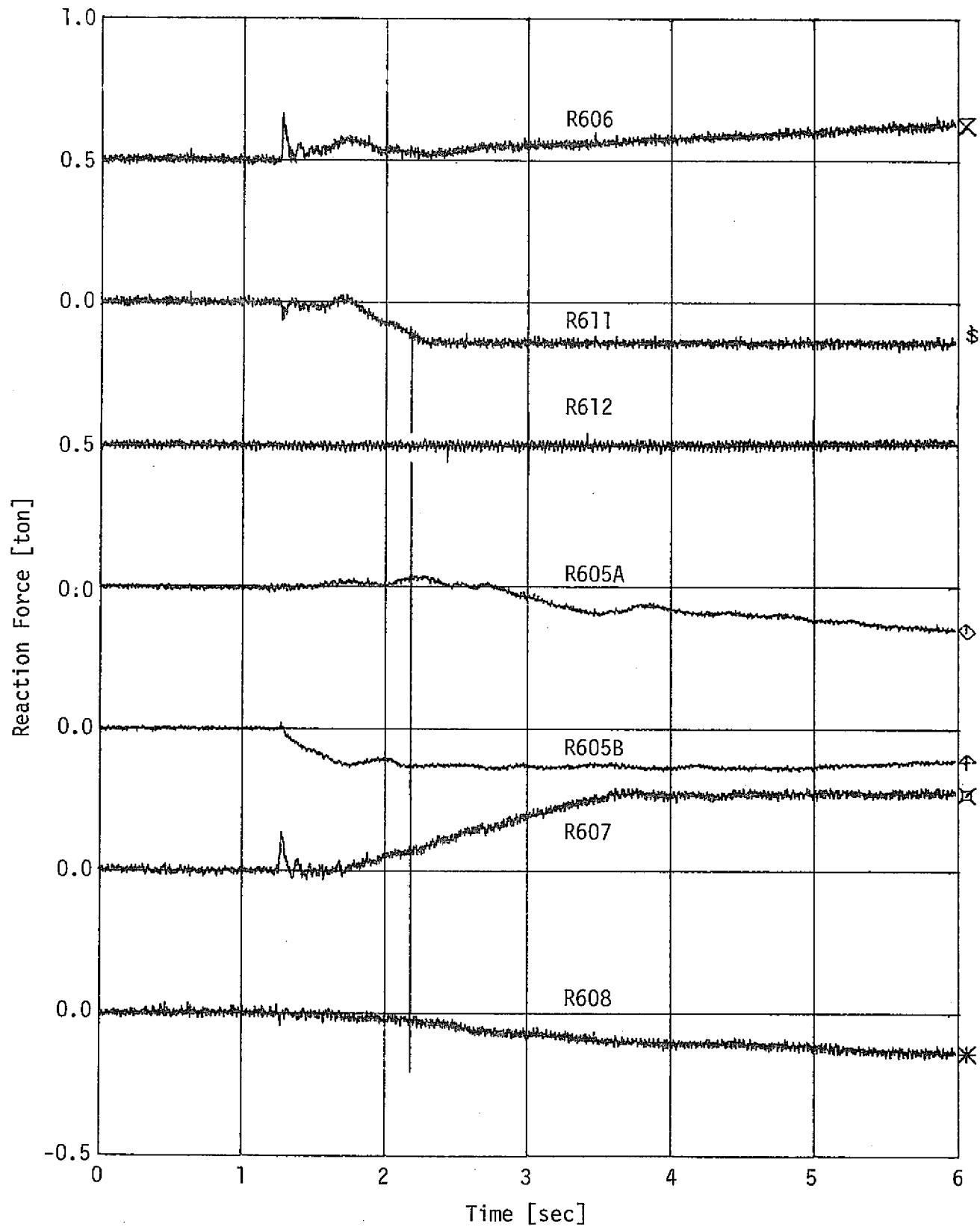


Fig. 3.4.12(c) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

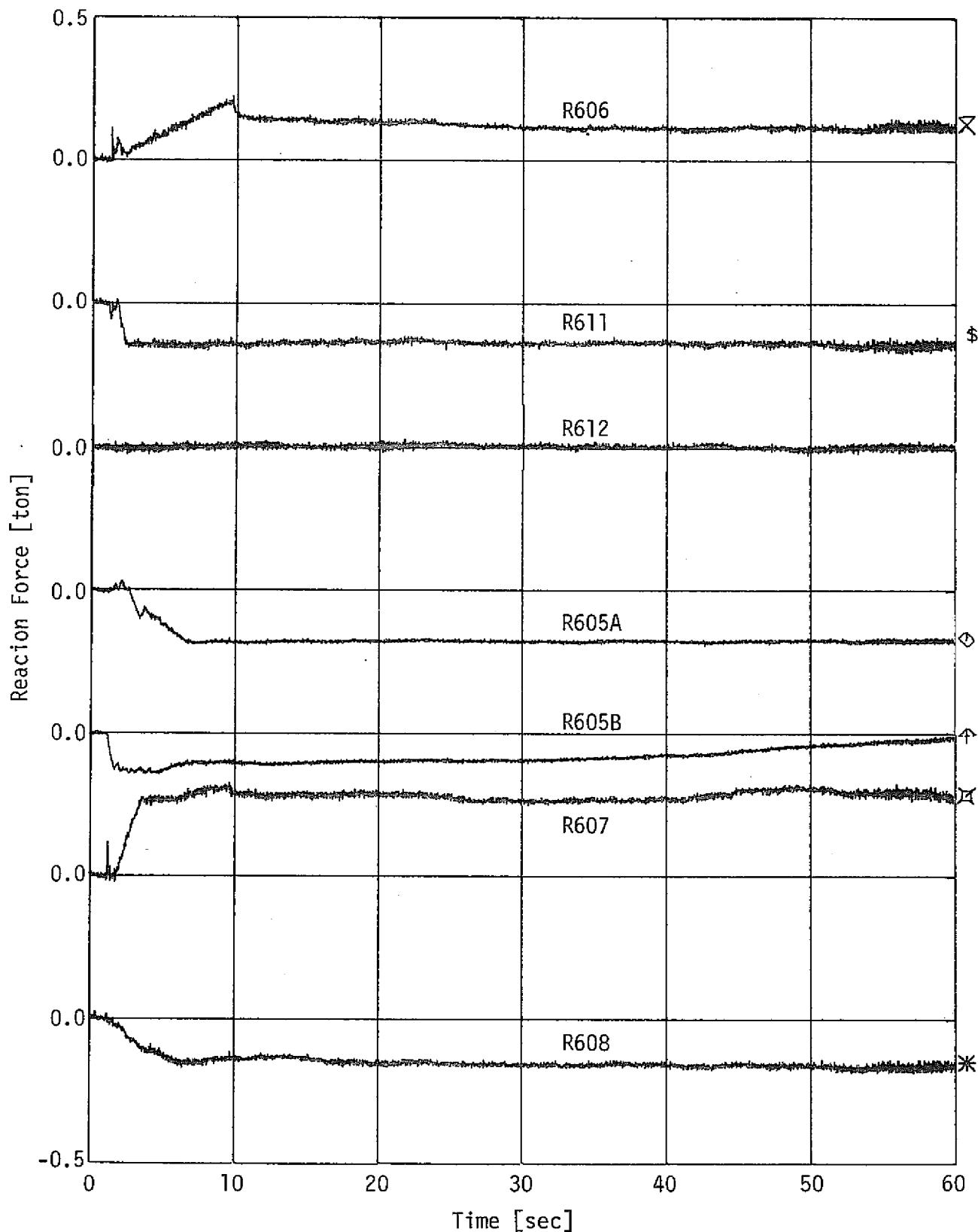


Fig. 3.4.12(d) Thrust Loads on Pressure Relief Piping

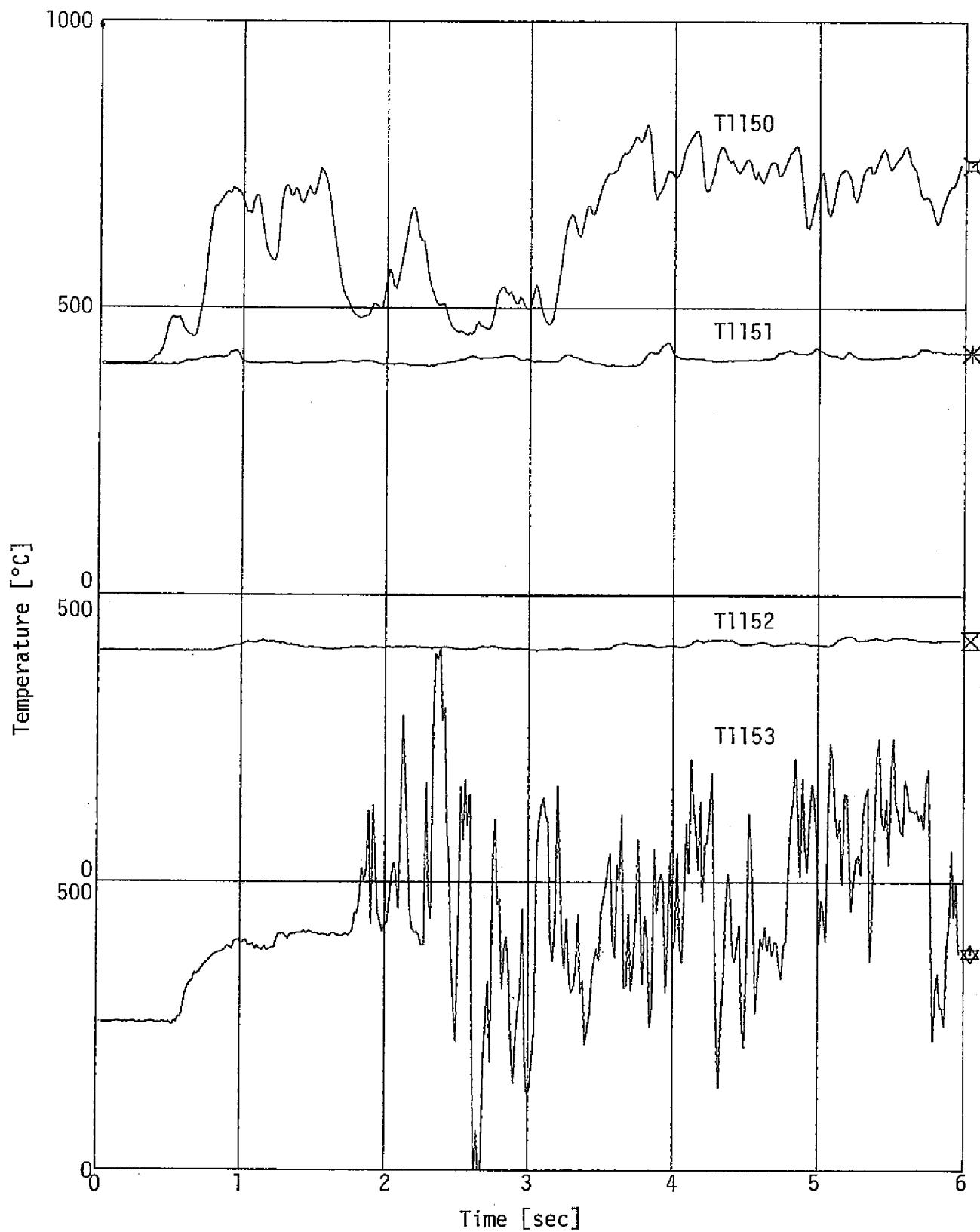


Fig. 3.4.13(a) Temperatures in Reaction Vessel

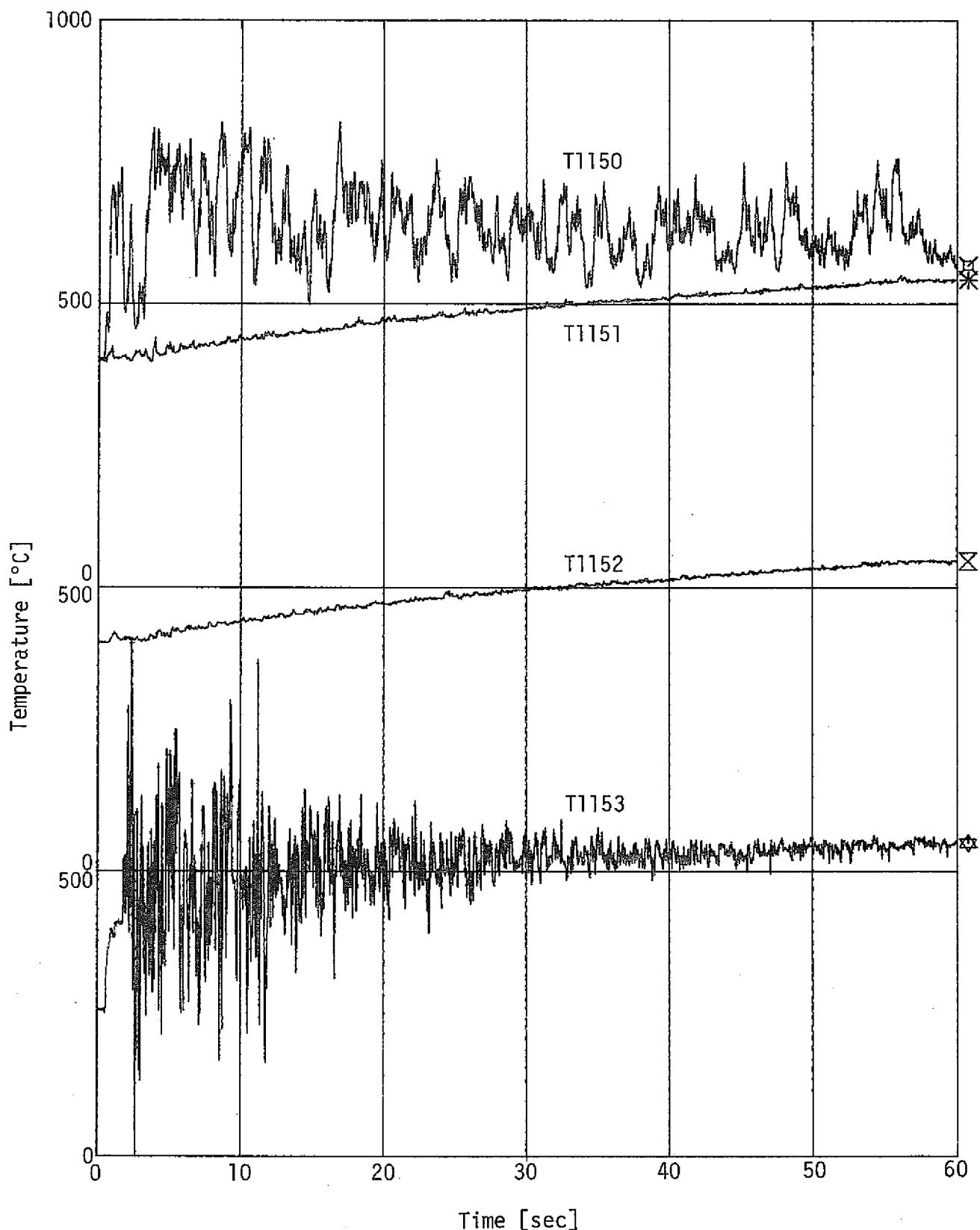


Fig. 3.4.13(b) Temperatures in Reaction Vessel

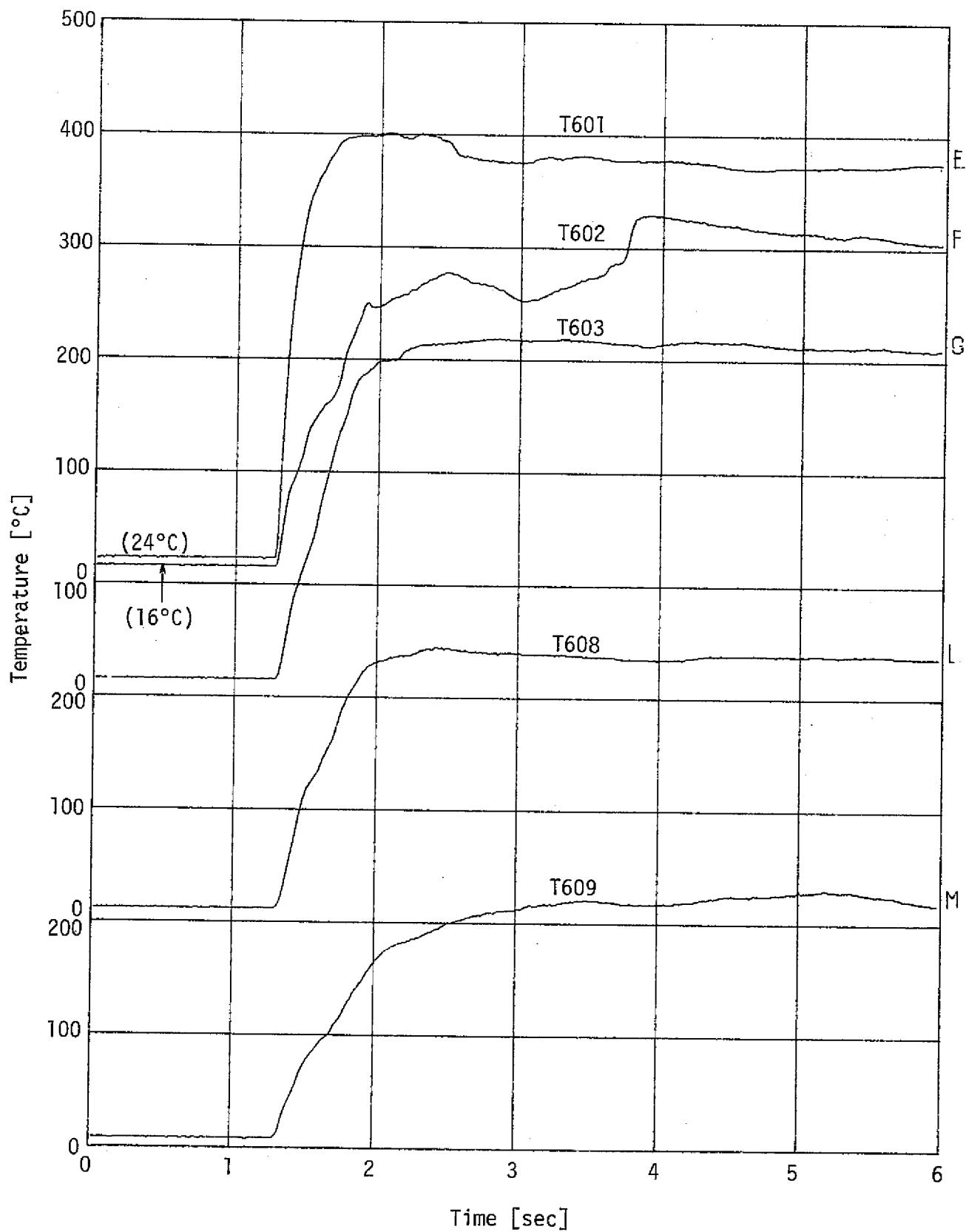


Fig. 3.4.14(a) Temperatures in Pressure Relief Line

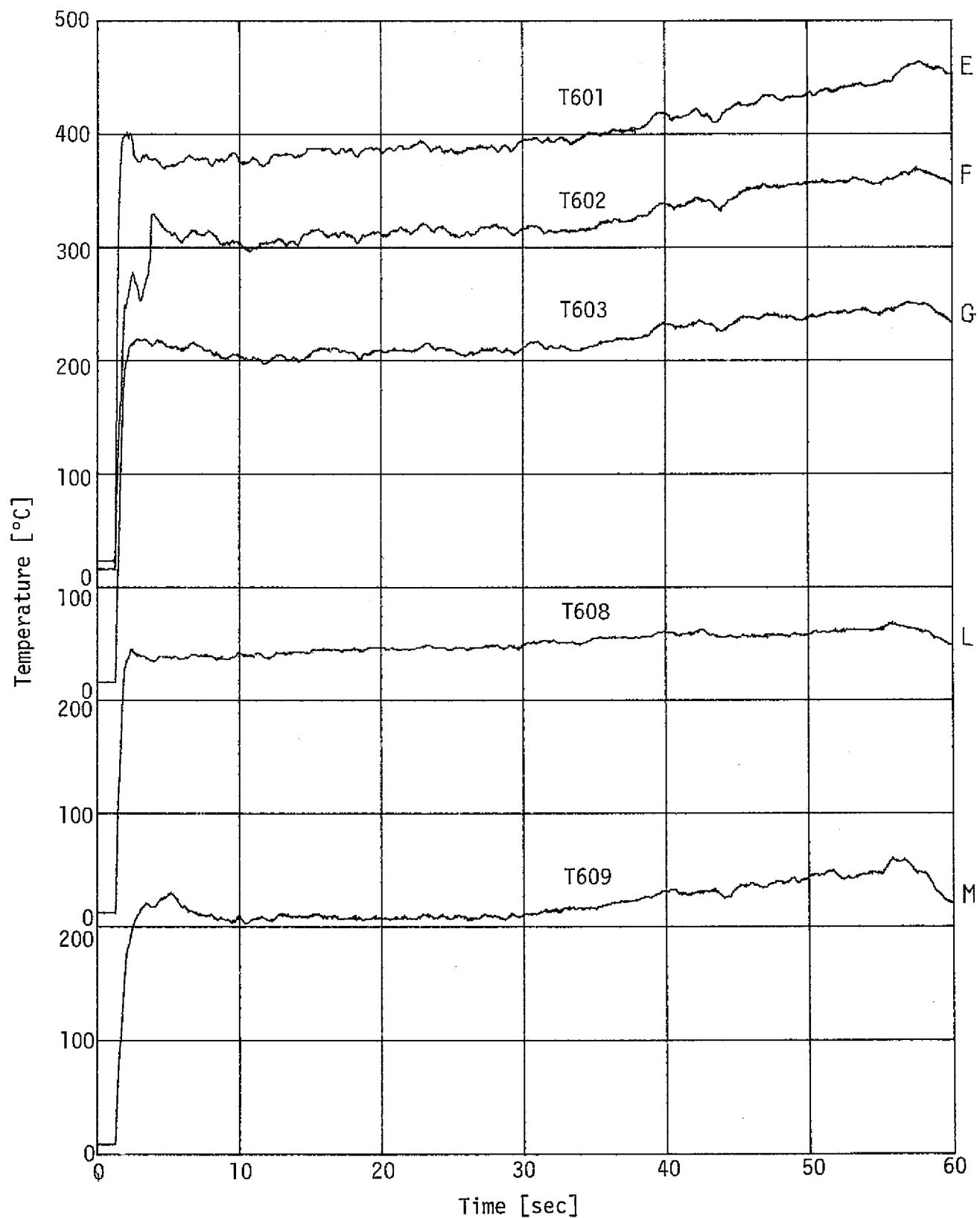


Fig. 3.4.14(b) Temperatures in Pressure Relief Line

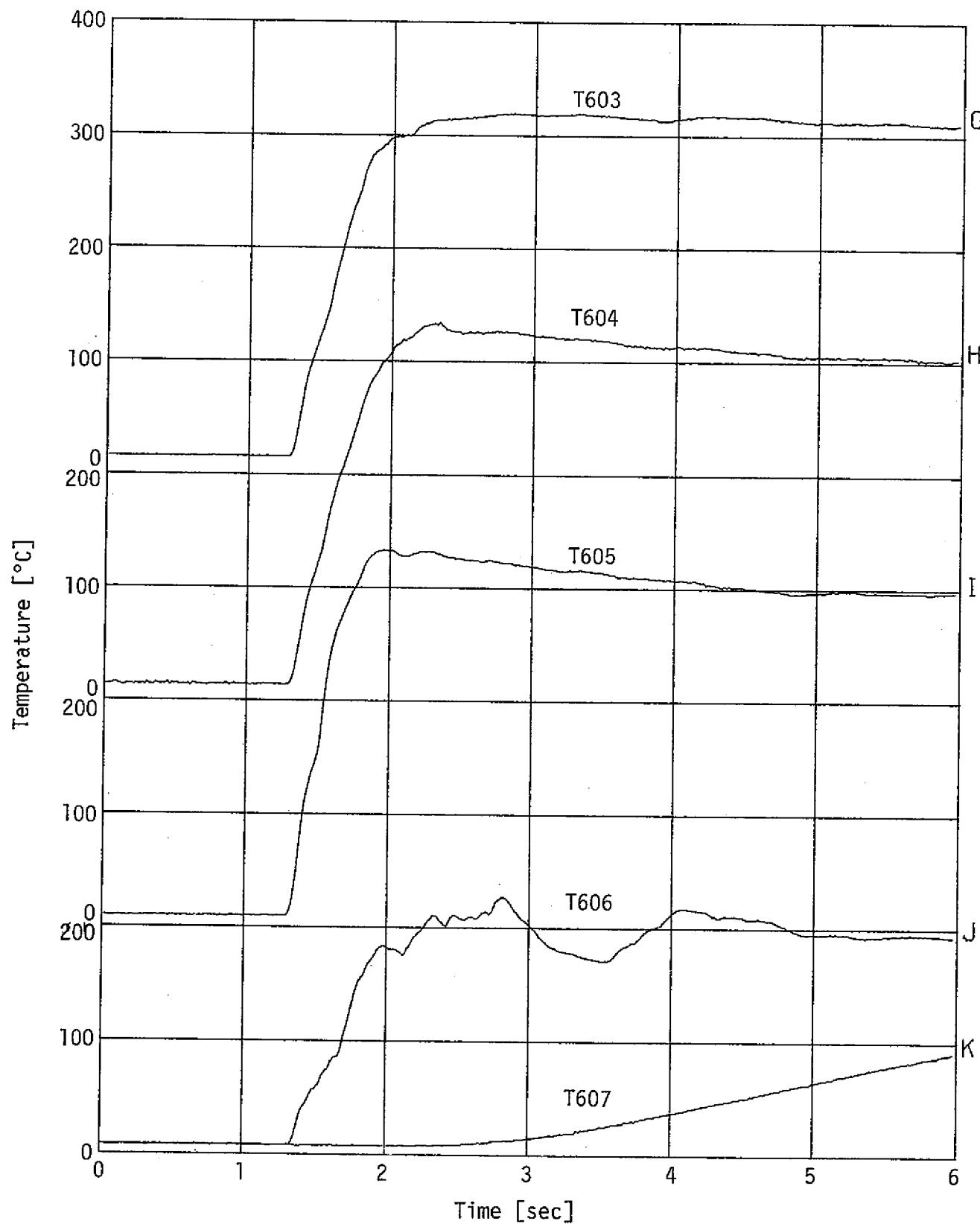


Fig. 3.4.14(c) Temperatures in Pressure Relief Line

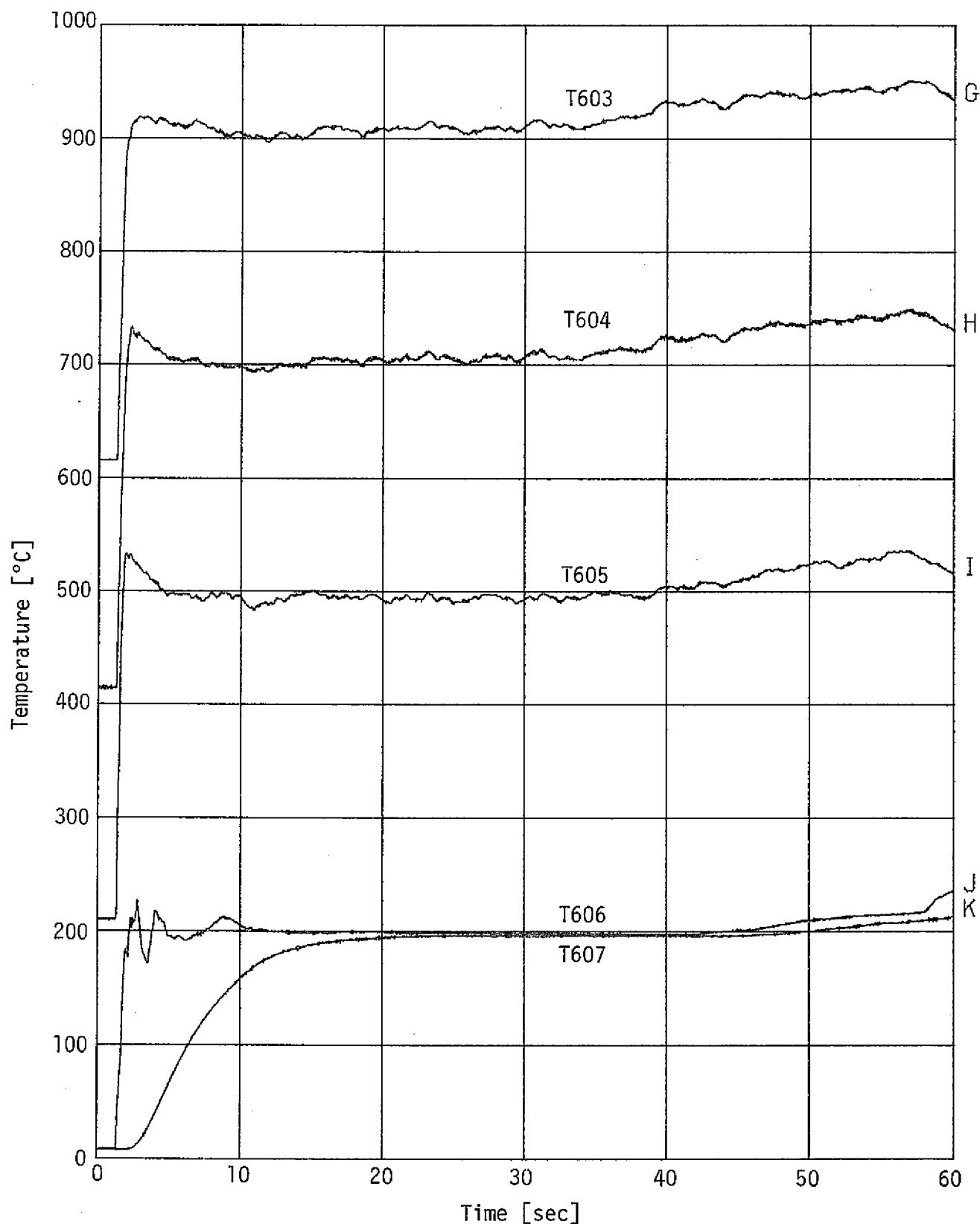


Fig. 3.4.14(d) Temperatures in Pressure Relief Line

