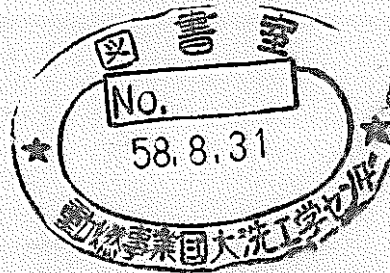


高温・高圧水噴出試験による SWACS 水噴出率計算モジュールの検証

—LMFBR 蒸気発生器伝熱管破断時の
水噴出率に関する試験研究 (第2報)—



1982年2月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N 941 82-37
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

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ください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

高温・高圧水噴出試験による SWACS 水噴出率計算モジュールの検証

—LMFBR蒸気発生器伝熱管破断時の水噴出率に関する試験研究（第2報）—

広 井 博*
三 宅 収*
佐 藤 稔*

要 旨

蒸気発生器伝熱管破断時の水噴出率計算用の計算コード（SWAC-11）の妥当性を検証するために、長い管路での高温・高圧水のブローダウン試験を実施し、定常水噴出率ならびに圧力、スラスト力の過渡変化が測定された。特に、スラスト力測定に「ばね・質量」モデルを適用することで極めて短時間の過渡変化データが得られた。

これらの試験結果はSWAC-11と比較された。定常時の測定値に対しては、Moodyモデル、二相増倍係数に関しても検討した。得られた主な結論は、以下のとおりである。

- (1) 定常値に関して、SWAC-11は全体を通して概略よく合っているが、飽和水の高圧領域では水噴出率、スラスト力を10～15%低く見積る。これは二相増倍係数にThomの相関を使用することで改善される。
- (2) 噴出開始から約5 msec後の値に関しても、SWAC-11はほぼ妥当な値を予測する。
- (3) サブクール水に対してもSWAC-11の流動モデルは適用できる。
- (4) 噴出直後のスラスト力は、Wave ForceとBlowdown Forceの合力Fであるが、そのFと初期圧力 P_0 と断面積Sとの関係は飽和水条件では $F/S \cdot P_0 > 1.0$ であり、データを包絡する整理式としては $F/S \cdot P_0 = 1.36$ であった。
- (5) スラスト力、圧力の過渡変化全体の計算結果と測定結果とを詳細に比較すると、計算結果は単調な変化を示しているのに対し、測定結果はより複雑な波形であり、完全には一致しなかった。この傾向は、特にサブクール水条件で顕著であった。
- (6) 過熱蒸気による試験結果は、定常値および非定常値ともに、既報のガス噴出試験と同様に、測定値とSWAC-11の予測値は一致した。

Feb. 1982

Validation on a Water Leak Calculation Module of SWACS by High Temperature and Pressure Water Blowdown Tests

Report No.2: Study of Water Leak Rate from a Failed Heat Transfer Tube in an LMFBR's SG

Hiroshi HIROI*, Osam MIYAKE*
and Minoru SATO*

Abstract

Blowdown tests of high temperature and pressure water from a long pipe were carried out to validate the computer code SWAC-11 which is used for the calculation of the water leak rate from a failed heat transfer tube in an LMFBR's SG.

The steady leak rate, and transients of pressure and thrust force of the pipe were measured. Especially, the short term transient of thrust force can be obtained by a new measuring method using the spring-mass model.

These data were compared with calculation results of SWAC-11. As for steady data, the Moody's model of the critical flow and the effect of the two-phase multiplier were studied.

Major conclusions are as follows:

- (1) The calculation results of SWAC-11 almost agreed with the steady data. But in detail, SWAC-11 inclined to predict 10 ~ 15% less than experimental data of water leak rate and thrust force in the case of high pressure saturated water. This discrepancy will be reduced by introducing the Thom's correlation as the two-phase multiplier.
- (2) The calculation results of SWAC-11 also agreed with the experimental data after 5 msec since the blowdown was initiated.
- (3) The flow model of SWAC-11 can be applied to the blowdown of the subcooled water.

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

- (4) The thrust force (F) immediately after the blowdown is the sum of the wave force and the blowdown force. The relation of F, the initial pressure P_0 , and cross section S can be given by the expression,
$$F/S \cdot P_0 = 1.36.$$
- (5) Compared with calculation results in detail, the profiles of experimental data were found to be more complicated. This tendency was observed markedly in the case of the subcooled water blowdown.
- (6) Test results of superheated steam blowdown agreed with SWAC-11 predictions as for unsteady data as well as steady data.

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法および試験条件	3
3. 飽和水試験	4
3.1. 飽和水試験の概要	4
3.2. 解析法の概要	4
3.3. 定常水噴出率	6
3.4. スラスト力	6
3.4.1. SWAC - 11 による計算結果と試験結果との全体的な比較	6
3.4.2. 定常スラスト力	7
3.4.3. 初期準定常スラスト力	8
3.4.4. 初期スラスト力ピーク値	9
3.5. 圧 力	9
3.5.1. SWAC - 11 による計算結果と試験結果との全体的な比較	9
3.5.2. 定常圧力	10
3.5.3. 初期減圧値	11
4. 圧力一定条件試験	12
4.1. 圧力一定条件試験の概要	12
4.2. 解析法の概要	12
4.3. 定常水噴出率	13
4.4. スラスト力	13
4.4.1. SWAC - 11 による計算結果と試験結果との全体的な比較	13
4.4.2. 定常スラスト力	14
4.4.3. 初期準定常スラスト力	14
4.4.4. 初期スラスト力ピーク値	15
4.5. 圧 力	15
4.5.1. SWAC - 11 による計算結果と試験結果との全体的な比較	15
4.5.2. 定常圧力	16
4.5.3. 初期減圧値	16
4.6. 過熱蒸気試験結果	17
4.6.1. 定常解との比較	17
4.6.2. 非定常解との比較	18

5. ま と め	19
6. 謝 辞	21
7. 参考文献	22
Appendix 1 SWAC - 11 のインプットリスト	72
Appendix 2 平均水噴出率の検討	73
Appendix 3 真空中に膨張する際の状態量の変化	74
Appendix 4 Run - W 212 試験結果	77
Appendix 5 Run - W 221 試験結果	87
Appendix 6 Run - W 231 試験結果	97
Appendix 7 Run - W 244 試験結果	109
Appendix 8 Run - W 252 試験結果	125
Appendix 9 Run - W 332 試験結果	143
Appendix 10 Run - W 325 試験結果	157

List of Figures and Tables

Fig. 2.1	Dimension of Test Apparatus and Instrument Location.....	24
Fig. 2.2a	Two Types of the pressure Tap.....	25
Fig. 2.2b	Detail of the Pipe End.....	25
Fig. 2.3	Comparison of Pressure Data Measured by Different Pressure Taps (W223, P-5).....	30
Fig. 2.4	Comparison of Pressure Data Measured by Different Pressure Taps (W223, P-6).....	31
Fig. 2.5	Comparison of Pressure Data Measured by Different Pressure Taps (W232, P-5).....	32
Fig. 2.6	Comparison of Pressure Data Measured by Different Pressure Taps (W232, P-6).....	33
Fig. 3.1	Comparison of Average Water Flow Rates and Calculation Results.....	34
Fig. 3.2	Comparison of Thrust Force Transient in W212.....	35
Fig. 3.3	Comparison of Thrust Force Transient in W221.....	36
Fig. 3.4	Comparison of Thrust Force Transient in W231.....	37
Fig. 3.5(1)~(2)	Comparison of Thrust Force Transient in W244.....	38
Fig. 3.6(1)~(2)	Comparison of Thrust Force Transient in W252.....	40
Fig. 3.7	Comparison of Steady Thrust Force Data and Calculation Results.....	42
Fig. 3.8	Comparison of Initial Quasi-Steady Thrust Force Data and Calculation Results.....	43
Fig. 3.9	Total Thrust Force.....	44
Fig. 3.10	Comparison of Pressure Transients in W212.....	45
Fig. 3.11	Comparison of Pressure Transients in W221.....	46
Fig. 3.12	Comparison of Pressure Transients in W231.....	47
Fig. 3.13(1)~(3)	Comparison of Pressure Transients in W244.....	48
Fig. 3.14(1)~(2)	Comparison of Pressure Transients in W252.....	51
Fig. 3.15	Comparison of Steady Pressures.....	53
Fig. 3.16	Comparison of Pressure Distribution in W244.....	54
Fig. 3.17	Comparison of Pressure Distribution in W252.....	55
Fig. 3.18	Outlet Pressure just after Rupture Disk Burst.....	56
Fig. 4.1	Comparison of Steady Water Flow Rates and Calculation Results.....	57

Fig. 4.2	Comparison of Thrust Force Transient in W332.....	58
Fig. 4.3	Comparison of Thrust Force Transient in W325.....	59
Fig. 4.4	Comparison of Steady Thrust Force Data and Calculation Results.....	60
Fig. 4.5	Comparison of Initial Quasi-Steady Thrust Force Data and Calculation Results.....	61
Fig. 4.6	Total Thrust Force.....	62
Fig. 4.7(1)~(2)	Comparison of Pressure Transient in W332.....	63
Fig. 4.8(1)~(2)	Comparison of Pressure Transient in W325.....	65
Fig. 4.9	Comparison of Steady Pressure.....	67
Fig. 4.10	Outlet Pressure immediately after Rupture Disk Burst.....	68
Fig. 4.11(1)~(2)	Comparison of Initial Thrust Force Transient in W362.....	69
Fig. 4.12	Comparison of Pressure Transient in W362.....	71
Fig. A.2-1	試験前後の状態	73
Fig. A.2-2	各状態量の時間変化.....	73
Fig. A.4-1~A.4-3	Thrust Force Transient.....	77
Fig. A.4-4	Pressure Transient.....	80
Fig. A.4-5	Pressure and Temperature in Water Heater Tank.....	81
Fig. A.4-6~A.4-10	Temperature Transient.....	82
Fig. A.5-1~A.5-3	Thrust Force Transient.....	87
Fig. A.5-4	Pressure Transient.....	90
Fig. A.5-5	Pressure and Temperature in Water Heater Tank.....	91
Fig. A.5-6~A.5-10	Temperature Transient.....	92
Fig. A.6-1~A.6-3	Thrust Force Transient.....	97
Fig. A.6-4	Pressure Transient.....	100
Fig. A.6-5	Pressure and Temperature in Water Heater Tank.....	101
Fig. A.6-6~A.6-11	Temperature Transient.....	102
Fig. A.7-1~A.7-3	Thrust Force Transient.....	109
Fig. A.7-4~A.7-8	Pressure Transient.....	112
Fig. A.7-9	Pressure and Temperature in Water Heater Tank.....	117
Fig. A.7-10~A.7-15	Temperature Transient.....	118
Fig. A.8-1~A.8-5	Thrust Force Transient.....	125
Fig. A.8-6~A.8-10	Pressure Transient.....	130
Fig. A.8-11	Pressure and Temperature in Water Tank.....	135
Fig. A.8-12~A.8-17	Temperature Transient.....	136
Fig. A.9-1~A.9-3	Thrust Force Transient.....	143
Fig. A.9-4~A.9-7	Pressure Transient.....	146
Fig. A.9-8	Pressure and Temperature in Water Heater Tank.....	150