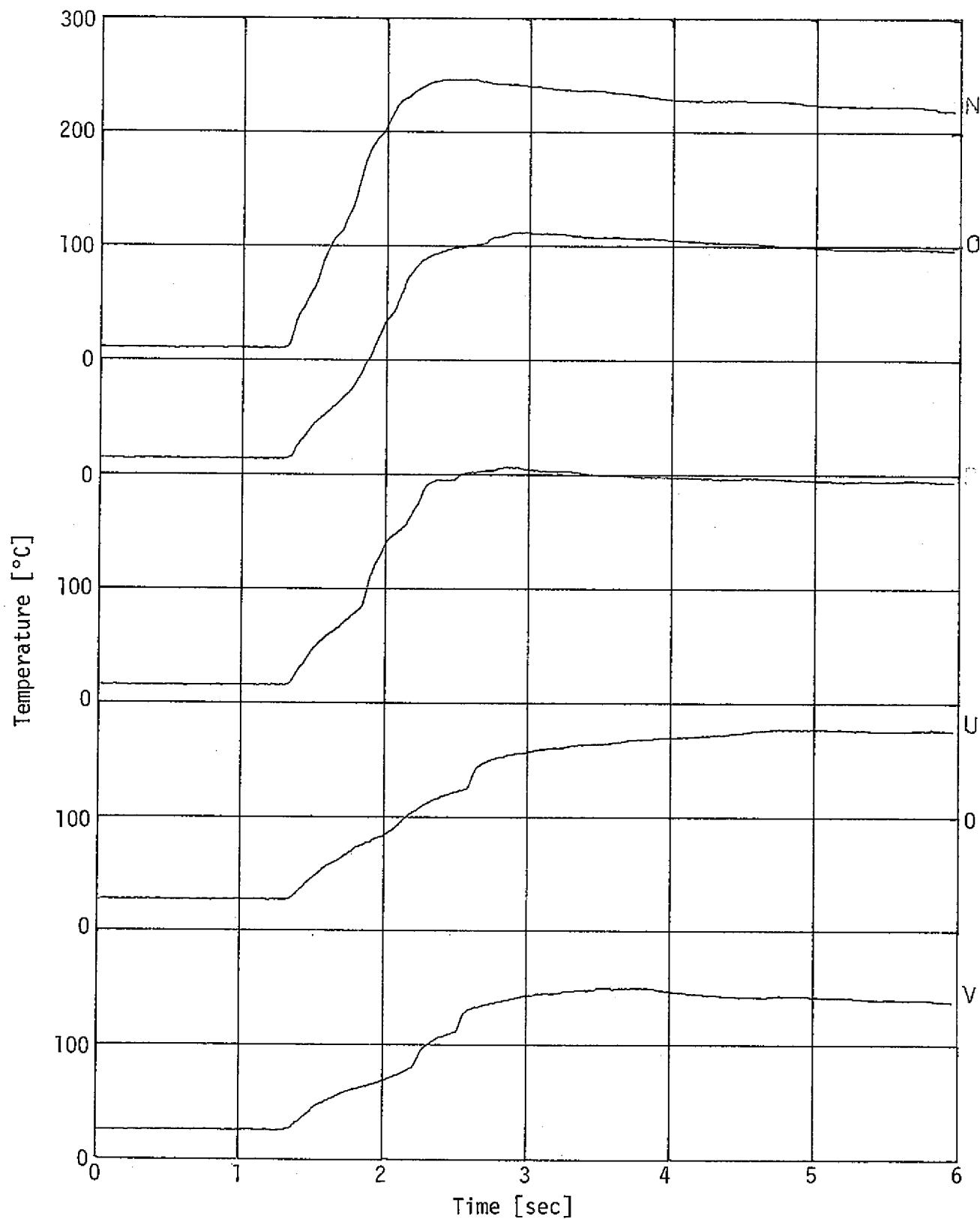


Fig. 3.4.14(e) Temperatures in Pressure Relief Line

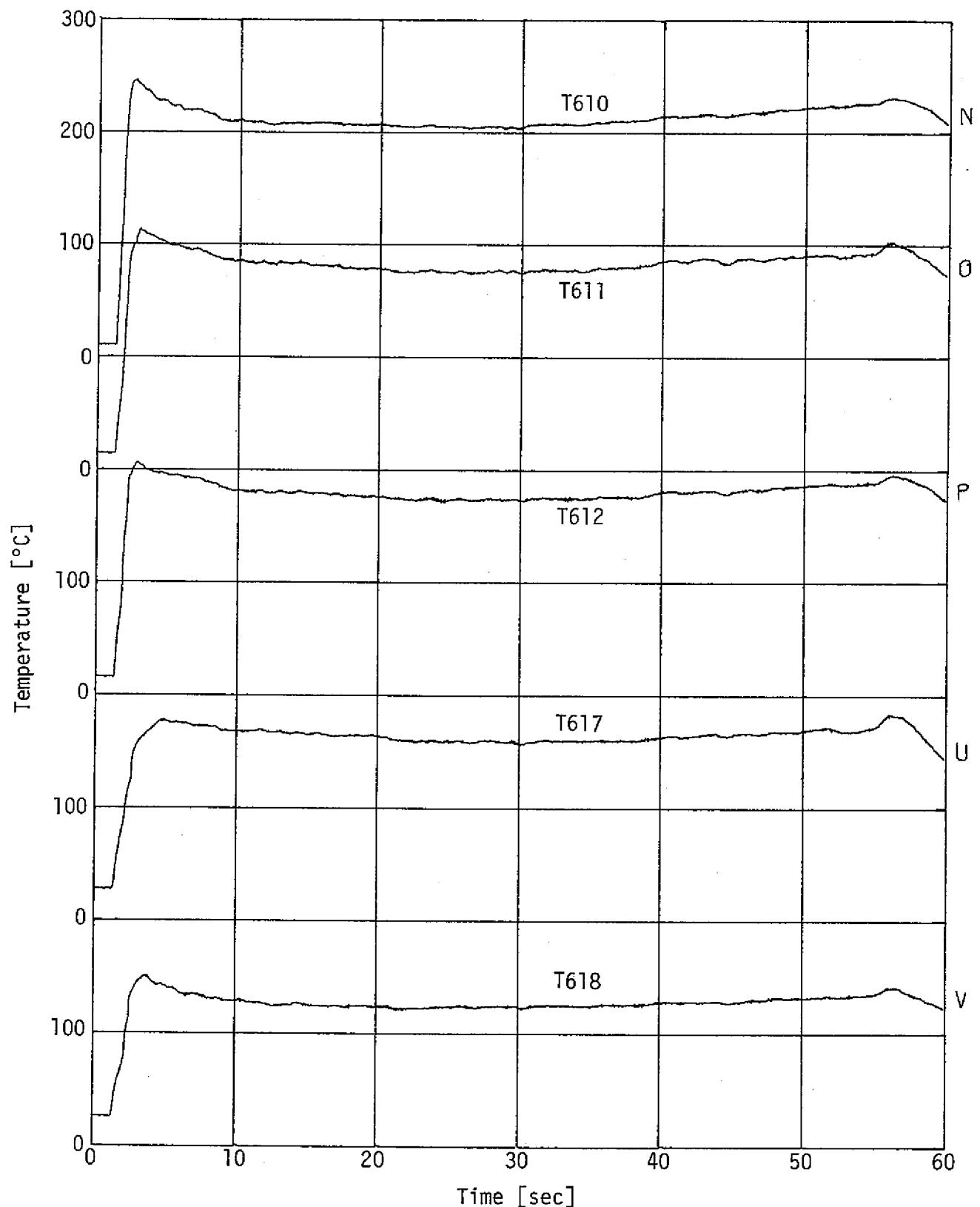


Fig. 3.4.14(f) Temperatures in Pressure Relief Line

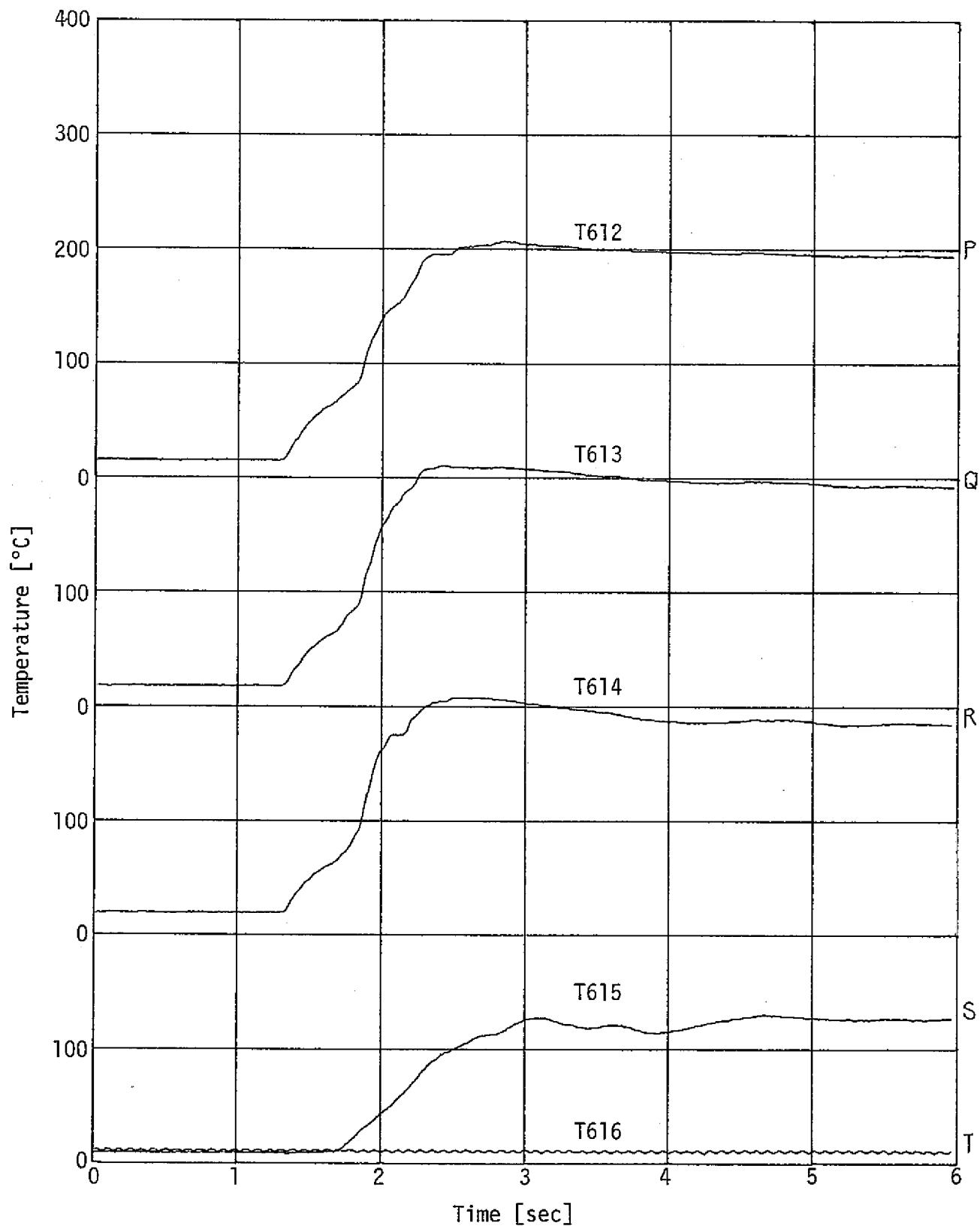


Fig. 3.4.14(g) Temperatures in Pressure Relief Line

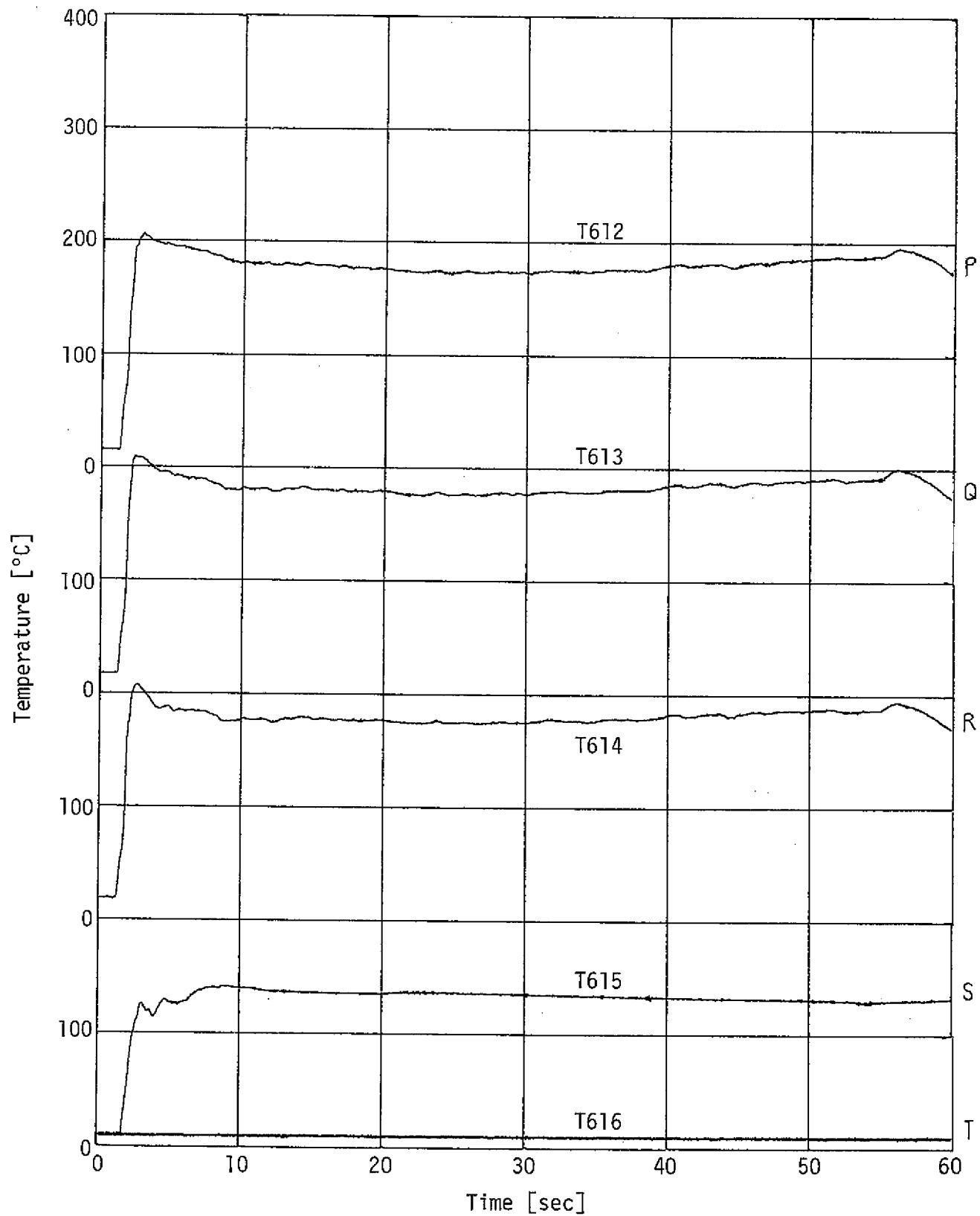


Fig. 3.4.14(h) Temperatures in Pressure Relief Line

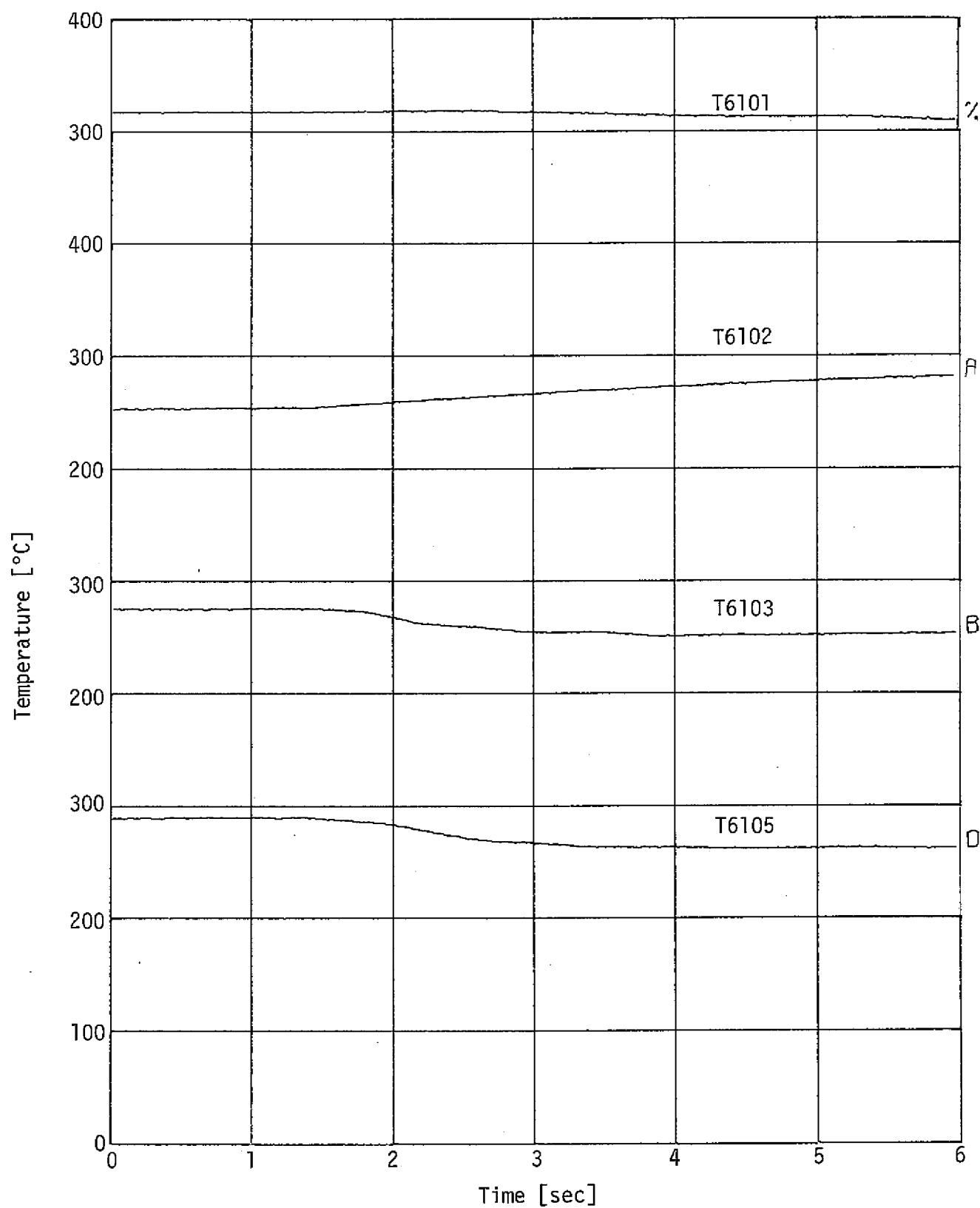


Fig. 3.4.15(a) Temperatures in Reaction Product Tank

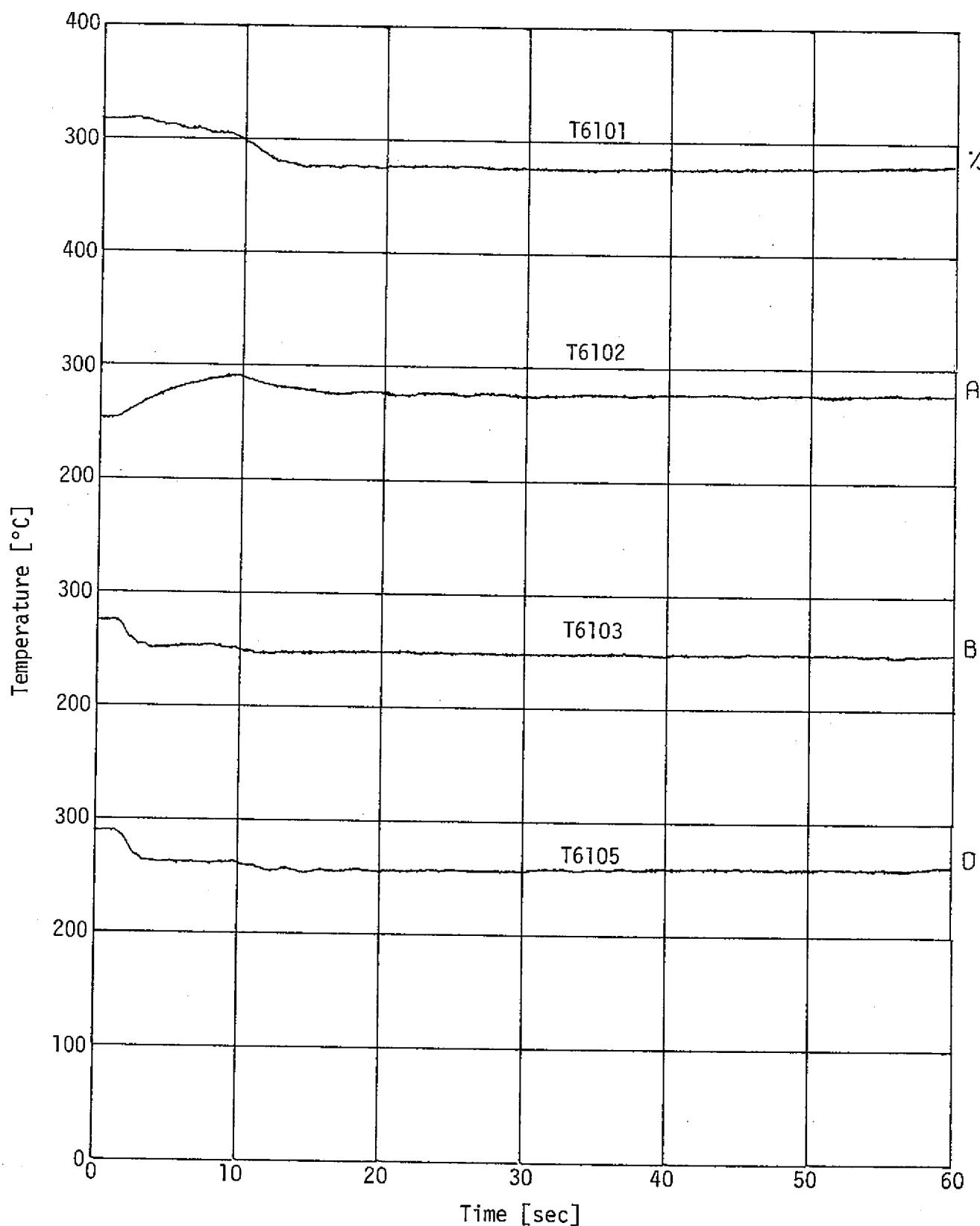


Fig. 3.4.15(b) Temperatures in Reaction Product Tank

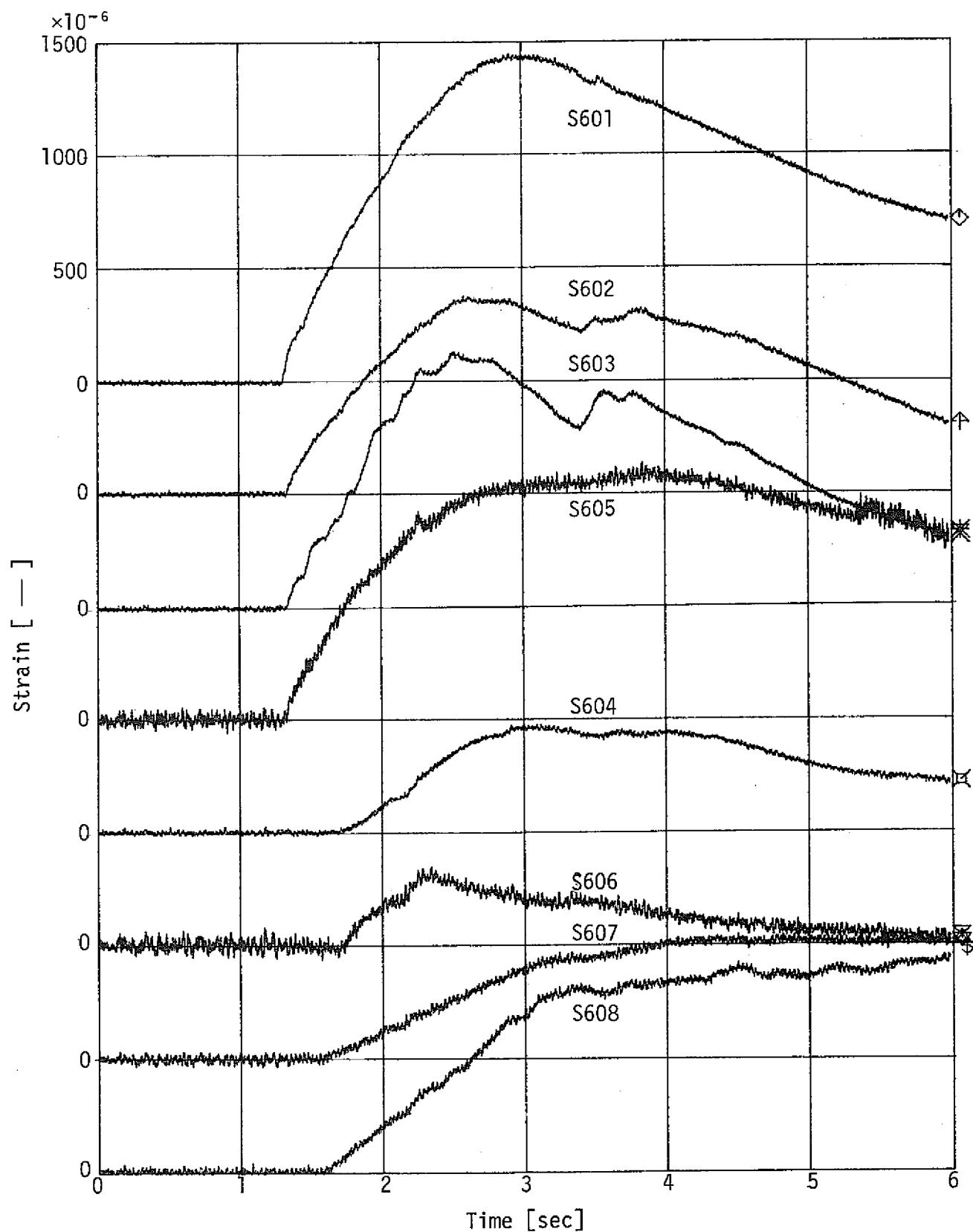


Fig. 3.4.16 Strains on Pressure Relief Piping

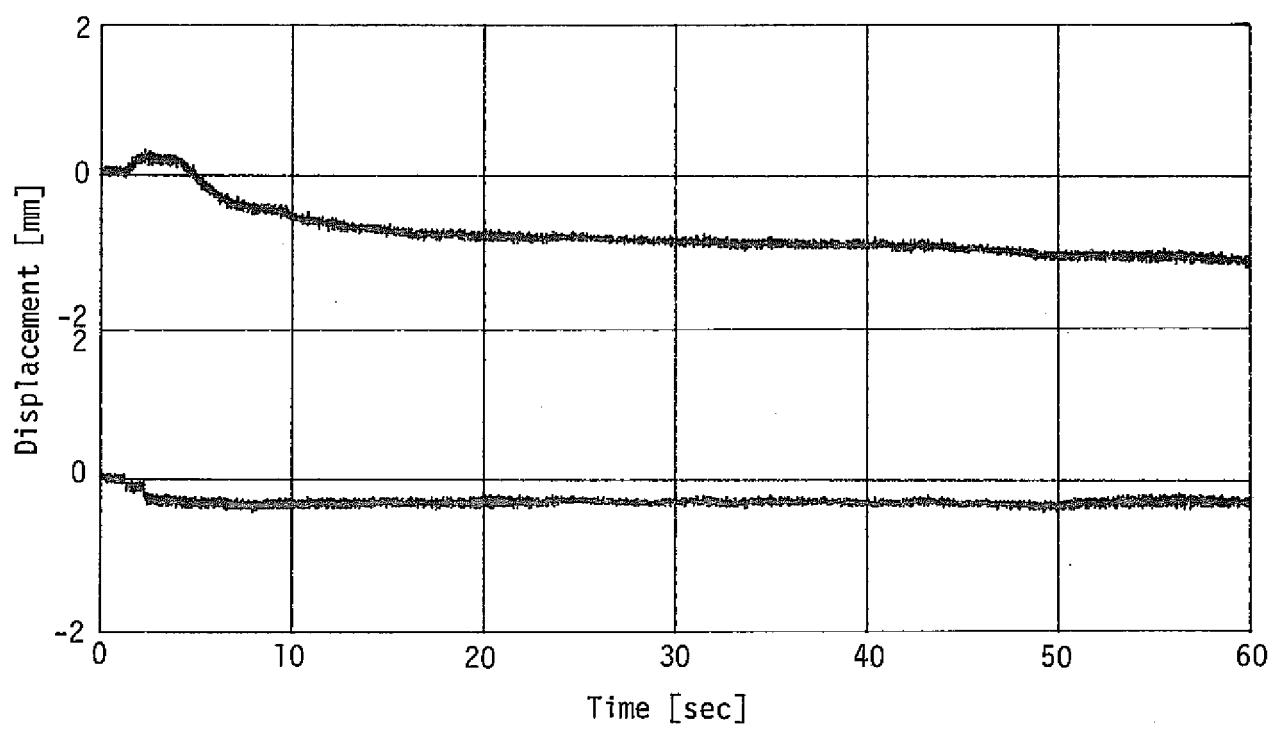
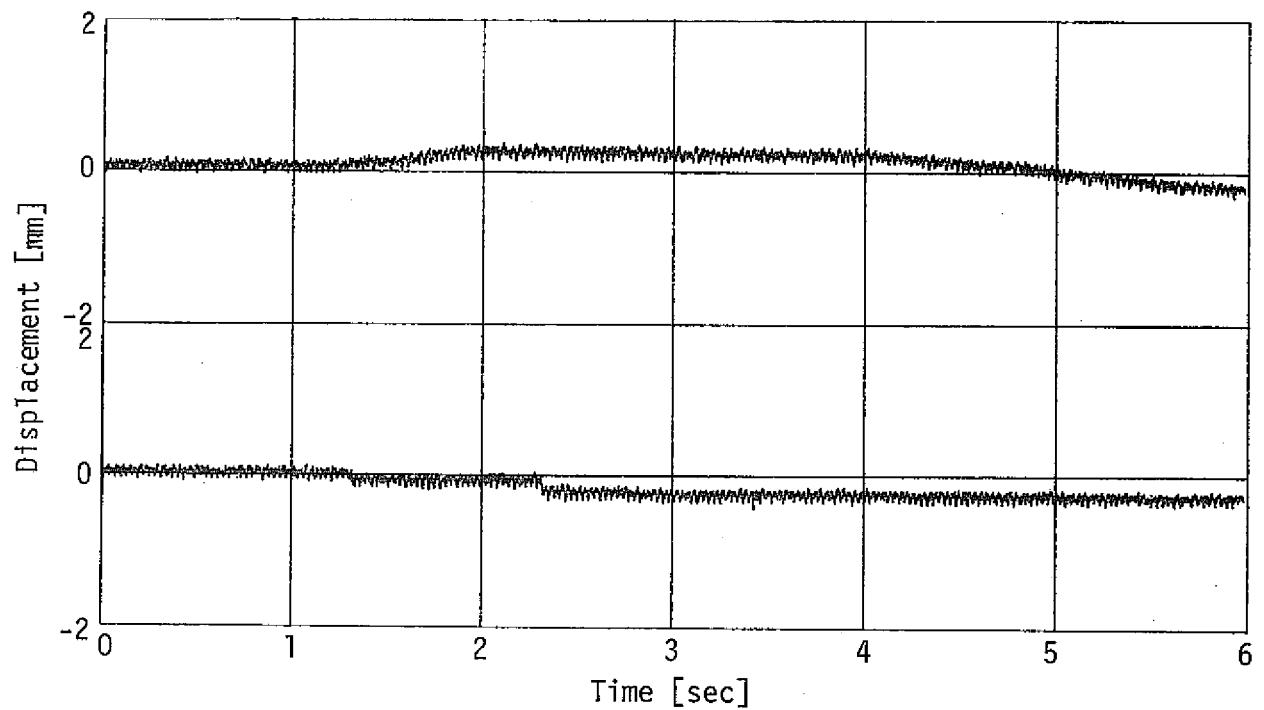