Fig. A.9-9~A.9-14	Temperature Transient.....	151
Fig. A.10-1~A.10-3	Thrust Force Transient.....	157
Fig. A.10-4~A.10-7	Pressure Transient.....	160
Fig. A.10-8	Pressure and Temperature in Water Heater Tank.....	164
Fig. A.10-9~A.10-14	Temperature Transient.....	165
Table 2.1	Conditions and Major Results of Saturated Water Blowdown Tests.....	26
Table 2.2	Conditions and Major Results of Constant Pressure Water Blowdown Tests.....	27
Table 2.3	Initial Temperature Distributions of Saturated Water Blowdown Tests.....	28
Table 2.4	Initial Temperature Distribution of Pressure Constant Water Blowdown Tests.....	29
Table 3.1	Analytical Tools.....	5
Table 4.1	過熱蒸気の定常解析解.....	17
Table 4.2	W362の解析解と試験結果の比較.....	17

1. はじめに

液体金属冷却高速増殖炉プラントの蒸気発生器において、伝熱管が破断した場合は大リーク・ナトリウム-水反応事故と呼ばれ、動燃大洗工学センターで一連の研究が進められてきた。本報告書は、特に破断した伝熱管からの水噴出率に注目したものである。

しかし、水噴出率そのものの測定は、定常値に関して得られているものの、速い過渡変化では報告例がない。水/蒸気の比較的速い過渡現象に着目した実験としては、Edwards等の研究⁽¹⁷⁾がよく知られており、このデータは精度が高いこと、体系が非常に単純であることのため多方面で解析コード検証用の標準問題とされている。国内においても、比較がなされている⁽¹³⁾。しかし、圧力測定の精度は高いものの、水噴出率そのものを直接測定したデータはなく、さらにボイド率も測定されているものの過渡応答、配管内でのボイド分布の問題があるため、比較対象として充分とは言い難い。従って、圧力測定以外の別の物理量を測定し、それを計算コードと比較することが重要である。そこで、本研究では、配管の先端にベンド部を設け、水の噴出に伴うスラスト力を測定することで、水噴出率測定に代えて計算コードを検証することを試みた。

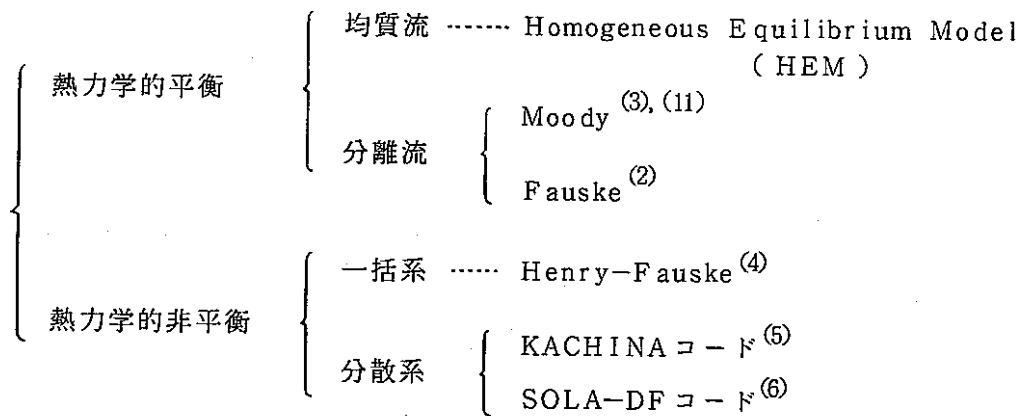
第1報では、スラスト力の計算モデル、測定モデルの妥当性を検証するために実施されたガス噴出試験について報告した。そして、動燃で開発されてきた大リーク・ナトリウム-水反応解析コード(SWACS; Sodium-Water Reaction Analysis Code System)の水噴出率計算モジュール(SWAC-11)の数値計算上の妥当性を確認した。しかし、SWAC-11の二相流に対する流動モデルの妥当性は、ガスによる試験では確認できないため、高温・高圧水による試験が実施された。本報告は、この結果をまとめたものである。

高温・高圧水の噴出する現象は、気液二相流であることにより臨界流が生ずる。臨界流に関する研究は、従来から様々に行なわれてきており、それらの研究をレビューした報告⁽¹⁾もある。その報告によると臨界流の影響因子は、流体の圧力、エンタルピー等の熱力学的条件、配管の長さ(L)および内径(D)、その他流体中の溶存ガス量、配管内表面条件であるとされている。

蒸気発生器伝熱管破断時の水噴出現象は、圧力が $150 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ 程度で、様々なエンタルピーを持った高温・高圧水/蒸気が長い伝熱管を通して流出するという特徴がある。しかし、長い管路からの高圧水/蒸気の流出に関する研究例は数少ない。

そこで、本研究では、全長 $7,422 \text{ mm}$ (上流側 $21.2 \phi_{ID} \times 4,240$, 下流側 $10.9 \phi_{ID} \times 3,182$)の配管を使用し、圧力は約 $20 \text{ kg/cm}^2 \text{ a} \sim 120 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ までパラメータとした飽和水条件の試験と、圧力は約 $40 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ と一定にし、エンタルピーをパラメータとした試験を実施した。

一方、臨界流を記述する様々なモデルが提案されており、大別すると、下表のように分類される。⁽¹⁾



SWAC-11 は上記の HEM に相当し、一般的には低めの水噴出率を与えられている。そこで、本報告書では SWAC-11 以外に、軽水炉のブローダウン解析でよく使用されている Moody のモデルによる検討も行なった。また、配管中の圧損に大きく影響する二相増倍係数について検討した。

本報告書は、2章で試験方法、試験条件を記述したが、詳細な試験装置および試験方法は第1報⁽⁷⁾を参照されたい。3章では飽和水試験、4章では圧力一定条件試験について、それぞれ解析結果と比較した。

2. 試験方法および試験条件

高温・高圧水噴出試験は、大別すると (1)飽和水条件試験 (2)圧力一定条件試験とに分けられる。試験装置、圧力、温度等の測定位置を Fig. 2.1 に示す。

それぞれの試験での水加熱器圧力・温度、先端に設けられたラプチャ板の設定圧力、ラプチャ板の破裂法をまとめて、Table 2.1, Table 2.2 に示した。なお、同表には、主な試験結果もまとめて示されている。

これらの試験データの計測法およびラプチャ板破裂法の詳細は、第1報⁽⁷⁾に述べられている。ラプチャ板破裂法には、「モリ型」、「改良モリ型」、「アーク法」の3種類があるが、「改良モリ型」は、初期のスラスト力測定に悪影響を及ぼすことが第1報で明らかにされているので、その場合には初期スラスト力のデータはTable 2.1, 2.2 から除外されている。

また、圧力計測に関しては、第1報で報告した常温のガス噴出試験では分からなかった問題が生じ、高温・高圧水噴出試験の途中で変更した。圧力計タップはFig. 2.2 に示すように、Aタイプ、Bタイプの2種類のタップが使用された。Aタイプは、圧力の速い過渡変動に追従できるように、圧力計の受圧面が管内面に接する構造となっている。しかし、この構造では受圧面での温度変動により、一定時間が経過すると正確な測定値を示さなくなる。そこで、Bタイプの計測点に約100 mmの導圧管を接続し、試験前に水を充填した上で計測する構造とした。この改造されたBタイプでは、温度変動をほとんど受けないので、長時間に渡る圧力計測の精度は向上したが、導圧管内の残留ガスの影響と思われる圧力振動が発生する場合があった。

Fig. 2.3 ~ Fig. 2.7 にAタイプによる圧力計測データと改造Bタイプによる圧力計測データを比較した。これらの図から、10 ~ 15 msec 後にはAタイプの計測データの信憑性がなくなることが分かる。

従って、次章以降では、初期の10 ~ 15 msec の圧力データに関してはAタイプの計測結果を(次章以降で示されるP-1 ~ P-4, P-5 A, P-6 A, P-7, P-8 AがAタイプである)、また、それ以上に長い圧力の過渡変化には、改造Bタイプの計測結果を(P-5 B, P-6 B, P-8 Bの3点のみである)用いることにする。

なお、この改造Bタイプが使用された試験は、試験番号W223, W232, W233, W244, W252, W323, W324, W325, W332, W362である。

配管部の熱電対の位置および加熱法に関しては、第1報に述べられている。これらの熱電対で測定された試験直前の配管内温度分布を各試験ごとにまとめ、Table 2.3, 2.4 に示した。

3. 飽和水試験

3.1 飽和水試験の概要

飽和水条件の試験は Table 2.1 に示すとおり、13 回実施された。水加熱器圧力を約 20, 40, 60, 80, 120 ata と 5 通りに変化させ、それに対応してラプチャ板の設定圧も変えた。

大部分の飽和水試験では、ラプチャ板は瞬時に完全開口したが、W211 試験はスラスト力測定データから判断すると開口遅れがあったと思われる、W232 試験は試験後の観察結果より約 70% の開口面積であった。

水加熱器では、圧力と温度が計測されている。両方の測定データと飽和水条件の圧力-温度の関係⁽⁸⁾を比較すると、測定された温度が 1~2℃ だけ飽和温度よりも高い場合がある。圧力データと温度データのどちらが正確な値を測定しているか明確ではないが、本章以降での議論では、測定圧力が正しかったものとして取扱う。