Fig. 3.4.17 Displacement of Pressure Relief Piping

Table 4.1.1 注水率による流動様相の違い

注 水 率	大(数DEG相当)	小(1DEG相当以下)
	Run-93(91)	Run-94(92)
領域 I	持続時間 RD破裂後 0.2~0.3秒	RD破裂後 1~2秒
	Na流速 18 m/sec	16 m/sec
	(H ₂ 流速) 20m/sec (圧力ピーク移動速度)	230m/sec (圧力波伝播速度)
	Slip ratio ほぼ 1	—
	流動様相 気泡流 or Na単相流	層状流・波状流
領域 II	持続時間 領域I後注水停止まで	領域I後注水停止まで
	Na流速 12~7 m/sec	ほぼ 0 m/sec
	(H ₂ 流速) 35~20 m/sec	6~9 m/sec
	Slip ratio 3	—
	流動様相 環状流	H ₂ ガス単相流

Table 4.2.1 INLAPから求められた熱伝達率の値

Run No	初期の熱伝達率 ($\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$)	時刻(sec)	後期の熱伝達率 ($\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$)
91	3×10^4	2	5×10^3
92	—	40	17
93	3×10^4	4	7×10^3
94	—	40	30

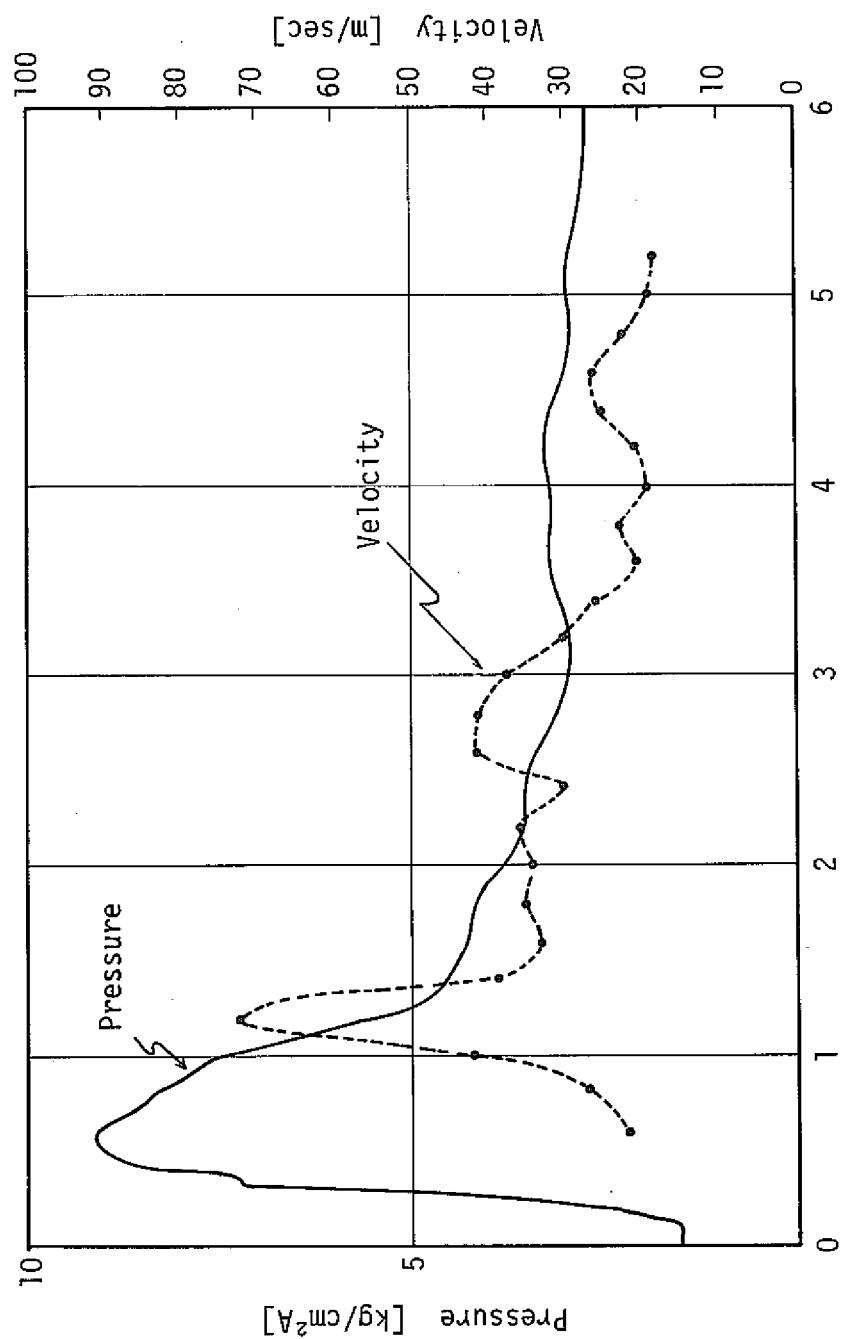


Fig. 4.1.1 Velocity in Pressure Relief Line estimated by Pressure Gages on Run 93