また、配管中の初期状態における温度測定結果を Table 2.3 に示した。同表においても、測定結果が飽和温度よりも 4~5℃ 高いのが (10℃ 以上のものもある) 認められるが、その原因は分からない。次節以降では、すべて均一な飽和状態として計算した。

主な測定項目は、定常水噴出率 (測定法については後述する)、配管内圧力、温度、スラスト力である。圧力およびスラスト力の過渡変化から判断すると、水噴出開始後 0.6~1.0 sec で定常に達している。その後は、水加熱器内圧力が低下するのに伴い、ゆるやかに変動する。(Appendix 4~10 の実験データ参照) 従って、Table 2.1 の圧力およびスラスト力の定常値データは、1 sec 頃の値を読み取ったものである。

なお、各飽和圧力に対応した典型的試験データとして、W212, W221, W231, W244, W252 の結果を Appendix 4~8 にまとめた。

3.2 解析法の概要

本報は、大リーク・ナトリウム-水反応解析コード (SWACS) の水噴出率計算モジュール (SWAC-11) の妥当性の検証を目的としているので、試験結果と解析結果との比較は、主に SWAC-11 を使って行なわれた。

SWAC-11 の詳細は、既刊報告書⁽⁹⁾に述べられており、本試験用に改造された点の詳細も第 3 報⁽¹⁰⁾に記述されている。また、スラスト力解析モデルの紹介、ガス噴出試験および解析解と比較してその妥当性を検証した結果は、第 1 報に詳述されている。

従って、典型的計算例のインプットリストのみ Appendix 1 に示して、SWAC-11 の説明は省略する。

本試験体系のように長い管路の高温・高圧水の解析例には、Moodyによるもの⁽¹¹⁾、赤川によるもの⁽¹²⁾等が知られている。これらはいずれも定常解を求めたものであり、それぞれの文献に計算結果が図示されている。本報告では、定常水噴出率計算プログラムとして作成された「STELRA」⁽¹³⁾ (Steady Water Leak Rate Program)を使用した。

「STELRA」は一次元の運動量の方程式から、有限長さ ΔL と有限圧力幅 ΔP との関係を次式の形で求め、

$$\Delta L = -2 d_i \left[\frac{g \Delta P + G^2 \cdot \Delta f_1}{\phi^2 \lambda v^1 G^2 + 2 g d_i \bar{\gamma} \sin \theta} \right] \quad (3.1)$$

- ここで、
 d_i : 管内径 g : 重力加速度 G : 重量流量
 Δf_1 : スリップを考慮した平均比容積の変化 ϕ^2 : 二相増倍係数
 λ : 管摩擦係数 v^1 : 換算比容積
 $\bar{\gamma}$: 平均比重量 θ : 流路の傾き

ΔL の和が体系長と一致するように流量 G を繰り返し計算で求めるものである。臨界条件は(3.1)式で $\Delta L \approx 0$ となるまでとしている。また、改良された本コードは、Moodyのモデルや均質平衡流 (Homogeneous Equilibrium Model) のいずれも計算でき、かつ二相増倍係数としてはMartinelli-Nelsonの相関やThomの相関⁽¹⁴⁾が取扱える。なお、改造された「STELRA」の詳細は、第3報で報告されている。

次節以降での解析手法をまとめて下表に示す。

Table 3.1 Analytical Tools

Code Name	Fluid Model	Two Phase Multiplier	Discription
SWAC-11	HEM	Martinelli-Nelson	All Transient
STELRA	HEM	Thom's Correlation	Steady
STELRA	Separated Flow (Moody's Model)	Levy's Correlation	Steady

これらの解析結果との比較は、定常水噴出率、スラスト力、圧力に関して行なわれた。

なお、SWAC-11の長時間計算の結果から、200 msecでは定常に達することが確認されたので、SWAC-11の定常解は200 msecの値を使用する。(計算例はFig. 3.5(2), 3.13(3)を参照)

また、上で述べたすべての計算では、配管との熱の授受を無視した。

3.3 定常水噴出率

二相流の水噴出率を直接にかつ速い過渡変化を測定する計測法は、現在のところ知られていない。本研究では、定常水噴出率を2通りの方法で測定した。

1つは平均水噴出率であり、次式で定義される。

$$(\text{平均水噴出率}) = \frac{(\text{液面計信号から求められる総水噴出量})}{(\text{バルブ開時間})} \quad (3.2)$$

この定義による平均水噴出率の検討を、Appendix 2 に示した。バルブ開時間の影響も考えられるので、同じ飽和水条件でバルブ開時間が異なる試験を実施し、その影響のないことを確認した。

もう1つはタービン流量計によって測定された体積流量を、重量流量に変換したものである。タービン流量計は、水加熱器に近い位置で配管径の太い部分に設置されているので、流量計の通過時にはほとんど単相流となっていると考えられる。従って、水加熱器圧力に対応した比重量を用いて、重量流量に変換しても実用上問題はない。

以上の2つの測定結果は Table 2.1, 2.2 に示すようにほぼ一致するので、以下の解析との比較図では平均水噴出率のデータを用いることにする。この測定定常水噴出率とSWAC-11あるいは、STELRAによるHEM/Thomモデル、Moodyモデルとの比較を Fig. 3.1 に示す。