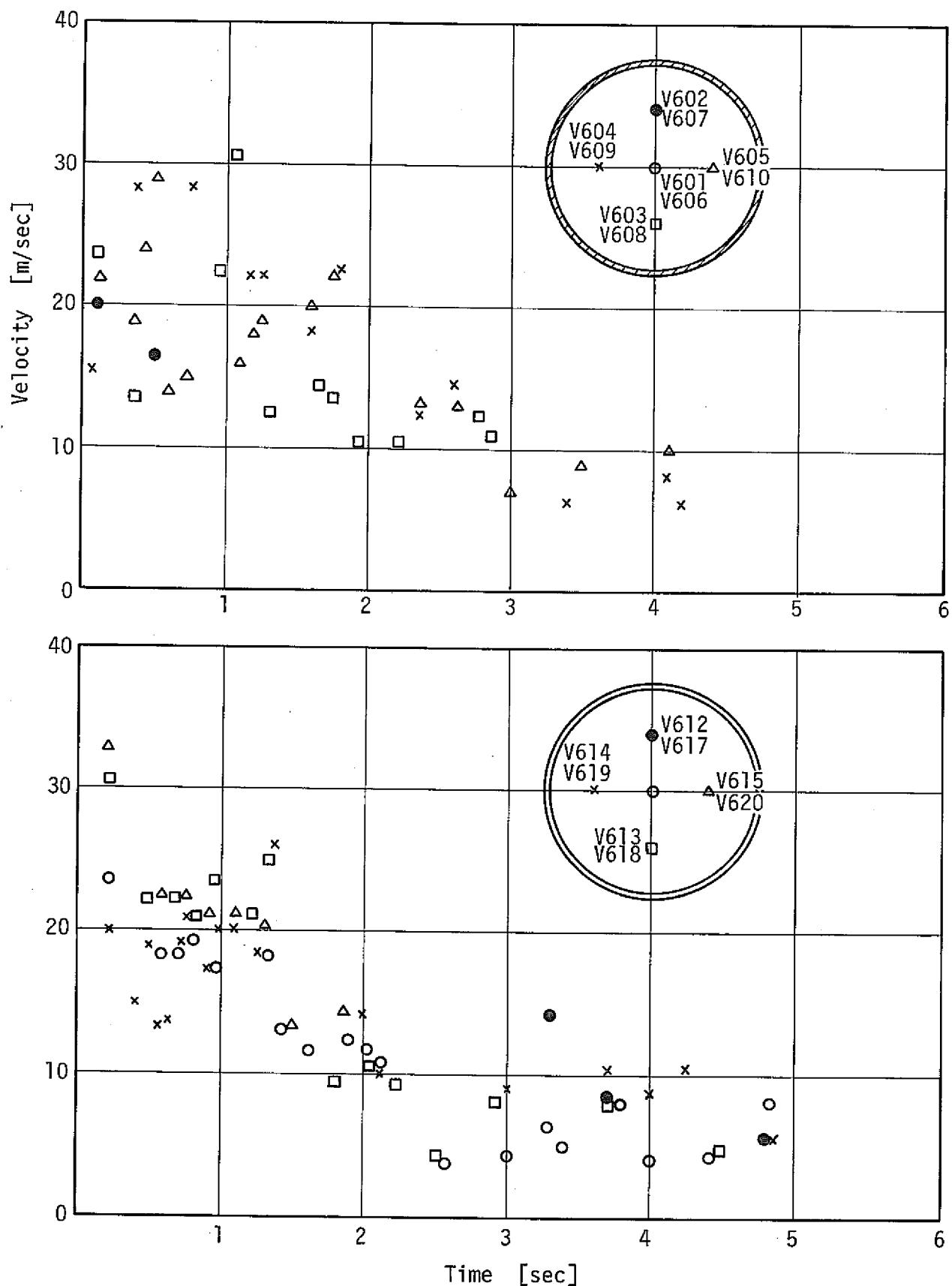


Fig. 4.1.2 Velocity in the Pressure Relief Piping derived from Void Sensor on Run 93

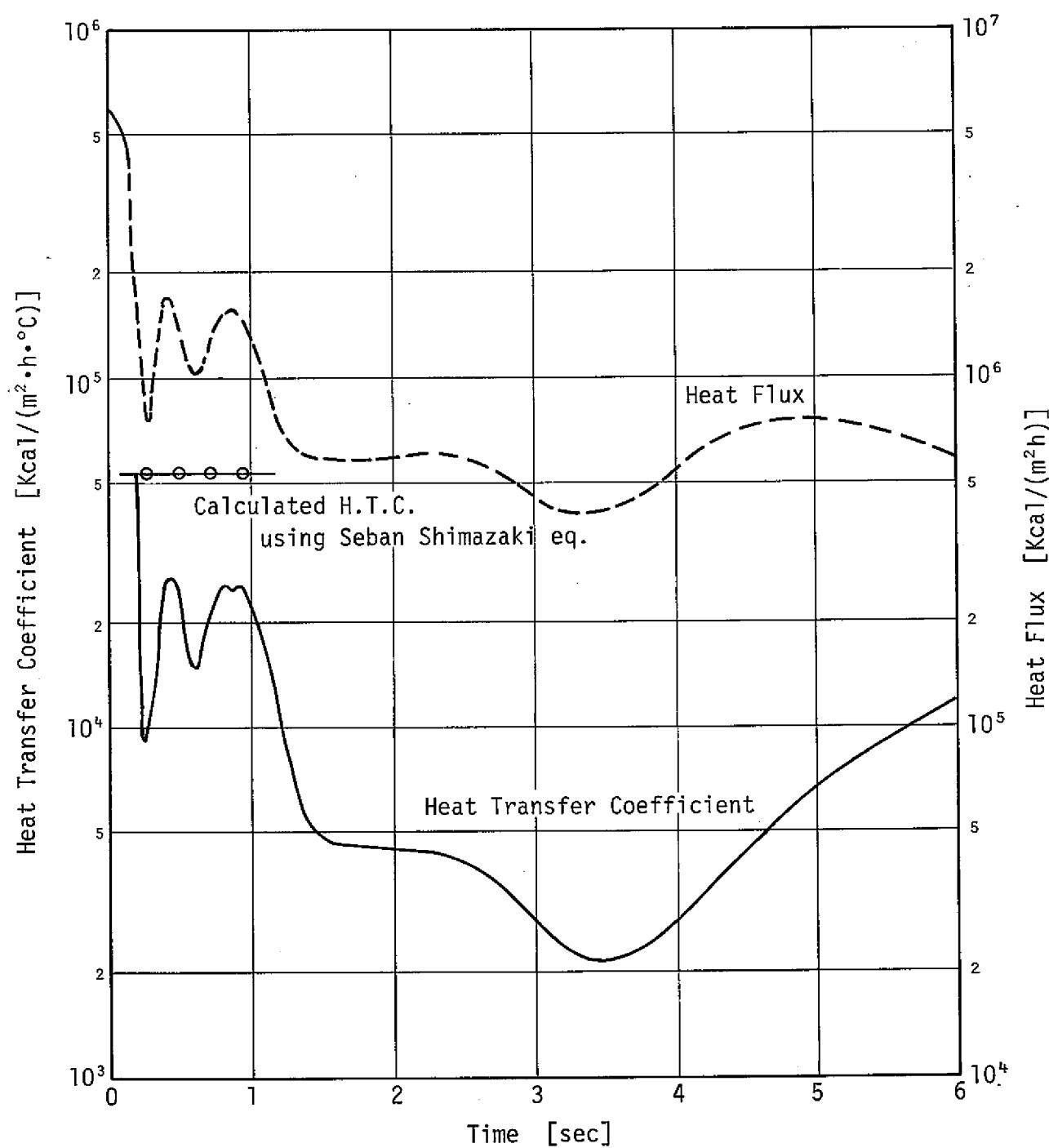


Fig. 4.2.1 Heat Transfer Coefficient and
Heat flux Calculated by INLAP from
T603, T606, and T607 on Run 91

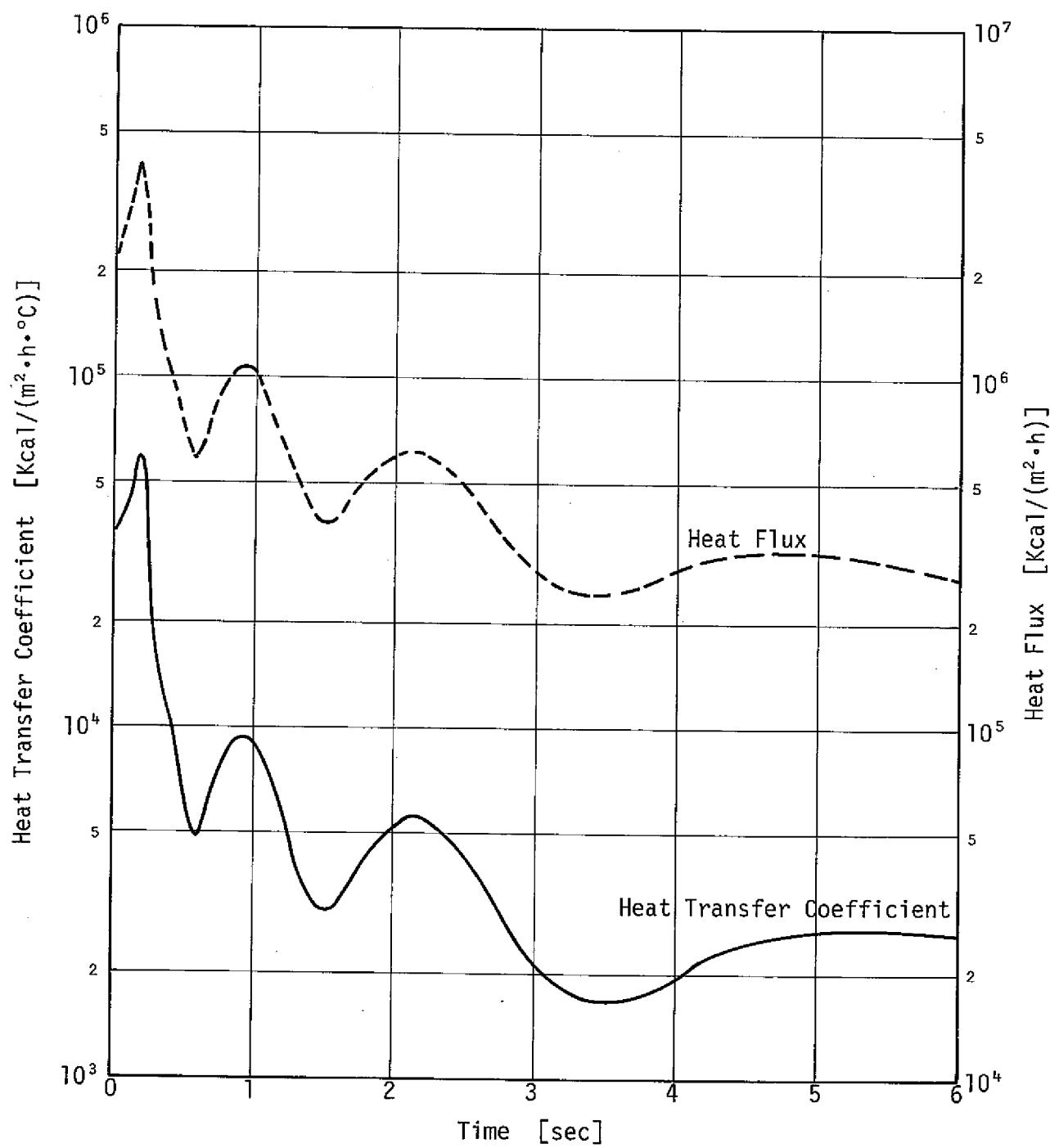


Fig. 4.2.2 Heat Transfer Coefficient and
Heat Flux calculated by INLAP
from T612, T615 and T616 on Run 91

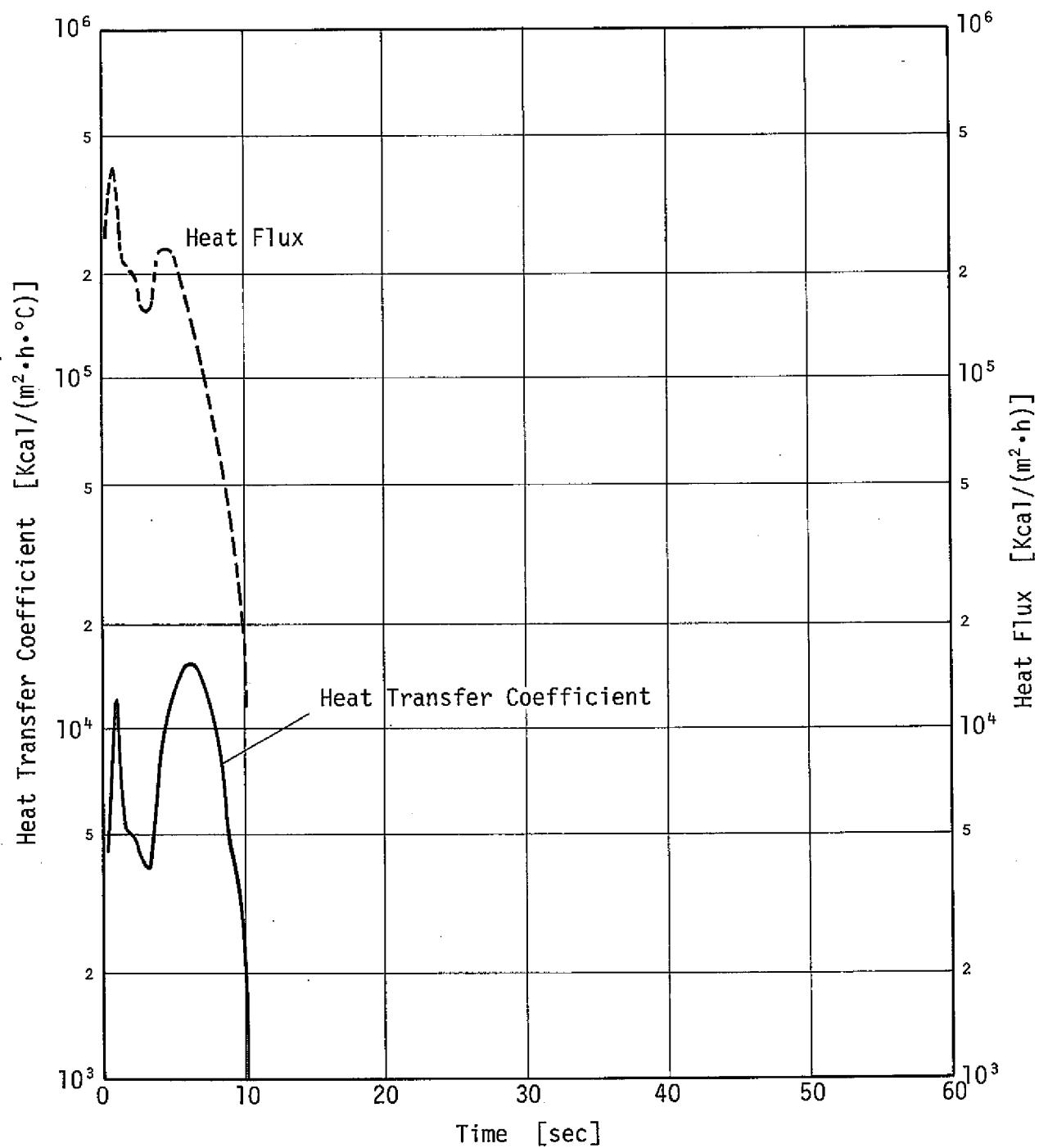


Fig. 4.2.3 Heat Transfer Coefficient and
Heat Flux Calculated by INLAP
from T612, T615 and T616 on Run 92

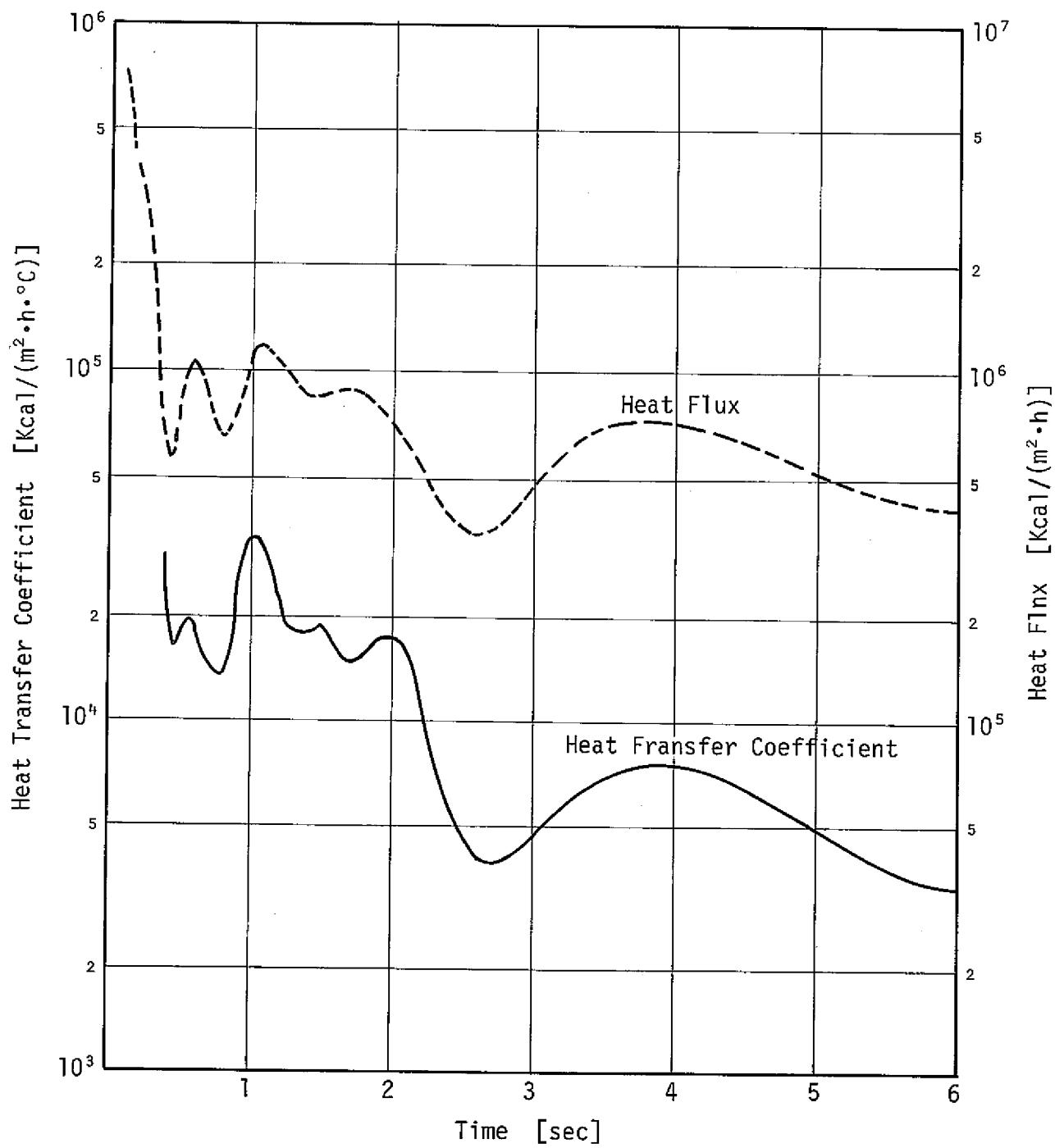


Fig. 4.2.4 Heat Transfer Coefficient and
Heat flux Calculated by INLAP from
T603, T606 and T607 on Run 93

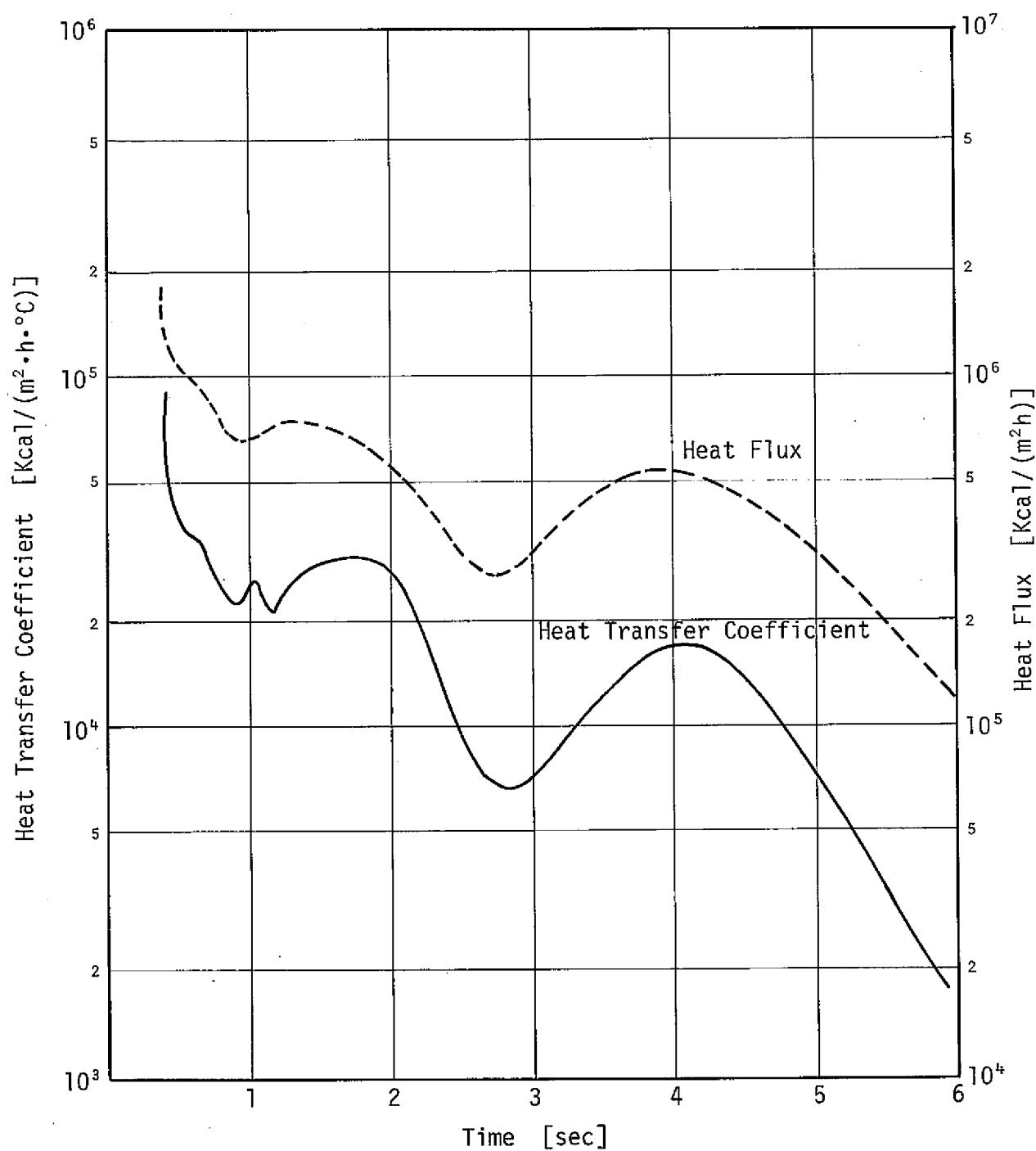


Fig. 4.2.5 Heat Transfer Coefficient and
Heat Flux calculated by INLAP
from T612 T615 and T616 on Run 93