同図から以下のことが結論される。

- (1) 定常水噴出率に関してSWAC-11の計算結果は、高圧側で10~15%程度過小評価となる。
- (2) Moodyのモデルは、過大評価である。
- (3) HEM/Thomモデルが最もよく一致する。
- (4) SWAC-11とHEM/Thomモデルの差は、二相増倍係数の差であり、SWAC-11ではMartinelli-Nelson (M-Nと略記)が使用されている。一般に、高圧領域ではM-NはThomの相関よりも大きな増倍係数を与えることが知られている。⁽¹⁵⁾
- (5) 従って、SWAC-11では大きな二相増倍係数を使用しているため、圧力損失を大きく評価し、結果的に水噴出率をわずかながら小さく予測すると考えられる。

3.4 スラスト力

3.4.1 SWAC-11による計算結果と試験結果との全体的な比較

スラスト力の速い過渡変化の測定例は、これまで得られていない。本研究では、第1報で述べたように、荷重計の周波数特性を改善しただけでなく、測定系を「ばね・質量」の系に

近似させることによって、約 1.5 msec 以降の時間に関しては、精度の高いスラスト力データを得た。本節で示されるスラスト力データの時間軸が 15 msec のものは、「ばね・質量」モデルで測定データを処理したものである。（100 msec の時間軸のスラスト力データも論理的に可能であるが、プロッタープログラムの容量の制約のため、本節で示したプロッター図は処理されていないものである。従って初期の振動が消えた部分から意味のあるデータである。）

実施された試験は飽和水条件で 13 回であるが、前述したようにラプチャ板破裂法の影響を受け、初期の過渡変化のデータが得られてないものもある。また、ラプチャ板の破裂遅れ等の不完全破裂によると思われるものもあった。

そこで、問題のなかった試験ケースから、各飽和圧力ごとに 1 ケースずつを選んで、SWAC-11 と比較した結果を Fig. 3.2 ~ Fig. 3.6 に示す。なお、現象の始まりは同図中の時間軸原点ではなく、信号の立上り時間である。

500 msec まで計算した W244 試験 (Fig. 3.5 (1), Fig. 3.5 (2)) を例にとり、計算結果と試験結果との全体的な比較を行なうと、以下のとおり結論が得られる。

- (1) 試験結果には初期にピークが存在するが、計算ではなだらかに減少している。試験結果そのものも、この時間領域の過渡変化を完全に測定したとは言えないが、初期ピーク値そのものはガス噴出試験（第 1 報 5.2.1 節参照）と同じ傾向を示しており、ほぼ実際のスラスト力が測定されていると考えられる。
- (2) 試験結果は、5 msec 頃にはほぼ一定値に達している。（この値を「初期準定常値」と定義しておく。）
- (3) 試験結果では、上記の初期準定常値がしばらく継続し、その後 2 番目のピークが現われる。このピークの後は急激に減少し、その後再びゆるやかに増加して定常値に達している。（0.5 sec 以降のデータは Appendix 7 に収録されている。）なお、2 番目のピークが現われる時間は 30 msec ~ 100 msec と試験によりばらついている。一方、計算は、なだらかな変化を示している。この両者の傾向の差は、次節で述べる圧力にも同様に現われているが、その原因は配管内の温度分布あるいは沸騰遅れ等の熱力学非平衡によるものと考えられるが、現在のところ明確でない。
- (4) 試験では、定常に達するのが 0.6 ~ 1.0 sec 後であり、計算では 0.15 ~ 0.2 sec 後である。

次項以降に、試験全体で得られた定常値、初期準定常値、初期ピーク値と解析結果とを比較する。

3.4.2 定常スラスト力

試験で得られた定常スラスト力と SWAC-11 による計算結果、STELRA による HEM/

／ Thom モデルと Moody モデルによる計算結果とを比較して Fig. 3.7 に示した。同図から以下のことが結論される。

- (1) 定常スラスト力に関する試験データのばらつきが大きく、上限値と下限値とは約 20 % 程度差がある。
- (2) SWAC - 11 による計算結果は、高圧側で測定値の下限値に近い値となっている。
- (3) Moody モデルは、高圧側で過小評価となっている。
- (4) HEM / Thom モデルが最もよく一致する。
- (5) 3.3 節の定常噴出率に関しては、高圧側において、Moody > HEM / Thom > SWAC - 11 の順であったが、スラスト力に関しては HEM / Thom > SWAC - 11 > Moody の順である。Moody モデルは、水噴出率においては試験結果より高めであったのが、スラスト力では試験結果よりも低い値となっている。この Moody モデルの傾向は、スリップが考慮された分離流モデルであることによると考えられる。
- (6) 従って、本試験体系のような長い管路の二相流の流出は、均質流で評価できるものと考えられる。
- (7) なお、HEM / Thom モデルと SWAC - 11 との差は同じ均質流ではあるが、二相増倍係数によるものである。

3.4.3 初期準定常スラスト力

配管から流体が流出することによって配管が受けるスラスト力は、

$$F = S \left[\frac{\rho_E u_E^2}{g} + (P_E - P_\infty) \right] + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho u \, dV \quad (3.3)$$

ここで、 F : スラスト力 S : 管断面積 ρ : 密度
 g : 重力加速度 u : 速度 V : 検査面内体積
 添字 E : 出口端の物理量
 添字 ∞ : 大気 of 物理量
 但し、工学系単位の表示式

で表わされる。(第 1 報 3 章参照)

第 1 項は Blowdown Force, 第 2 項の運動量の時間変化分は Wave Force と名付けられており、Wave Force は圧力波の伝播によるもので、本試験体系では、1 msec 以内ではほとんど 0 となる。

従って、3.4.1 項で定義した初期準定常スラスト力は、初期の Blowdown Force のみに相当する。

この測定結果とSWAC-11との比較結果をFig. 3.8に示す。同図から以下のことが結論される。

- (1) 初期準定常スラスト力に関して、SWAC-11の計算結果は、高圧側で20%程度過小評価となる。
- (2) この傾向は、定常スラスト力においても認められたものである。一方、定常では二相増倍係数を変えただけのHEM/Thomモデルがよく一致していたことから判断すると、SWAC-11にThomの相関を組み込むことにより、試験結果と計算はより一致すると考えられる。

3.4.4. 初期スラスト力ピーク値

初期スラスト力ピーク値の物理的な意味は、前項で述べたBlowdown ForceとWave Forceの和、つまり全スラスト力である。

この全スラスト力は、ガス噴出の場合、解析的に $F/S \cdot P_o = 1.0$ になり、ピーク値の試験結果もこれを支持していた。(第1報3章, 5章参照) ここで、 F は全スラスト力、 S は管断面積、 P_o は初期圧力である。

一方、この単純な関係式が二相流に適用可能であるか否か興味あるところであるが、Moodyによる特性曲線法による解析では、二相流においても $F/S \cdot P_o = 1.0$ であった。⁽¹⁶⁾

本試験で得られたピーク値と $F/S \cdot P_o = 1.0$ の関係をFig. 3.10に示す。同図から以下のことが結論される。

- (1) 全スラスト力に関して、 $F/S \cdot P_o = 1.0$ の関係式は、過小評価となる。
- (2) 全データを包絡する関係式を求めると、 $F/S \cdot P_o = 1.36$ であり、スラスト力を保守的に評価するにはこの関係式を使用すればよい。

3.5 圧 力

3.5.1 SWAC-11による計算結果と試験結果との全体的な比較

2章で述べたように、圧力測定の際に温度の影響を受けることが明らかにされたため、10～15 msec間の圧力変動の測定例はほぼ全試験ケースで得られているが、長時間の圧力変動に関しては、改造Bタイプの測定結果のみで、試験ケースとしてはW223, W232, W233, W244, W252の5ケースであり、計測点もP-5B, P-6B, P-8Bの3点に限定されている。また、W232試験では、ラプチャ板が70%ほどしか開口しなかったため、比較対象から除外した。

各計測位置はFig. 2.1に示されており、特に出口端の圧力P-8A, P-8Bに関してはFig. 2.2bに示したように、厳密な測点位置は異なっている。つまり、P-8Aは出口端より24 mm離れており、この位置はSWAC-11で計算する際の最終メッシュの中心に位置する。

一方、P-8Bは、出口端より2mmしか離れていない。以下の計算との比較でも、初期の圧力過渡変化はP-8Aで比較しており、15 msec以降の圧力過渡変化にはP-8Bを使用している。ただし、P-5B、P-6Bは、P-5A、P-6Aと同じ位置である。

3.4節のスラスト力と同様に、各飽和圧力ごとに1ケースずつ典型的試験例を選び、SWAC-11と比較した結果をFig. 3.10～Fig. 3.14に示す。(Appendix 4～8にはスラスト力、圧力、温度の測定結果が示されているので、それも参照されたい。)なお、現象の始まりは同図中の時間軸原点ではなく、P-8AあるいはP-8Bの信号の下がり始めである。

500 msecまで計算したW244試験(Fig. 3.13(1)～Fig. 3.13(3))を例にとり、特に出口圧力に注目して計算結果と試験結果との全体的な比較を行なうと、以下の結論が得られる。

- (1) 試験結果の圧力の下がり方は急激(0.3～0.4 msec)であり、P-7、P-6A、P-5Aと計算よりも早く減圧波の伝播が認められる。一方、計算結果はゆるやかに変動しており、圧力の初期過渡変化の傾向は異なっている。この原因の一つは、試験体系には温度分布が存在し、若干のサブクール度をもっていたことによるものと考えられる。このため、次項以降の初期圧力の減圧値の比較は、計算値には5 msecの値を、測定値には0～5 msecまでの最大値と最小値の幅をとって行なうものとする。(3.5.3項参照)
- (2) 試験結果では、減圧された圧力はしばらく経過すると(30～100msecで試験により異なる)上昇し、ピークを形成し(Fig. 3.13(2), (3)参照)、その後再び減圧される。減圧された圧力は0.3 sec頃に定常に達する。この全体的な傾向は、スラスト力にも認められたものである。
- (3) 一方、計算結果は単調な減圧過程を示すのみであり、0.1～0.2 sec頃には定常に達する。
- (4) 両者の傾向の差は、配管内温度分布あるいは沸騰遅れ等の熱力学的非平衡によるものと考えられるが、現在のところ明確でない。