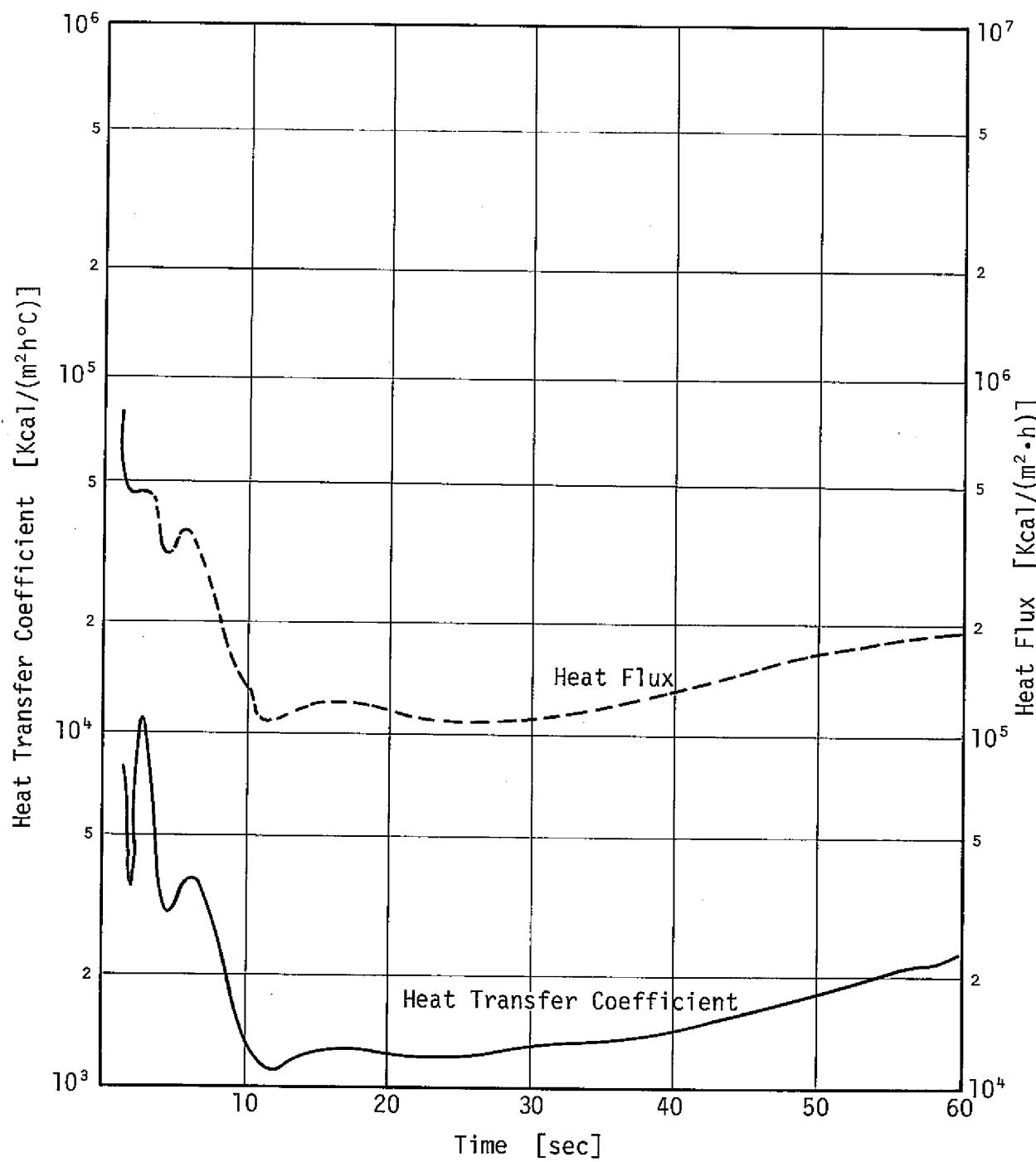


Fig. 4.2.6 Heat Transfer Coefficient and
Heat Flux calculated by INLAP
from T603, T606, and T607 on Run 94

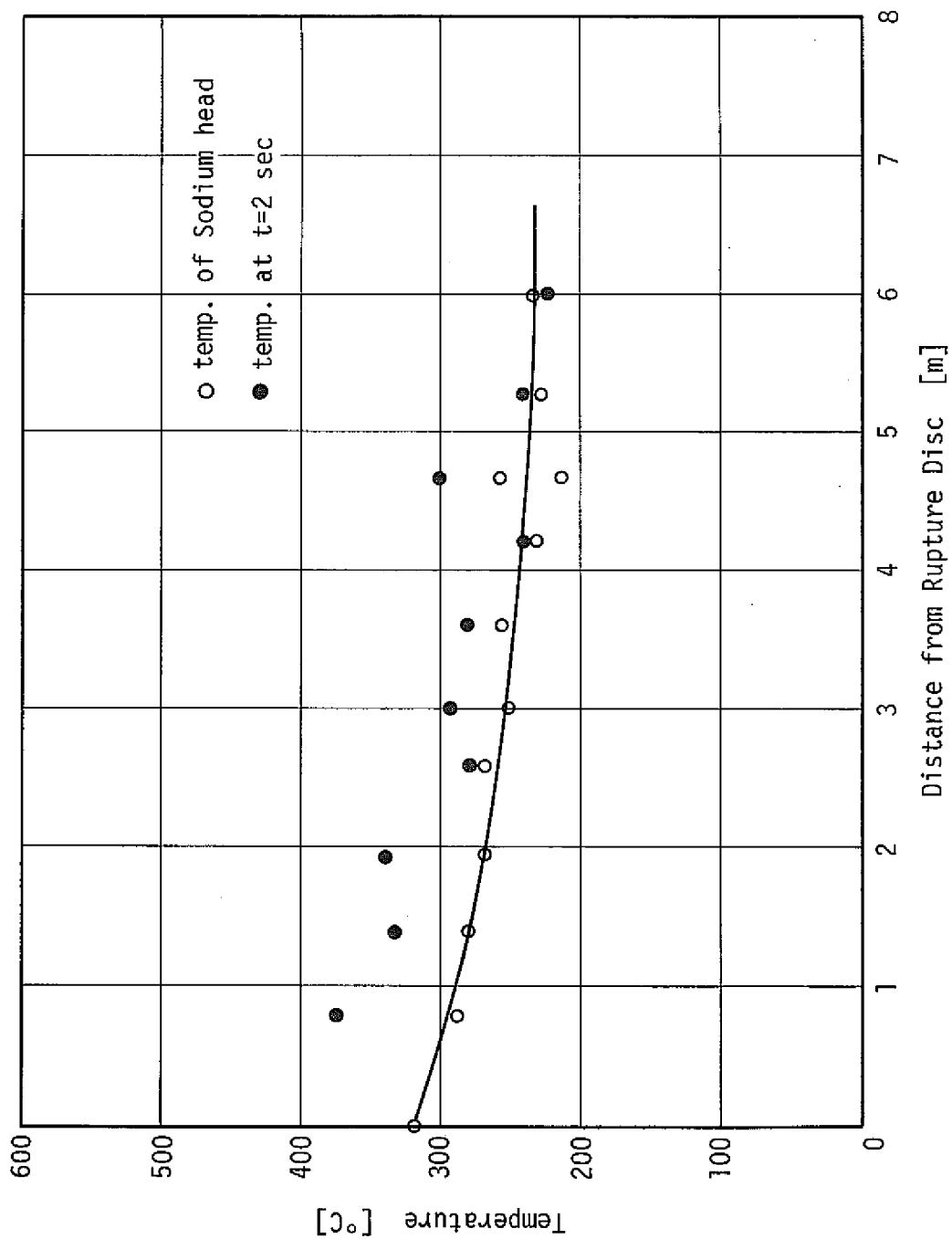


Fig. 4.2.7 Temperature Decrease along the Relief Line on Run-91

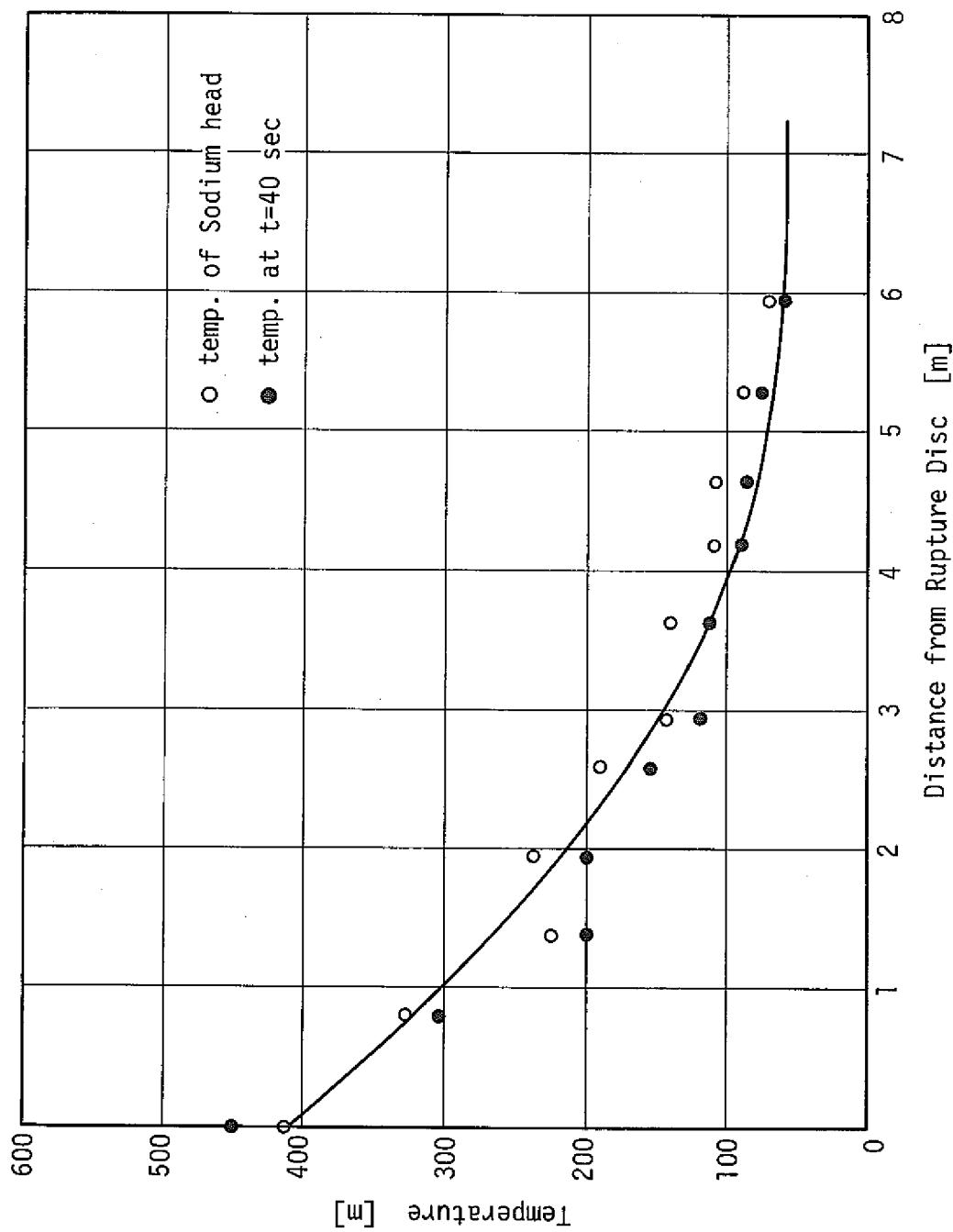


Fig. 4.2.8 Temperature Decrease along the Relief Line on Run 92

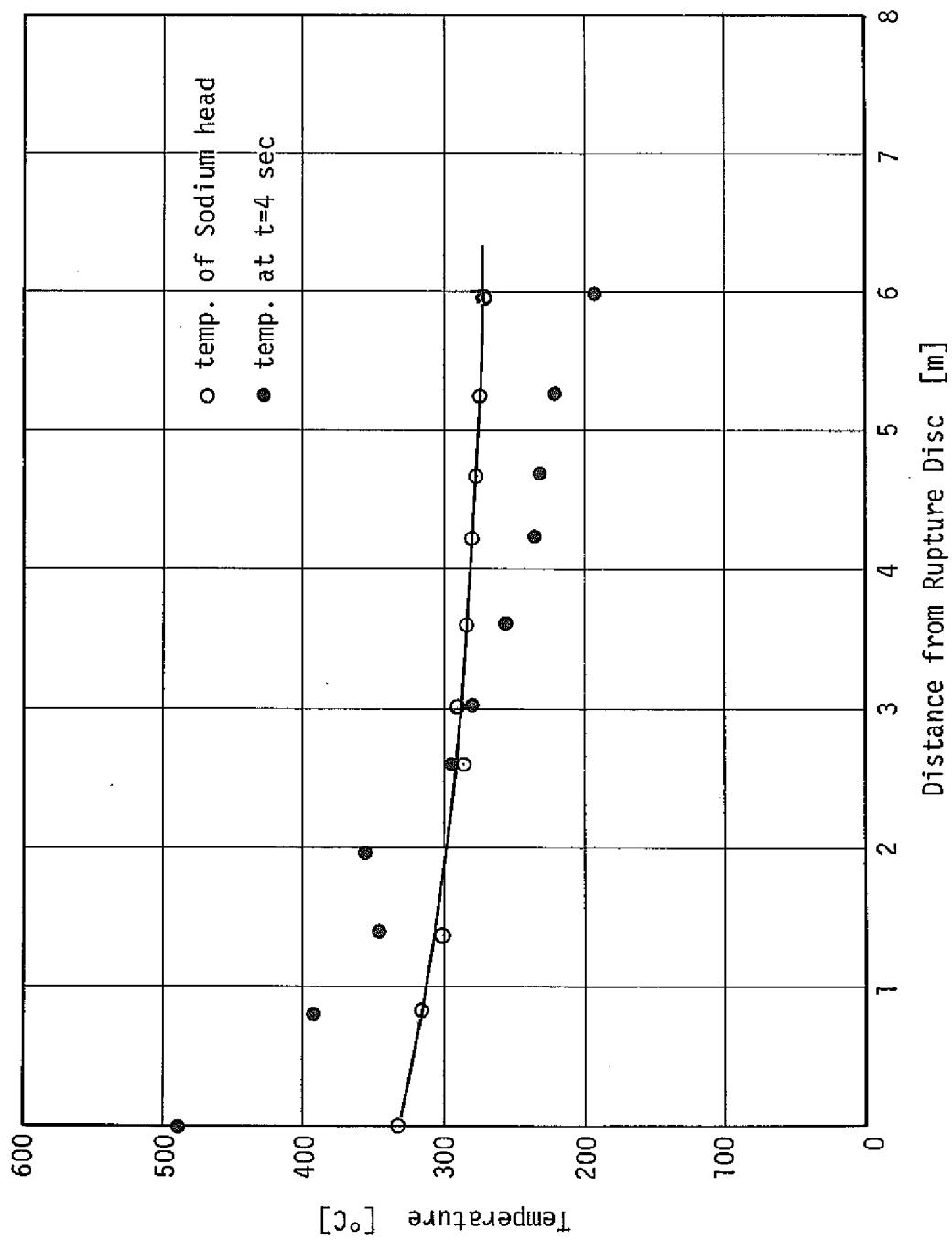


Fig. 4.2.9 Temperature Decrease along the Relief Line on Run 93

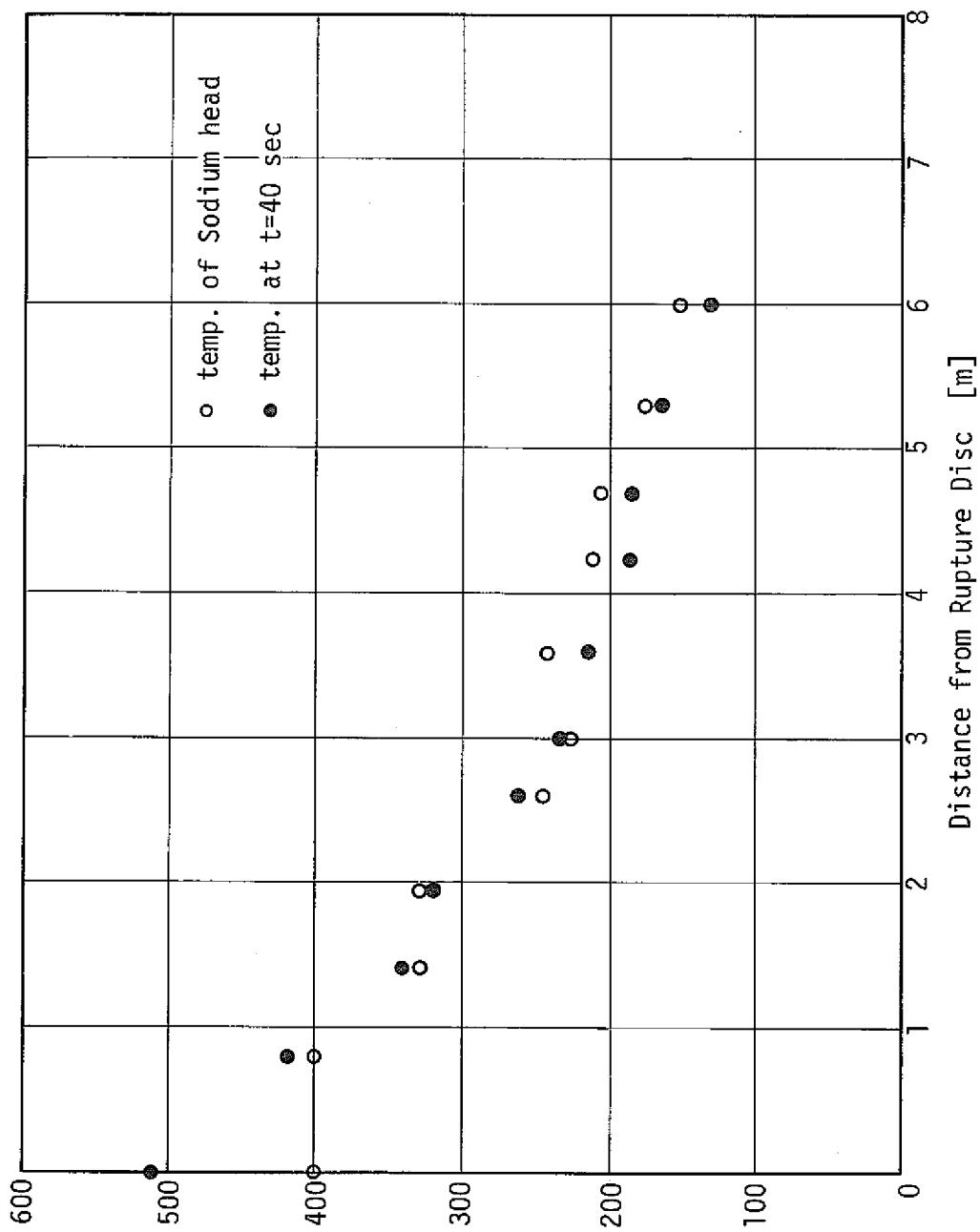


Fig. 4.2.10 Temperature Decrease along the Relief Line on Run 94

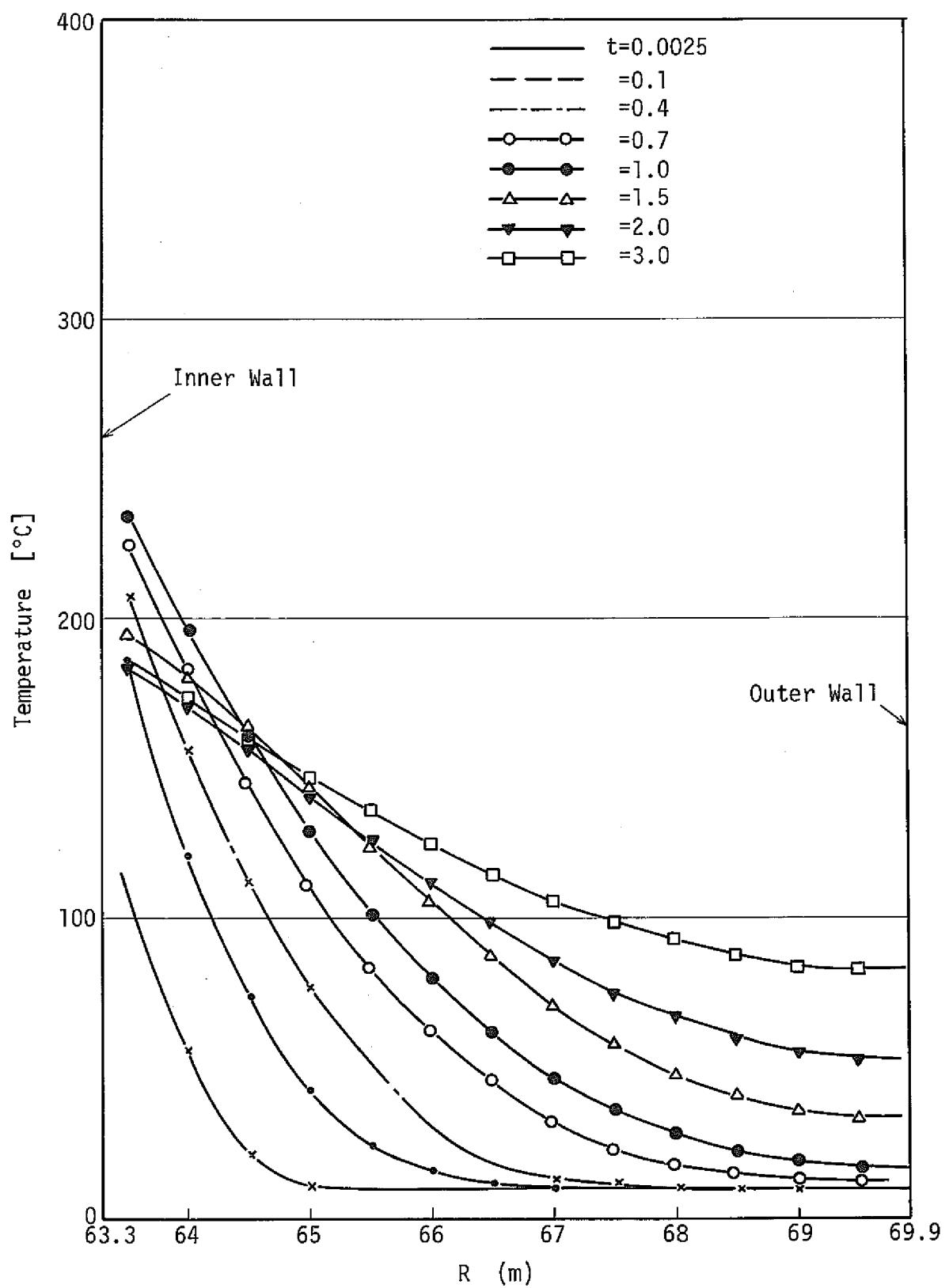


Fig. 4.3.1 Calculated Temperature Distribution in the Pipe Wall on Run-91

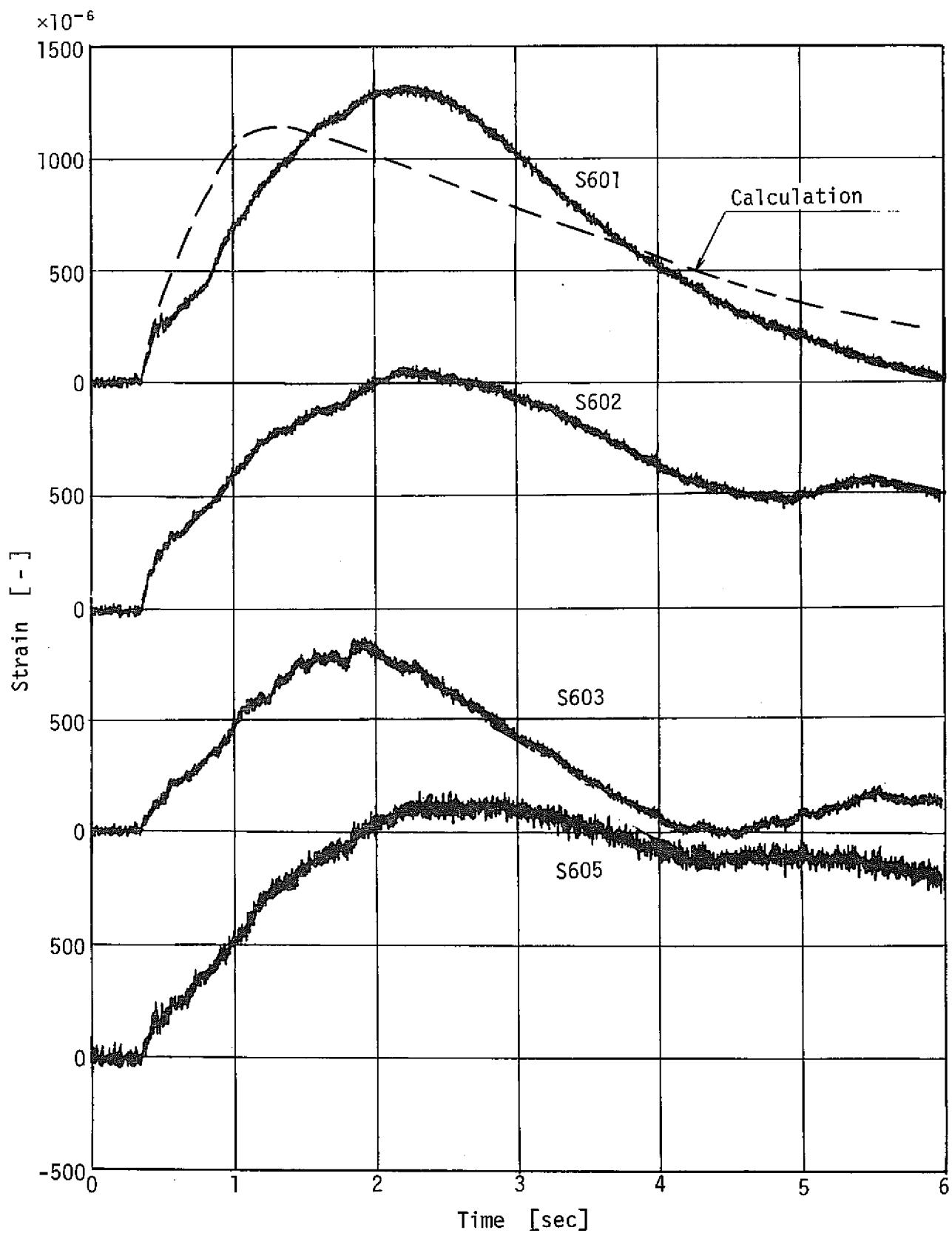


Fig. 4.3.2 Comparison between Test Results and Calculation
on Stain of Pressure Relief Piping on Run-91

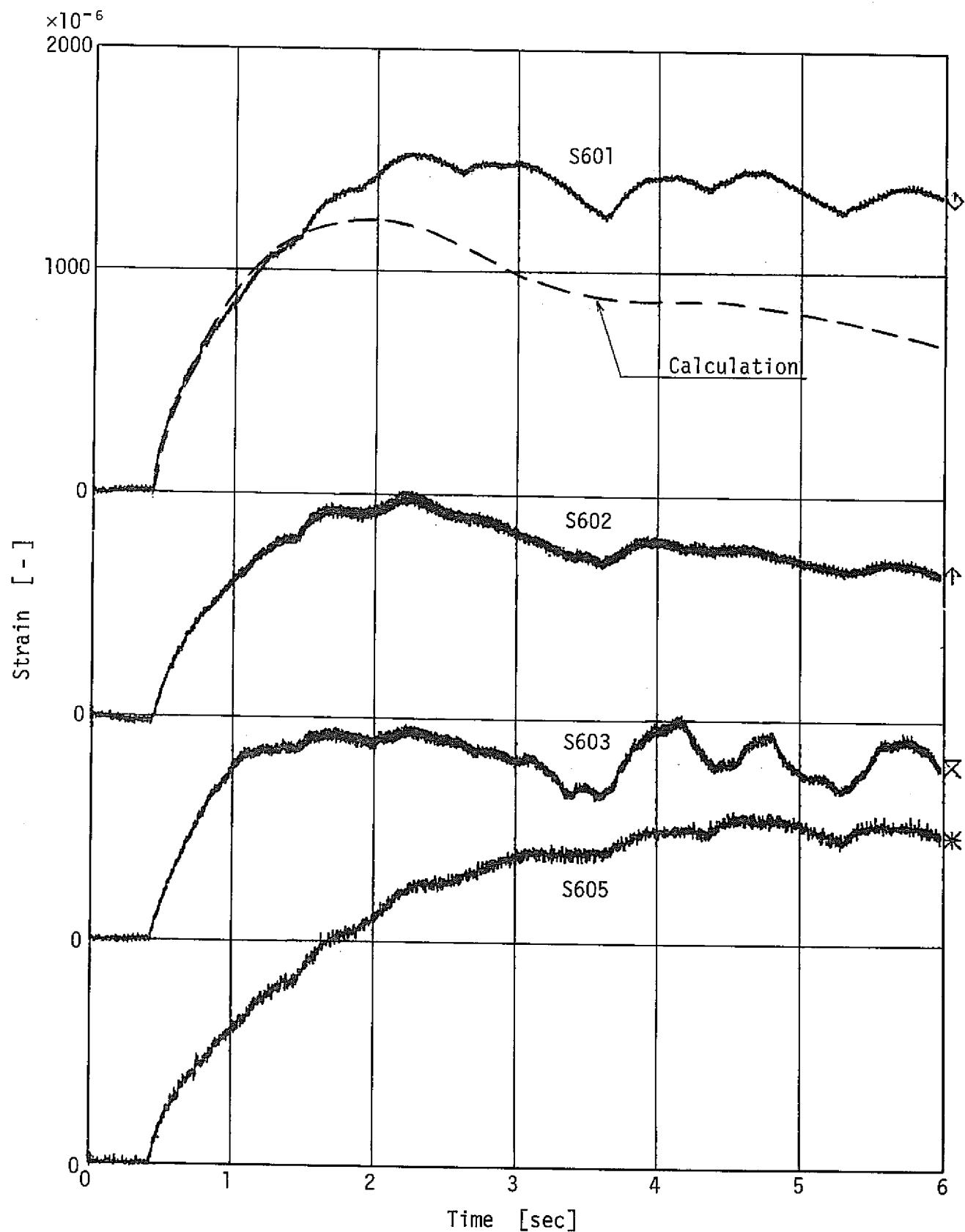


Fig. 4.3.3 Comparison between Test Results and Calculation
on Strain of Pressure Relief Piping on Run-93

Appendix

Appendix 1. 歪ゲージ温度補償較正試験

Appendix 2. 反応容器内の圧力から放出系配管内流速を求める手法

Appendix 3. 非定常時の熱伝達率計算コード INLAP の概要

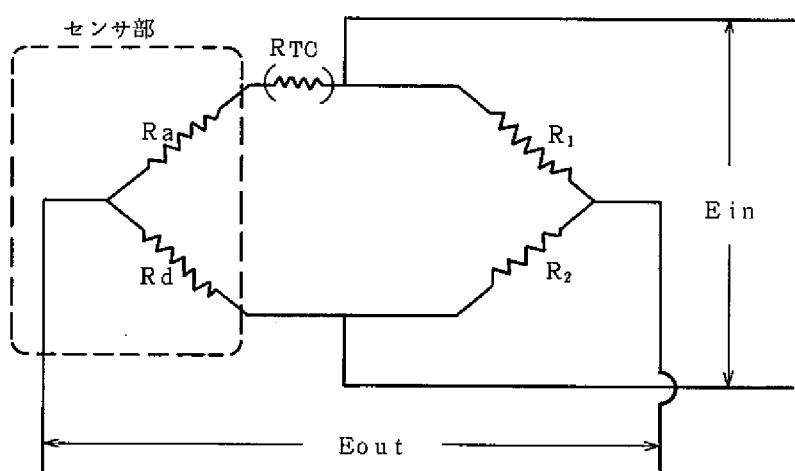
Appendix 4. 非定常熱伝導・熱衝撃力計算手法

Appendix 1. 歪ゲージ温度補償較正試験

1. 目的

SWAT-1 放出系非予熱条件下での熱過渡試験で放出系配管外壁面に発生する熱応力を求めたため管外壁に歪ゲージを貼付したが、管壁面での温度変化が急激なため温度補償の厳しい精度が要求される。従って、メーカー(Ailtech社)既製のセンサの他に温度補償用の抵抗 R_{TC} を追加する必要がある。 R_{TC} の値はメーカーからの添付資料に記されているが、必ずしも適切な値とは言えない(3)ので、実際に熱サイクルを掛けて較正する必要がある。本較正試験はその要領を示したものである。なお、本方法の詳細は則松らの報告書にまとめられており、参照されたい。

2. 原理



2. 試験結果

較正試験の結果を表1にまとめた。

表 A.1.1 較正試験の結果

No.	Sensor No.	$R_{TC}=0$ での 温度特性 $\mu\epsilon/\text{°C}$	$R_{TC}=\text{メーカー推奨値での温度特性}$	$R_{TC}=R_{TC} \times 0.8$ での温度特性	最終決定値	Tag No.
1	4905-3	9.23	13.06Ω - 8.8 $\mu\epsilon/\text{°C}$	10.45Ω - 0.7 $\mu\epsilon/\text{°C}$	10.32Ω 0.78 $\mu\epsilon/\text{°C}$	S 601
2	4905-7	9.42	13.34Ω - 11.3 $\mu\epsilon/\text{°C}$	10.68Ω - 2.5 $\mu\epsilon/\text{°C}$	9.07Ω 23.5 $\mu\epsilon/\text{°C}$	
3	4905-11	9.71	13.88Ω - 9.9 $\mu\epsilon/\text{°C}$	11.10Ω 1.1 $\mu\epsilon/\text{°C}$	10.75Ω 0.22 $\mu\epsilon/\text{°C}$	S 602
4	4905-13	8.60	13.02Ω - 8.5 $\mu\epsilon/\text{°C}$	10.42Ω - 2.4 $\mu\epsilon/\text{°C}$	9.44Ω 1.18 $\mu\epsilon/\text{°C}$	S 603
5	4905-14	10.49	13.49Ω - 4.5 $\mu\epsilon/\text{°C}$	10.79Ω + 2.7 $\mu\epsilon/\text{°C}$	11.80Ω 0.70 $\mu\epsilon/\text{°C}$	S 604
6	4905-17	9.45	13.74Ω - 10.6 $\mu\epsilon/\text{°C}$	10.99Ω - 3.2 $\mu\epsilon/\text{°C}$	9.85Ω 1.48 $\mu\epsilon/\text{°C}$	

No. 3 の S 602 を例にとって $R_{TC} = 0$ 即ち温度補償をしない場合の温度特性を Fig. A.1.1 に示した。温度とみかけの歪量との関係がほとんどリニアに現われている。Fig. A.1.2 にメーカー指定値の R_{TC} を用いた場合、その 20 % 減の値を使った場合、及び最終決定値の 10.75Ω を使った場合の温度特性曲線を示した。温度特性値としては常温から 100°C にかけての温度変化に対する見かけの歪量の変化割合と定義し、この値が 0 に近づくように R_{TC} の値を選んだ。従って 100°C 以上では S 601～S 604 のデータの信頼性は落ちるものと考えなければならない。

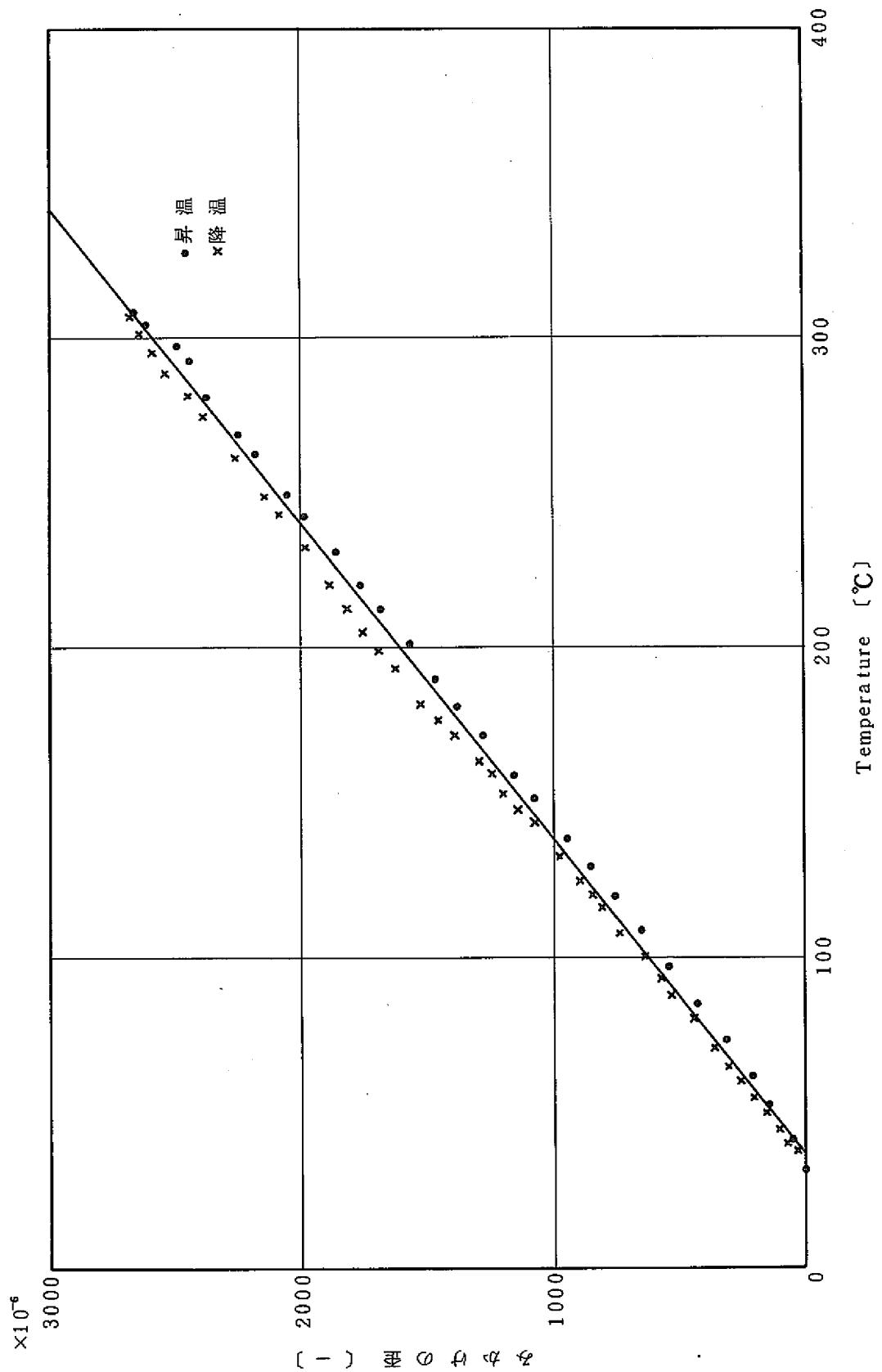


Fig. A.1. 1(a) 弁ゲージ温度とみかけの弾量との関係

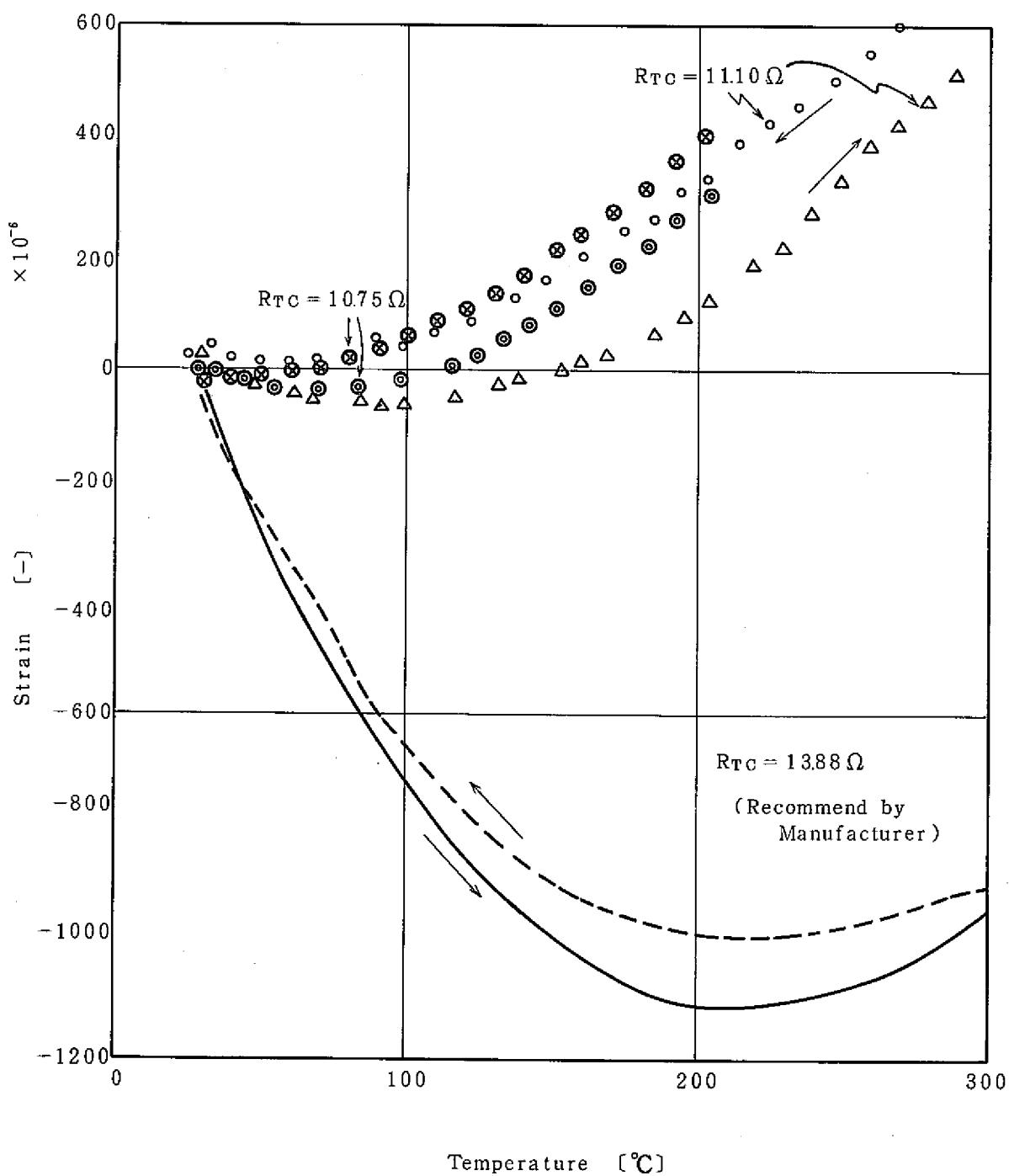


Fig. A. 1(b) 歪ゲージ温度とみかけの歪量との関係

Appendix 2. 反応容器内の圧力から放出系配管内流速を求める手法

1. はじめに

ここでは、4.1節の(2)で用いた反応容器内の圧力 P1110 から放出管内流速を求める手法を述べる。

反応容器からのナトリウム・スラグの流出が終って時間域Ⅱにはいった時点で、反応容器内の水素ガス $n \text{ mol}$ (気体成分はすべて水素ガスとした。) に対して状態式及び保存式を立てる
と、①及び②となる。

$$PV = nRT \quad \dots \quad ①$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{f \times q}{1.8 \times 10^{-2}} - \frac{\rho u A}{2 \times 10^{-3}} \quad \dots \quad ②$$

但し、
 $n [\text{mol}]$: 反応容器内の水素ガス mol 数

$P [\text{kg}_f/\text{cm}^2 \text{A}]$: 反応容器内の圧力

$V [\text{cm}^3]$: 反応容器内のガス空間

$R [\frac{\text{cm}^3(\text{kg}_f/\text{cm}^2 \text{A})}{\text{mol} \cdot ^\circ \text{K}}]$: 気体定数 ($= 79.43$)

$T [^\circ \text{K}]$: 反応容器内水素ガス温度

$f [-]$: $[\text{H}_2]/[\text{H}_2\text{O}] \text{ mol 転換比}$

$q [\text{kg/sec}]$: 注水率

$\rho [\text{kg}/\text{cm}^3]$: 水素ガスの密度

$u [\text{cm/sec}]$: 放出管入口部でのガス流速

$A [\text{cm}^2]$: 放出管内流路断面積

圧力 P と水素ガス mol 数 n のみを時間的な変数と見て、他は定数とすると、①から

$$\frac{\partial P}{\partial t} \cdot V = \frac{dn}{dt} R \cdot T \quad \dots \quad ③$$

となる。 $\rho = \frac{P}{R \cdot T} \times 2 \times 10^{-3}$ と言う関係及び②を③に代入すると、流速 u は次のように表わさ
る。

$$u = \left(\frac{f \cdot q \cdot R \cdot T}{1.8 \times 10^{-2}} - PV \right) / (\dot{P} \cdot A) \quad \dots \quad ④$$

Run-93 の条件を④に適用して放出系配管内流速を計算した。但し $f = 0.5$, $T = 593^\circ \text{K}$,
 $V = 2.578 \times 10^5 \text{ cm}^3$, $A = 1.259 \times 10^2 \text{ cm}^2$ を代入して、

$$u = (1.039 \times 10^4 q - 2.048 \dot{P}) / P \quad \dots \quad ④'$$

となるが、 q は Fig. 3.3.1 から \dot{P} 及び P は Fig. 3.3.5 から読み取る事ができる。最終結果を

Fig. 4.1.4 に示したが、この図を作成する過程で読み取ったデータを表 A.2.1 にまとめた。但し表 A.2.1 及び Fig. 4.1.4 に用いた u の単位は [m/sec] である。

表 A.2.1 計算に用いたデータ

T (sec)	P	P (ata)	q (kg/sec)	u (m/sec)
0.6	-1.95	9.08	1.55	22.13
0.8	-3.10	8.35	1.56	27.0
1.0	-7.58	7.50	1.56	42.3
1.2	-12.22	5.50	1.44	72.7
1.4	-1.50	4.55	1.40	38.7
1.6	-0.535	4.26	1.25	33.1
1.8	-1.08	4.17	1.20	35.2
2.0	-2.15	4.83	1.18	34.5
2.2	-0.645	3.51	1.09	36.03
2.4	0.0	3.52	1.02	30.11
2.6	-1.79	3.39	1.00	41.46
2.8	-1.08	3.07	1.00	41.1
3.0	-0.373	2.94	1.00	37.9
3.2	+0.268	2.93	0.90	30.0
3.4	0.880	3.06	0.94	26.0
3.6	0.278	4.20	0.88	20.4
3.8	-0.120	4.18	0.90	23.0
4.0	+0.275	4.17	0.84	19.6
4.2	+0.168	4.26	0.87	20.4
4.4	-0.988	4.18	0.82	25.2
4.6	-0.745	4.00	0.86	26.1
4.8	-0.173	3.92	0.81	22.4
5.0	+0.453	3.96	0.81	18.9
5.2	-0.463	3.96	0.60	18.1

Appendix 3. 非定常時の熱伝達率計算コードINLAPの概要

1. はじめに

SWAT-1 非予熱放出系配管の受ける非定常の熱流束／熱伝達率を推定する方法の一つとして、ラプラス変換とその数値逆変換を用いて測定温度から数値的に導き出す方法を使った。

本節には、その計算手法、計算プログラム、使用法を記した。また、計算例としてRun-91 T605～T607の計算に用いたデータを示す。

2. 計算方法

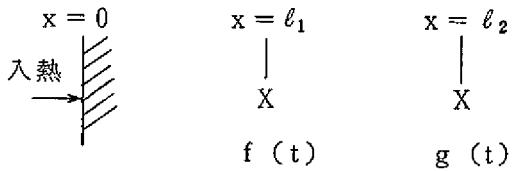
配管壁内での一次元非定常熱伝導方程式を時間についてラプラス変換し、測定部での温度変化と管内壁での熱流束との関係式を得る。この式に温度測定値の時間に関する直線近似式をラプラス変換して与え、管内壁の熱流束の数値解をラプラス領域で求める。次いで、ラプラス領域でのこの数値解を数値逆変換により実時間領域に変換して、熱流束と時間との数値的な関係が得られる。

熱伝達率は流体側の代表温度の選び方により種々な定義が考えられるが、ここでは、SWAT-1 放出系配管上の熱電対設置位置から次のように定義した。

$$\text{熱伝達率} = \frac{\text{配管内壁表面熱流束}}{\text{配管中心温度} - \text{配管内壁温度}}$$

ここで配管内壁温度は測定点2点から推定した内壁温度で、配管中心温度は測定値を用いる。
なお、本計算コードに用いた数値逆変換はBellman⁽⁴⁾らにより開発されたもので、岡村⁽⁵⁾らの利用例に従って計算コード化された。

以下に任意の2点で温度を測定する場合の解法を述べる。



熱伝導方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

Laplace 変換して

$$S \Theta = \alpha \frac{d^2 \Theta}{dx^2}$$

$$\frac{d^2 \Theta}{dx^2} - \frac{s}{\alpha} \Theta = 0$$

解は

$$\Theta = C_1 \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} x + C_2 \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} x \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

境界条件は

$$\left. \begin{array}{l} x = \ell_1 ; \theta = f(t) \\ x = \ell_2 ; \theta = g(t) \end{array} \right\} \text{での測定値から与えられる} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

境界条件を Laplace 変換して

$$\left. \begin{array}{l} x = \ell_1 ; \Theta = F(s) \\ x = \ell_2 ; \Theta = G(s) \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (3)'$$

(2)式に代入して C_1, C_2 を求めると

$$\left. \begin{array}{l} C_1 = \frac{F(s) \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 - G(s) \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1}{\cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1 \cdot \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 - \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 \cdot \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1} \\ C_2 = \frac{F(s) \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 - G(s) \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1}{\cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 \cdot \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1 - \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1 \cdot \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2} \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

(2)式に(4)式を代入

$$\Theta = \frac{[F(s) \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 - G(s) \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1] \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} x}{\cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1 \cdot \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 - \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 \cdot \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1} - \frac{[F(s) \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 - G(s) \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1] \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} x}{\cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1 \cdot \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 - \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 \cdot \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

本問題の趣旨により求めるべきものは、 $x = 0$ における温度と熱流速である。

従って

$$\Theta_{x=0} = \frac{F(s) \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 - G(s) \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1}{\cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1 \cdot \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 - \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 \cdot \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$Q = -\lambda \left(\frac{d\Theta}{dx} \right)_{x=0} = \lambda \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{F(s) \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 - G(s) \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1}{\cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1 \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 - \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1} \quad \dots \dots \dots (7)$$

実際に計算する場合、精度上から(6), (7)式の分母は下式右辺を用いる。

$$\cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1 \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 - \cosh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_2 \sinh \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \ell_1 = \sinh [\sqrt{\frac{s}{\alpha}} (\ell_2 - \ell_1)] \quad \dots \dots \dots (8)$$

$F(s)$, $G(s)$ の表示法

(6), (7)式の Laplace 逆変換は数値逆変換を用いる。

このため、(6), (7)式は任意の S について、数値的に求まつていれば良い。

$F(s)$, $G(s)$ は一次式群の折線近似とする。

すると例えば

$$0 \leq t < z_1 \quad f(t) = a_1 t$$

$$z_1 \leq t < z_2 \quad f(t) = a_1 t + a_2 (t - z_1)$$

$$F(s) = \frac{a_1}{s^2} + \frac{a_1}{s^2} e^{-z_1 s}$$

$$z_i \leq t < z_{i+1} \quad f(t) = a_1 t + a_2 (t - z_1) + \dots + a_i (-z_i)$$

$$F(s) = \frac{a_1}{s^2} + \frac{a_2}{s^2} e^{-z_1 s} + \dots + \frac{a_i}{s^2} e^{-z_i s} \quad \dots \dots \dots (9)$$

$G(s)$ についても同様とする。

$Q(s)$, $\Theta(s)$ の数値逆変換

次式により real time における熱流束を計算する。

$$q(t') = q(-b \log y) = \sum_{k=1}^N C_K \frac{1}{b} Q\left(\frac{k}{b}\right) \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $\log y = -0.693147$ とし、 C_K は次ページAINVL(K) の値を用いる。

すると

$$\left. \begin{array}{l} t = -b \log y = 0.693147 b \\ s = \frac{k}{b} \quad (k = 1, 2, \dots, 15) \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots (11)$$

$\Theta(s)$ も上記同様の取扱いとする。

次に INLAP のプログラム・リストを添付する。

```

C      INVERSE LAPLACE TRANSFORM FOR HEAT FLUX MEASUREMENT
C          M.SATO    1978-12
C      MAIN
C
0001  COMMON FA(10),FTIME(10),GA(10),GTIME(10),CA(10),CTIME(10),M,N
0002  DIMENSION AINV(15)
C
0003  AINV(1) = -3.1420898282268978 D+00
0004  AINV(2) = 7.4781738284354597 D+02
0005  AINV(3) = -4.3373408203062987 D+04
0006  AINV(4) = 1.0798483007813729 D+06
0007  AINV(5) = -1.4464283818359124 D+07
0008  AINV(6) = 1.1736246005859413 D+08
0009  AINV(7) = -6.1863940810546784 D+08
0010  AINV(8) = 2.2110096937500007 D+09
0011  AINV(9) = -5.4918100786376937 D+09
0012  AINV(10) = 9.5783965132324179 D+09
0013  AINV(11) = -1.1686231979296874 D+10
0014  AINV(12) = 9.7646703451171861 D+09
0015  AINV(13) = -5.3235100375488286 D+09
0016  AINV(14) = 1.7058761446289060 D+09
0017  AINV(15) = -2.4369659208984372 D+08
C
0018  AA=9.E+20
C
0019  DO 10 I=1,10
0020  CA(I)=AA
0021  CTIME(I)=AA
0022  FA(I)=AA
0023  FTIME(I)=AA
0024  GA(I)=AA
0025  GTIME(I)=AA
0026  10 CONTINUE
C
0027  READ(5,100)M
0028  READ(5,110)((FA(I),FTIME(I)),I=1,M)
0029  100 FORMAT(1Z)
0030  110 FORMAT(4E15.7)
0031  READ(5,100)N
0032  READ(5,110)((GA(I),GTIME(I)),I=1,N)
0033  READ(5,100)NN
0034  READ(5,110)((CA(I),CTIME(I)),I=1,NN)
0035  READ(5,120)ALFA
0036  READ(5,120)RAMP
0037  READ(5,120)AL2
C
0038  9999 CONTINUE
C
0039  READ(5,120,END=9998)DLTJM
0040  READ(5,120)TSTOP
0041  READ(5,120)AL1
0042  120 FORMAT(E15.7)
C
0043  FTIME(1)=0.0
0044  GTIME(1)=0.0
C
0045  WRITE(6,300)
0046  300 FORMAT(1H1,///,10X,32H HEAT FLUX MEASUREMENT M.SATO )

```

```

0047      WRITE(6,310)
0048      310 FORMAT(//,5X,13H INPUT DATA )
C
0049      WRITE(6,315)
0050      315 FORMAT(//,5X,6H FA= )
0051      WRITE(6,320)(FA(I),I=1,M)
0052      320 FORMAT(//,5X,4E15.7)
0053      WRITE(6,316)
0054      316 FORMAT(//,5X,10H FTIME= )
0055      WRITE(6,320)(FTIME(I),I=1,M)
0056      WRITE(6,318)
0057      318 FORMAT(//,5X,6H GA= )
0058      WRITE(6,320)(GA(I),I=1,N)
0059      WRITE(6,317)
0060      317 FORMAT(//,5X,10H GTIME= )
0061      WRITE(6,320)(GTIME(I),I=1,N)
0062      WRITE(6,330)
0063      330 FORMAT(//,5X,6H CA= )
0064      WRITE(6,320)(CA(I),I=1,NN)
0065      WRITE(6,332)
0066      332 FORMAT(//,5X,10H CTIME= )
0067      WRITE(6,320)(CTIME(I),I=1,NN)
C
0068      WRITE(6,420)
0069      420 FORMAT(//,5X,30H ALFA,RAMD,AL1,AL2,DLTIM,TSTOP)
0070      WRITE(6,430) ALFA, RAMD, AL1, AL2, DLTIM, TSTOP
0071      430 FORMAT(//,5X,6E15,5)
C
0072      WRITE(6,400)
0073      400 FORMAT(//,5X,15H OUT PUT DATA )
0074      WRITE(6,410)
0075      410 FORMAT(//,8X,5H TIME,8X,5H TSEC,
1     8X,5HCOND,8X,5HQREAL,8X,5HRCTMP,
2     8X,5HWTREL,8X,5HRFTMP,8X,5HRGTM)
C
0076      TIME=0,0
0077      AL21=AL2-AL1
C
C
0078      2000 CONTINUE
C
0079      TIME=TIME+DLTIM
0080      BTIME=TIME/0,693147
0081      QREAL=0,0
0082      WTREL=0,
C
0083      DO 1000 I=1,15
0084      CI=I
0085      S=CI/BTIME
0086      SQ=SQR(S/ALFA)
0087      SQL1=SQ*AL1
0088      SQL2=SQ*AL2
0089      SQL3=SQ*AL21
0090      SHL3=SINH(SQL3)
C
0091      QLAP=RAMD*SQ*(FTEMP(S)*COSH(SQL2)
1     -GTEMP(S)*COSH(SQL1))/SHL3
0092      QREAL=QREAL+AINV(1)*QLAP/BTIME

```

```

C
0093      WTLAP=(FTEMP(S)*SINH(SQL2)
0094          1 -GTEMP(S)*SINH(SQL1))/SHL3
0095      WTREL=WTREL+AINVL(I)*WTLAP/BTIME
0095 1000 CONTINUE
C
0096      RFTMP=RFTEMP(TIME)
0097      RGTMP=RGTEMP(TIME)
0098      RCTMP=RCTEMP(TIME)
0099      CONDR=QREAL/(RCTMP-WTREL)
C
0100      TSEC=TIME*3600,0
C
0101      WRITE(6,200) TIME,TSEC,CONDR,
0101          1 QREAL,RCTMP,WTREL,
0101          2 RFTMP,RGTMP
0102 200 FORMAT(5X,8E13.4)
C
0103      IF(TIME.LT.TSTOP)GOTO 2000
C
0104      GOTO 9999
C
0105      9998 STOP
0106      END

C      FUNCTION FTEMP
C
0001      FUNCTION FTEMP(S)
C
0002      COMMON FA(10),FTIME(10),GA(10),GTIME(10),CA(10),CTIME(10),M,N
C
0003      I=1
0004      S2=S*S
0005      FTP=FA(I)/S2
0006      DO 20 I=2,M
0007      FTP=FA(I)*EXP(-FTIME(I)*S)/S2+FTP
0008 20 CONTINUE
0009      FTEMP=FTP
0010      RETURN
0011      END

C      FUNCITON GTEMP
C
0001      FUNCTION GTEMP(S)
C
0002      COMMON FA(10),FTIME(10),GA(10),GTIME(10),CA(10),CTIME(10),M,N
C
0003      I=1
0004      S2=S*S
0005      GTP=GA(I)/S2
0006      DO 20 I=2,N
0007      GTP=GA(I)*EXP(-GTIME(I)*S)/S2+GTP
0008 20 CONTINUE
0009      GTEMP=GTP
0010      RETURN
0011      END

```

```

0001      FUNCTION RFTEMP(TIME)
0002      COMMON FA(10),FTIME(10),GA(10),GTIME(10),CA(10),CTIME(10),M,N
C
0003      I=1
0004      RFTP=0.
0005      20 CONTINUE
0006          RFTP=FA(I)*(TIME-FTIME(I))+RFTP
0007          I=I+1
0008          IF(TIME,GE,FTIME(I)) GOTO 20
C
0009      RFTEMP=RFTP
0010      RETURN
0011      END

0001      FUNCTION RCTEMP(TIME)
0002      COMMON FA(10),FTIME(10),GA(10),GTIME(10),CA(10),CTIME(10),M,N
C
0003      I=1
0004      RCTP=0,
0005      20 CONTINUE
0006          RCTP=CA(I)*(TIME-CTIME(I))+RCTP
0007          I=I+1
0008          IF(TIME,GE,CTIME(I)) GOTO 20
C
0009      RCTEMP=RCTP
0010      RETURN
0011      END

0001      FUNCTION RGTEMP(TIME)
0002      COMMON FA(10),FTIME(10),GA(10),GTIME(10),CA(10),CTIME(10),M,N
C
0003      I=1
0004      RGTP=0,
0005      20 CONTINUE
0006          RGTP=GA(I)*(TIME-GTIME(I))+RGTP
0007          I=I+1
0008          IF(TIME,GE,GTIME(I)) GOTO 20
C
0009      RGTEMP=RGTP
0010      RETURN
0011      END

```

Appendix 4. 非定常熱伝導・熱衝撃力計算手法

1. 計算モデル

非定常熱伝導のモデルを作る上で、簡単のため以下の仮定を用いた。

- 1) 管内壁とナトリウムとの間は線型熱伝達であるとする。
- 2) ナトリウムの径方向に温度分布はないとする。
- 3) “軸方向”“は無視する。
- 4) 放出系配管は完全な水平直管とし、ベンド・フランジ・計測器・支持材等は無視する。
- 5) 管内流はナトリウム単相流を仮定する。
- 6) 管内流は軸方向一次元の移動のみを考慮し、従って、ナトリウム・配管共に周方向の依存性は無視する。

このうち、2), 3) はナトリウムの凍結については実際より厳しい結果になるものと予想される。

2. 熱伝導方程式の差分化

2.1 基礎式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \Delta \theta \quad a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (2.1)$$

これを周方向依存性を無視した円筒座標の形に書改めると

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (2.2)$$

2.2 差分化

$$\left\{ \begin{array}{l} r = m \cdot \Delta r \\ z = n \cdot \Delta z \\ t = p \cdot \Delta t \end{array} \right. \quad \text{として} \quad \theta(r, z, t) = T_{m,n}^p \quad \text{と表わすと}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial r} &= \frac{T_{m,n}^p - T_{m-1,n}^p}{\Delta r} \\ \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} &= \frac{T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta r)^2} \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} &= \frac{T_{m,n}^p - T_{m,n-1}^p}{\Delta z} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

(2.3) を (2.2) に代入すると

$$\begin{aligned} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} &= a \left\{ \frac{T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta r)^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{m \cdot \Delta r} \frac{T_{m+1,n}^p - T_{m-1,n}^p}{2 \cdot \Delta r} + \frac{T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta z)^2} \right\} \\ T_{m,n}^{p+1} &= \frac{a \cdot \Delta t}{(\Delta r)^2} \left\{ \left(1 + \frac{1}{2m}\right) T_{m+1,n}^p + \left(1 - \frac{1}{2m}\right) T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p \right\} \\ &\quad + \frac{a \cdot \Delta t}{(\Delta z)^2} (T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p) \\ &\quad + T_{m,n}^p \end{aligned} \quad (2.4)$$

更に

$$\begin{aligned} \theta_r &= \frac{a \cdot \Delta t}{(\Delta r)^2} & \theta_z &= \frac{a \cdot \Delta t}{(\Delta z)^2} \quad \text{とおくと (2.3) は} \\ T_{m,n}^{p+1} &= \theta_r \cdot \Delta T_r + \theta_z \cdot \Delta T_z + T_{m,n}^p \end{aligned} \quad (2.5)$$

となる。ここで

$$\begin{cases} \Delta T_r = \left(1 + \frac{1}{2m}\right) T_{m+1,n}^p + \left(1 - \frac{1}{2m}\right) T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p \\ \Delta T_z = T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p \end{cases} \quad (2.6)$$

である。

3. 境界条件

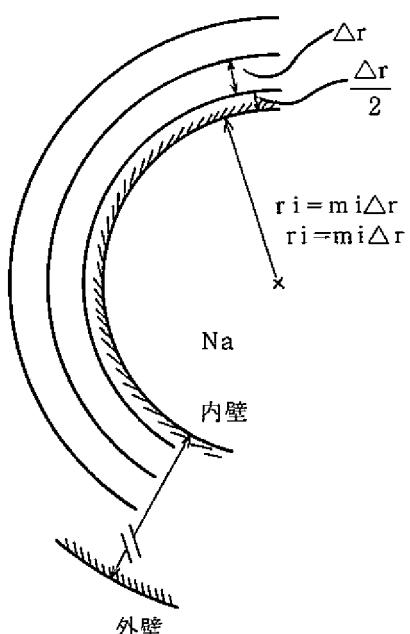
3.1 管 内 壁

管内壁におけるナトリウムとの熱伝達は一般に次のように表わす事ができる。

$$q = h (T_{Na} - T_w) \quad (3.1)$$

最も内側の ($\Delta r/2$) の厚みを持つ円筒について熱のつりあいを考えると

$$\begin{aligned} (\text{温度上昇}) &= (\text{流入熱量}) - (\text{流出熱量}) \\ C_p \rho \pi (m_i + \frac{1}{4}) (\Delta r)^2 \frac{T_{m_i,n}^{p+1} - T_{m_i,n}^p}{\Delta t} \\ &= 2 \pi m_i \Delta r h (T_{Na} - T_{m_i,n}^p) \\ &\quad - 2 \pi (m_i + \frac{1}{2}) \Delta r \lambda \frac{T_{m_i+1,n}^p - T_{m_i,n}^p}{\Delta r} \end{aligned}$$



$$+ \pi (m_i + \frac{1}{4}) (\Delta r)^2 \lambda \frac{T_{m_i, n+1}^p + T_{m_i, n-1}^p - 2T_{m_i, n}^p}{(\Delta x)^2} \quad (3.2)$$

となる。これは(2.5)において

$$\begin{aligned} \Delta T_r = & \frac{8m_i}{4m_i + 1} \frac{\Delta r \cdot h}{\lambda} (T_{Na, n}^p - T_{m_i, n}^p) \\ & + \frac{8m_i + 4}{4m_i + 1} (T_{m_{i+1}, n}^p - T_{m_i, n}^p) \end{aligned} \quad (3.3)$$

としたのに等しい。 ΔT_z はそのまま(3.2)の右辺第3項である。

但し、 r_i (内径) = $m_i \cdot \Delta r$ である。また(3.1)の熱伝達係数 h には、次のいずれかの式かまたは実験値を関数形で与える。

Martinelli-Lyon の式

$$h = \frac{\lambda_{Na}}{D} \left\{ 7.0 + 0.025 \left(\frac{\rho_{Na} U D C_{PNa}}{\lambda_{Na}} \right)^{0.8} \right\} \quad (3.4)$$

Seban-Shimazaki の式

$$h = \frac{\lambda_{Na}}{D} \left\{ 5.0 + 0.025 \left(\frac{\rho_{Na} U D C_{PNa}}{\lambda_{Na}} \right)^{0.8} \right\} \quad (3.5)$$

Lubarsky-Kaufmann の式

$$h = 0.625 \frac{\lambda_{Na}}{D} \left(\frac{\rho_{Na} U D C_{PNa}}{\lambda_{Na}} \right)^{0.4} \quad (3.6)$$

3.2 管外壁

管外壁は断熱条件を用いているので、(3.1)で $h = 0$ として、ほぼ同様の手法で次式が得られる。

$$\Delta T_r = \frac{8m_o - 4}{4m_o - 1} (T_{m_{o-1}, n} - T_{m_o, n}) \quad (3.7)$$

但し r_o (外径) = $m_o \cdot \Delta r$

3.3 管末端部

放出管の入口及び出口の端部に対しては次の境界条件を用いる。

$$\text{入口: 境界面温度} \quad T_{m, o} = T_{Na} \quad (3.8)$$

$$\text{出口: 断熱条件} \quad \Delta T_z = 2 (T_{m, N-1} - T_{m, N}) \quad (3.9)$$

4. 热応力計算・諸物性値

無限中空円筒（内径 a ，外径 b ）に加わる熱応力については，次の式を用いた。

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left\{ -\frac{1}{r^2} \int_a^r Tr dr + \frac{r^2 - a^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \int_a^b Tr dr \right\} \quad (4.1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{r^2} \int_a^r Tr dr + \frac{r^2 + a^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \int_a^b Tr dr - T \right\} \quad (4.2)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left(\frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b Tr dr - T \right) \quad (4.3)$$

但し，両端フリーとする。

ここで σ_r は，微小面積要素 $d\theta \cdot dz$ 上に r 軸方向に作用する応力成分である。

また

α 線膨張率 [$1/\text{ }^\circ\text{C}$]

E 縦弾性係数 [kg/cm^2]

ν ポアソン比 [-]

T 配管温度 [$^\circ\text{C}$]

これらの α ， E ， ν や比熱 C_p ，密度 ρ ，熱伝導率 λ 等の物性値について SUS304 に関しては，JSME 報告書 J254 76-02 中の値から，直線近似計算式を導き出し本計算に用いた。また，ナトリウムの物性値については，液体金属ハンドブック中の式を用いた。

次に本コードのプログラム・リストを添付する。

```

C
C      CALCULATION OF THERMAL STRESS IN NON-PREHEATED PIPING
C
0001    COMMON /TEMP/ TNA(500) *T(30,500)
0002    COMMON /INP/   RIN      *ROUT      *VEL      *TPIP
0003    COMMON /TIME/  TIME     *DT
0004    COMMON /TNA/   NTDATA   *TNA1(10) *TTNA(10)
0005    COMMON /HTTC/  NHTDTA   *HTC1(10) *THTC1(10)
0006    DIMENSION   TT(30,500) *TNN(500) *TMENR(30)
*          *SIGMA(3,30,500) *STR(3,500) *ITITLE(20)
C
C      DATA INPUT
C
0007    C      TITLE CARD
0008    READ(5,501) (ITITLE(I),I=1,20)
0009    C      CALCULATION PARAMETER
0010    READ(5,502) DT,DR,TSIMUL
0011    C      GEOMETRICAL PARAMETER
0012    READ(5,502) RIN,ROUT,PIPEL
0013    C      INITIAL CONDITION
0014    READ(5,502) TNA0,TPIP,VEL
0015    READ(5,503) NTDATA
0016    READ(5,510) (TTNA(I),TNA1(I),I=1,NTDATA)
0017    READ(5,503) NHTC,NHTO
0018    IF(NHTC,NE,4)      GO TO 10
0019    READ(5,503) NHTDTA
0020    READ(5,510) (THTC1(I),HTC1(I),I=1,NHTDTA)
0021    10 CONTINUE
0022    C      SET OF CALCULATIONAL PARAMETER
0023    C      RADIAL MESH
0024    MIN=INT(RIN/DR+0,5)
0025    MOUT=INT(ROUT/DR+0,5)
0026    MMESH=MOUT-MIN+1
0027    DRIN=(FLOAT(MIN)+0,5)*DR-RIN
0028    DROUT=ROUT-(FLOAT(MOUT)-0,5)*DR
0029    C      AXIAL MESH
0030    DZ=VEL*DT
0031    NO=0
0032    N1=INT(PIPEL/DZ+0,5)
0033    NMESH=N1+1
0034    ZS1=1,2
0035    ZS2=4,3
0036    NS1=ZS1/DZ+1
0037    NS2=ZS2/DZ+1
0038    C      INITIAL CONDITION
0039    DO 150 N=1,NMESH
0040    DO 100 M=1,MMESH
0041    T(M,N)=TPIP
0042    C      SIGMA(1,M,N)=0,0
0043    SIGMA(2,M,N)=0,0

```

```

0036   SIGMA(3,M,N)=0.0
0037   100 CONTINUE
0038   TNA(N)=TPIP
0039   150 CONTINUE
0040   TIME=0.0
0041   NHEAD=1
0042   NMAX=1
0043   ZL=0.0
0044   TZ=0.0
0045   TR=0.0
0046   HT=HTC(1,NHTC)
0047   HTMECH=HT*3600.0
0048   JUMP=1
0049   NWRT=1

C
C   OUTPUT OF INPUT DATA
C

0050   WRITE(6,500)
0051   WRITE(6,501) (ITITLE(I),I=1,20)
0052   WRITE(6,504)
0053   WRITE(6,505)
0054   WRITE(6,506)
0055   WRITE(6,508) DT,DR,DZ,TSIMUL,RIN,MIN,ROUT,MOUT,PIPEL,MMESH,NMESH
0056   WRITE(6,509) TNAO,TPIP,HT,HTMECH

C
0057   500 FORMAT(1H1)
0058   501 FORMAT(20A4)
0059   502 FORMAT(3E20.13)
0060   503 FORMAT(21I0)
0061   504 FORMAT(1H1,//10X,*****)
1*****1
210X,'*',110X,'*'/10X,'*',110X,'*'/10X,'*',9X,TTTTT H H EEEE RRRR
3 M M AA L',9X,'SSSS TTTTT RRRR EEEE SSSS SSSS',30X,'*'/
410X,'*',11X,'T H H E R R MM MM A A L',9X,'S T R R
5E S S',13X,'*',19X,'*'/
610X,'*',11X,'T HHHH EEE RRRR M M A A L',9X,
7'SSSS T RRRR EEE SSSS SSSS',12X,'NNN',15X,'*'/
810X,'*',11X,'T H H E R R M M AAAA L',12X,
9'S T R R E S S',10X,'I N N',15X,'*')

C
0062   505 FORMAT(10X,'*',11X,'T H H EEEE R RR M M A A LLLL SSSS
1 T R RR EEEE SSSS SSSS',10X,'I N N',15X,'*'/10X,'*',110X,'*'/
210X,'*',110X,'*'/10X,'*',7X,'NNN N OOOO NNN N PPPP RRRR EEEE
3H H EEEE AA TTTTT EEEE DDD PPPP I PPPP I NNN N GGGG',7X,
4'*'/10X,'*',7X,'N N N O O N N N P P R R E H H E A
5A T E D D P P I P P I N N N G',10X,'*'/
610X,'*',7X,'N N N O O N N N *** PPPP RRRR EEE HHHH EEE A A
7T EEE D D PPPP I PPPP I N N N G G',7X)

C
0063   506 FORMAT(10X,'*',7X,'N N N O O N N N P R R E H H E
1AAA A T E D D P I P I N N N G G',7X,'*'/
210X,'*',7X,'N N N N O O O N N N N P R R R EEEE H H EEEE A A
3T EEEE DDD P I P I N N N N G G',7X,'*'/
410X,'*',110X,'*'/10X,'*',110X,'*'/
510X,*****
6*****1//)

C
0064   508 FORMAT(10X,DT (TIME MESH) =',F10.4,' (SEC) //
```

```

1      10X,'DR (RADIAL MESH) =',F10.4,' ( M )'
2      10X,'DZ (AXIAL MESH) =',F10.4,' ( M )'
3      10X,'SIMULATION TIME =',F10.4,' (SEC) //'
4      10X,'RIN (INNER RADI.)=',F10.4,' ( M )',10X,'MIN =',I6/
5      10X,'ROUT(OUTER RADI.)=',F10.4,' ( M )',10X,'MOUT =',I6/
6      10X,'PIPE LENGTH =',F10.4,' ( M )',10X//'
7      10X,'TOTAL MESH NO.          RADI, =',I4,10X,'AX, =',I4//)
C
0065   C 509 FORMAT(10X,'SODIUM TEMP,     =',F10.4,' ( C )'
1      10X,'PIPE TEMP.      =',F10.4,' ( C )'
2      10X,'HEAT TRANSFER COEFFICIENT (INITIAL STATE) =',
3E15.8,5X,'(KCAL/(M2*SEC*CD))'//
454X,'=',F15.7,5X,'(KCAL/(M2*HR*CD))'///)
0066   510 FORMAT(8F10.5)
C      PHYSICAL CONSTANT
0067   PAI=3.14159
C
C      CALCULATION OF TEMPERATURE
C
0068   200 CONTINUE
C
0069   DO 210 I=1,NTDATA
0070   TM1=TTNA(I)
0071   TM2=TTNA(I+1)
0072   IF((TIME.LT.TM1),OR.(TIME.GE.TM2))      GO TO 210
0073   TNAO = (TNA1(I+1)-TNA1(I))/(TTNA(I+1)-TTNA(I))*(TIME-TTNA(I))
*           +TNA1(I)
0074                                     GO TO 215
0075   210 CONTINUE
0076   215 CONTINUE
0077   DO 250 NM=1,NMAX
0078   N=NN-1
0079   HT=HTC(NN,NHTC)
0080   HTAIR=HTOUT(NN,MMESH,NHTO)
C
C ****
C
0081   MM=1
0082   M=MIN
0083   F=FLOAT(M)
C
0084   DEFFP=ALMDP(MM,NN)/(CPP(MM,NN)*DENSP(MM,NN))
0085   THETR=DEFFP*DT/(DRIN*DRIN)
0086   THETZ=DEFFP*DT/(DZ*DZ)
C
0087   TR=8.0*F/(4.0*F+1.0)*DRIN/ALMDP(1,NN)*HT
1      *(TNA(NN)-T(1,NN))
2      +(8.0*F+4.0)/(4.0*F+1.0)*(T(2,NN)-T(1,NN))
C
C ****
0088   IF(NN.EQ.1)    TZ=2.0*(T(MM,2)-T(MM,1))
C   *
0089   IF((NN.EQ.NMAX).AND.(NMAX.NE.1))
*           TZ=(T(MM,NN-1)-T(MM,NN))*2.0
C   *
0090   IF((NN.NE.1).AND.(NN.NE.NMAX))
1           TZ=T(MM,NN+1)+T(MM,NN-1)-2.0*T(MM,NN)
C   *

```

```

C ****
C
0091      TT(MM,NN)=TR*THETR+TZ*THETZ+T(MM,NN)
C
0092      M1=MMESH=1
0093      DO 220 MM=2,M1
0094      M=MM+M1,N=1
0095      F=FLOAT(M)
C
0096      DEFFP=ALMDP(MM,NN)/(CPP(MM,NN)*DENSP(MM,NN))
0097      THETR=DEFFP*DT/(DR*DR)
0098      THETZ=DEFFP*DT/(DZ*DZ)
C
0099      TR=(1.0+0.5/F)*T(MM+1,NN)+(1.0-0.5/F)*T(MM-1,NN)
1      -2.0*T(MM,NN)
C ****
C *
0100      IF(NN.EQ.1)    TZ=2.0*(T(MM+2)-T(MM+1))
C *
0101      *   IF((NN.EQ.NMAX),AND,(NMAX.NE.1))
*   TZ=(T(MM,NN-1)-T(MM,NN))*2.0
C *
0102      IF((NN.NE.1),AND,(NN.NE.NMAX))
1      TZ=T(MM,NN+1)+T(MM,NN-1)-2.0*T(MM,NN)
C *
C ****
C
0103      TT(MM,NN)=TR*THETR+TZ*THETZ+T(MM,NN)
0104      220 CONTINUE
C
0105      MM=MMESH
0106      M=MOUT
0107      F=FLOAT(M)
C
0108      DEFFP=ALMDP(MM,NN)/(CPP(MM,NN)*DENSP(MM,NN))
0109      THETR=DEFFP*DT/(DROUT*DROUT)
0110      THETZ=DEFFP*DT/(DZ*DZ)
0111      TR=8.0*F/(4.0*F-1.0)*DROUT/ALMDP(MM,NN)*HTAIR
1      *(T(MM,NN)-TP1P)
2      +(8.0*F-4.0)/(4.0*F-1.0)*(T(MM-1,NN)-T(MM,NN))
C ****
C *
0112      IF(NN.EQ.1)    TZ=2.0*(T(MM+2)-T(MM+1))
C *
0113      *   IF((NN.EQ.NMAX),AND,(NMAX.NE.1))
*   TZ=(T(MM,NN-1)-T(MM,NN))*2.0
C *
0114      IF((NN.NE.1),AND,(NN.NE.NMAX))
1      TZ=T(MM,NN+1)+T(MM,NN-1)-2.0*T(MM,NN)
C *
C ****
C
0115      TT(MM,NN)=TR*THETR+TZ*THETZ+T(MM,NN)
C ****

```

```

0116      IF(NN.EQ.1) GO TO 230
0117      N1=NN=1
0118      TNN(NN)=TNA(N1)=2.0*HTC(N1,NHTC)*(TNA(N1)-T(1,NN))*DT
0119      1 / (RIN*DENS(N1)*CPN(N1))
0120      GO TO 240
0120      230 TNN(NN)=TNA0=2.0*HTC(1,NHTC)*(TNA0-T(1,NN))*DT
0121      1 / (RIN*DENS(N1)*CPN(N1))
0121      240 CONTINUE
0122      250 CONTINUE
C
0123      DO 280 NN=1,NMAX
0124      DO 270 MM=1,MMESH
0125      T(MM,NN)=TT(MM,NN)
0126      270 CONTINUE
0127      TNA(NN)=TNN(NN)
0128      280 CONTINUE
C
C      CALCULATION OF STRESS
C
0129      DO 400 NN=1,NMAX
0130      N=NN=1
0131      TMEAN=T(1,NN)*RIN*DRIN
0132      TMENR(1)=TMEAN/(DR*DR)
C
0133      M1=MMESH=1
0134      DO 300 MM=2,M1
0135      M=MM+MIN=1
0136      F=FLOAT(M)
0137      TXR=T(MM,NN)*F*DR*DR=0.5
0138      TMEAN=TMEAN+TXR
0139      TMENR(MM)=TMEAN/(DR*DR)
0140      TMEAN=TMEAN+TXR
0141      300 CONTINUE
0142      TXR=T(MMESH,NN)*ROUT*DROUT
0143      TMENR(MMESH)=(TMEAN+TXR)/(DR*DR)
C
0144      DO 350 MM=1,MMESH
0145      M=MM+MIN=1
0146      FIN=RIN/DR
0147      FOUT=ROUT/DR
0148      F=FLOAT(M)
C
0149      AYN=ALPH(MM,NN)*YOUNG(MM,NN)/(1.0=PNU(MM,NN))
C
0150      SIGMA(1,MM,NN)=AYN*(TMENR(MM)/(F*F)+TMENR(MMESH)*(F*F-FIN*FIN)
*   /(F*F*(FOUT*FOUT-FIN*FIN)))
C
0151      SIGMA(2,MM,NN)=AYN*(TMENR(MM)/(F*F)+TMENR(MMESH)*(F*F-FIN*FIN)
*   /(F*F*(FOUT*FOUT-FIN*FIN))-T(MM,NN))
C
0152      SIGMA(3,MM,NN)=AYN*(2.0*TMENR(MMESH)/(FOUT*FOUT-FIN*FIN)-T(MM,NN))
C
0153      S1=SIGMA(1,MM,NN)
0154      S2=SIGMA(2,MM,NN)
0155      S3=SIGMA(3,MM,NN)
C
0156      SIGMA(1,MM,NN)=SIGMA(1,MM,NN)*1.0E-6

```

```

0157      SIGMA(2,MM,NN)=SIGMA(2,MM,NN)*1.0E-6
0158      SIGMA(3,MM,NN)=SIGMA(3,MM,NN)*1.0E-6
C
0159      350 CONTINUE
C
0160      K=MMESH
0161      PN=PNU(K,NN)
0162      E=YOUNG(K,NN)
C
0163      STR(1,NN)=(S1=PN*(S2+S3))/E
0164      STR(2,NN)=(S2=PN*(S3+S1))/E
0165      STR(3,NN)=(S3=PN*(S1+S2))/E
C
0166      STR(1,NN)=STR(1,NN)*1.0E6
0167      STR(2,NN)=STR(2,NN)*1.0E6
0168      STR(3,NN)=STR(3,NN)*1.0E6
C
0169      400 CONTINUE
C
C      OUTPUT
C
0170      IF(NWRT,NE,JUMP)          GO TO 490
0171      WRITE(6,601) TIME,ZL,NHEAD
0172      DO 480 NN=1,NMAX
0173      FN=FLOAT(NN-1)
0174      Z=DZ*FN
0175      IF(NN,EQ,1)              GO TO 440
0176      IF(NN,EQ,NS1)             GO TO 440
0177      IF(NN,EQ,NS2)             GO TO 440
0178      IF(NN,EQ,NMAX)            GO TO 440
0179      GO TO 480
0180      440 CONTINUE
0181      HT=HTC(NN,NHTC)
0182      WRITE(6,602) NN,Z,TNA(NN),HT
0183      WRITE(6,603)
0184      WRITE(6,604)
0185      DO 450 MM=1,MMESH
0186      F=FLOAT(MM+MIN-1)
0187      R=DR*F
0188      WRITE(6,605) MM,R,T(MM,NN),(SIGMA(I,MM,NN),I=1,3)
0189      450 CONTINUE
0190      WRITE(6,606)(STR(J,NN),J=1,3)
0191      480 CONTINUE
0192      NWRT=0
C
0193      601 FORMAT(1H1,//,10X,'TIME =',F8.4,' (SEC)',11X,'L =',F6.3,' (M)'
1   ,6X,'( NHEAD =',I4,')')
0194      602 FORMAT(/2X,'N (AXIAL MESH NO.) =',I4,4X,'Z (AXIAL LENGTH) =',F7.3
1.4X,'TNA (SOD, TEMP,) =',F7.2,', (C,G),'4X'HEAT TRNS, CO,=',E12.5/)
0195      603 FORMAT(9X,'M',16X,'R',16X,'T(M,N)',10X,'STRESS ( RADIAL )'
1   ,3X,'STRESS ( HOOP )',5X,'STRESS ( AXIAL )')
0196      604 FORMAT(' ( RADIAL MESH NO.)',3X,'RADIAL (M)',6X,'TEMPERATURE(C)',7X
1   ,'( KG/MM**2 )',8X,'( KG/MM**2 )',8X,'( KG/MM**2 )')
0197      605 FORMAT(7X,I3,12X,F7.4,13X,F7.2,10X,E13.6,2(7X,E13.6))
0198      606 FORMAT(9X,'STRAIN',6X,'(MICRO ST,)',18X,3(10X,F10.4))
0199      490 CONTINUE
C
C      CALCULATION END OR NOT END?

```

```

C
0200      TIME=DT*NHEAD
0201      TTEST=DT*(FLOAT(NHEAD)-1,0)
0202      ZL=DZ*NMAX
0203      NHEAD=NHEAD+1
0204      NSTP=NHEAD-1
0205      NWRT=NWRT+1

C
0206      IF(NSTP.LE.20,AND,NSTP,GT,10)          JUMP=2
0207      IF(NSTP.LE.50,AND,NSTP,GT,20)          JUMP=5
0208      IF(NSTP.LE.100,AND,NSTP,GT,50)         JUMP=10
0209      IF(NSTP.LE.200,AND,NSTP,GT,100)        JUMP=20
0210      IF(NSTP.LE.500,AND,NSTP,GT,200)        JUMP=50
0211      IF(NSTP.LE.1000,AND,NSTP,GT,500)       JUMP=100
0212      IF(NSTP.LE.2000,AND,NSTP,GT,1000)      JUMP=200
0213      IF(NSTP.LE.5000,AND,NSTP,GT,2000)      JUMP=500

C
0214      NMAX=NHEAD
0215      IF(NMAX,GE,NMESH)           NMAX=NMESH
0216      IF(TTEST.LE.TSIMUL)        GO TO 200

C
0217      STOP
0218      END

(
0001      FUNCTION DENSN(N)
0002      COMMON /TEMP/ TNA(500),T(30,500)
0003      DENSN=950,1-0,22976*TNA(N)-1,46E-5*TNA(N)*TNA(N)
0004      1   +5,638E-9*TNA(N)*TNA(N)*TNA(N)
0005      RETURN
      END

0001      FUNCTION ALMDN(N)
0002      COMMON /TEMP/ TNA(500),T(30,500)
0003      ALMDN=2.192E-2-1,17E-5*TNA(N)
0004      RETURN
      END

0001      FUNCTION CPN(N)
0002      COMMON /TEMP/ TNA(500),T(30,500)
0003      CPN=0,34324-1,3868E-4*TNA(N)+1.1044E-7*TNA(N)*TNA(N)
0004      RETURN
      END

0001      FUNCTION DENSP(M,N)
0002      COMMON /TEMP/ TNA(500),T(30,500)
0003      DENSP=8047,0-0,12*T(M,N)
0004      RETURN
      END
  
```

```

0001      FUNCTION ALPH(M,N)
0002      COMMON /TEMP/ TNA(500) ,T(30,500)
0003      ALPH=16.4E-6+4.0E-9*T(M,N)
0004      RETURN
0005      END

```

```

0001      FUNCTION CPP(M,N)
0002      COMMON /TEMP/ TNA(500) ,T(30,500)
0003      IF(T(M,N).GE.120.0)   GO TO 100
0004      CPP=0.1045+1.32E-4*T(M,N)
0005      RETURN
0006      100 IF(T(M,N).GE.300.)   GO TO 200
0007      CPP=0.1143+5.13E-5*T(M,N)
0008      RETURN
0009      200 CPP=0.1214+2.72E-5*T(M,N)
0010      RETURN
0011      END

```

```

0001      FUNCTION YOUNG(M,N)
0002      COMMON /TEMP/ TNA(500) ,T(30,500)
0003      IF(T(M,N).GE.1500.0)  GO TO 100
0004      YOUNG=1.992E10-4.56E6*T(M,N)
0005      RETURN
0006      100 YOUNG=2.042E10-8.02E6*T(M,N)
0007      RETURN
0008      END

```

```

0001      FUNCTION PNU(M,N)
0002      COMMON /TEMP/ TNA(500) ,T(30,500)
0003      PNU=0.2622+7.56E-5*T(M,N)
0004      RETURN
0005      END

```

```

0001      FUNCTION ALMDP(M,N)
0002      COMMON /TEMP/ TNA(500) ,T(30,500)
0003      ALMDP=3.41E-3+3.2E-6*T(M,N)
0004      RETURN
0005      END

```

```

0001      FUNCTION HTC(N,NHTC)
0002      COMMON /TEMP/ TNA(500) ,T(30,500)
0003      COMMON /INP/ RIN      ,ROUT      ,VEL      ,TPIP
0004      COMMON /TIME/ TIME      ,DT
0005      COMMON /TNA/ NNTDATA   ,TNA1(10) ,TTNA(10)
0006      COMMON /HTTC/ NHTDTA   ,HTC1(10) ,THTC1(10)
0007      GO TO (1,2,3,4),NHTC
0008 1  HTC=ALMDN(N)/(2.0*RIN)*(7.0
     1  +0.025*(DENSN(N)*VEL*2.0*RIN*CPN(N)/ALMDN(N))**0.8)
0009      GO TO 1000
0010 2  HTC=ALMDN(N)/(2.0*RIN)*(5.0
     1  +0.025*(DENSN(N)*VEL*2.0*RIN*CPN(N)/ALMDN(N))**0.8)
0011      GO TO 1000
0012 3  HTC=0.625*ALMDN(N)/(2.0*RIN)
     1  *(DENSN(N)*VEL*2.0*RIN*CPN(N)/ALMDN(N))**0.4
0013      GO TO 1000
0014 4  CONTINUE
0015      DO 20 I=1,NHTDTA
0016      TH1=THTC1(I)
0017      TH2=THTC1(I+1)
0018      IF((TIME.LT,TH1).OR,(TIME.GE,TH2))      GO TO 20
0019      HTC=(HTC1(I+1)-HTC1(I))/(TH2-TH1)*(TIME-TH1)+HTC1(I)
0020      GO TO 1000
0021 20 CONTINUE
0022 1000 CONTINUE
0023      RETURN
0024      END

```

```

0001      FUNCTION HTOUT(N,M,NHTO)
0002      COMMON /TEMP/ TNA(500) ,T(30,500)
0003      COMMON /INP/ RIN      ,ROUT      ,VEL      ,TPIP
0004      COMMON /TIME/ TIME      ,DT
0005      GO TO (1,2),NHTO
0006 1  TMEN=(TPIP+T(M,N))*0.5
0007      DFT=T(M,N)-TPIP
0008      IF(DFT.LT,0.0)      DFT=0.0
0009      AIRNU=TMEN*1.05E-7+1.33E-5
0010      GRAS=9.807/(273.15+TMEN)*ROUT*ROUT*ROUT*8.0*DFT/(AIRNU*AIRNU)
0011      PRNTL=0.71
0012      ANUSLT=0.53*(GRAS*PRNTL)**0.25
0013      ALMDAR=TMEN*1.8056E-8+5.7778E-6
0014      HTOUT=ANUSLT*ALMDAR/ROUT*0.5
0015      RETURN
0016 2  HTOUT=0.0
0017      RETURN
0018      END

```