3.5.2 定常圧力

試験で得られた定常時の圧力(P-8B、P-6B)とSWAC-11による計算結果、STELRAによるHEM/ThomモデルとMoodyモデルによる計算結果を比較してFig. 3.15に示した。また、W244とW252に関しては、配管中の圧力分布を比較してFig. 3.16, Fig. 3.17に示した。これらの図から以下のことが結論される。

- (1) 配管途中での圧力(P-6B)に関しては、3つのモデルともそれほど差がなく、いずれも試験結果の方が、5～10%程度低い。
- (2) 出口端での圧力(P-8B)に関しては、HEM/Thomモデルによる計算結果が一番高

く、SWAC-11とMoodyモデルはほぼ一致している。測定結果とはSWAC-11とMoodyモデルがよく一致している。

- (3) 水噴出率およびスラスト力に関しては、HEM/Thomモデルが最もよく一致していたが、圧力に関しては逆の結果となっている。
- (4) Fig. 3.16, 3.17の図から分るように、P-6B, P-8Bより上流ですでに計算結果と試験結果とがずれているので、圧力が一致しない原因はP-5Bよりも上流側にありそうである。例えば、バルブ、タービン流量計およびレギュレーサの二相流での圧損の取扱い方がその要因として考えられる。

3.5.3 初期減圧値

ラプチャ板が破断して5 msecまでの減圧された出口の圧力値と、SWAC-11による計算結果を比較して、Fig. 3.18に示す。比較対象の圧力はP-8Aでの値であり、波形が単調でないので、5 msecまでの最小値と最大値が示されている。本図から以下のことが結論される。

- (1) 測定データの広がり、減圧波形の非単調性を示すもので、高圧領域ほど非単調である。例えば一度減圧され、再び上昇し、さらに減圧されるというパターンが認められた。
- (2) 計算結果との比較では、高圧領域ほど計算結果の方が低めの値となる。出口端の圧力を低く見積る「くせ」は、ガス噴出においても認められたことである。(第1報5章参照)
- (3) 3.4.3項の初期準定常スラスト力でも同様の傾向が認められ、その時の推論と同様に、二相増倍係数をThomの相関を使用することで、測定結果とはもっとよく一致するようになると思われる。
- (4) しかし、Thomの相関を使用すると前項で述べたように定常値の圧力を高めに予測してしまうので、圧力の全体を完全に一致させるのは、現状では困難であろう。

4. 圧力一定条件試験

4.1 圧力一定条件試験

圧力一定条件試験は Table 2.2 に示すとおり、14 回実施された。ラプチャ板設定圧力を一定とし、ラプチャ板破断時のエンタルピーをパラメータとした試験である。

本試験は大別すると(i)サブクール水試験 (ii)二相状態試験 (iii)過熱蒸気試験に分けられる。

(i)のサブクール水試験では、サブクール度を100℃まで変化させることを試みた。しかし、サブクール度が100℃と大きい場合(W311, W312)には、ラプチャ板が30%程度しか開口しないので、解析対象から除外した。

本試験装置で、飽和水以上のエンタルピーを持つ二相状態を安定して作るのは困難である。しかし、配管途中に設けられた弁(WV26D, Fig. 2.1 参照)まで飽和水で満たし、その下流を真空状態にしておき、弁を開放することで、ラプチャ板が破裂する直前の状態を二相状態にすることは可能である。この方法で行なった試験がW341, W342, W351である。しかし、この試験ではラプチャ板は内圧で自然破裂するのであるが、その時の圧力が測定できなかった。従って、この3つの試験データは参考程度の意味しかない。本節でも測定データをプロットしているが、その際には、ラプチャ板破裂圧が40～50 kg/cm² aであったと仮定して初期のエンタルピーを算出している。なお、真空中に膨張する際のエンタルピーの計算法は Appendix 3 に示した。また、この3回の試験結果の初期データ以外の定常値データ(水噴出率、スラスト力)は飽和水試験に相当するものであるから、3章でのデータ整理に含ませて記述されている。

(iii)の過熱蒸気試験はW361, W362 であり、2回実施した。過熱蒸気は理想気体と考えられるので、第1報でのガス噴出試験と同じであることを確認するために実施したものである。

本節では初期圧力をできるだけそろえることを目標にしたが、Table 2.2 に示すとおり、初期値は40～46.5 kg/cm² a とばらついている。また、初期が45 kg/cm² a であっても、サブクール水の場合、定常に達する0.6～1.0 sec 頃には水加熱器圧力の低下が著しく、数kg/cm² は低い圧力となっていた。従って、個々の試験ケースは厳密には圧力一定条件を満たしていたわけではない。

さらに、Table 2.4 の初期状態における配管中の温度測定結果が示すように、全体の温度分布は飽和水の時より大きい。

なお、サブクール水試験の典型的試験データとして、W332, W325の結果を Appendix 9～10 にまとめた。

4.2 解析法の概要

飽和水試験と同様に、SWAC-11, STELRAによるMoodyモデル, HEM/Thomモデル

と比較した。

ただ、SWAC-11に関しては、サブクール度が大きい場合には、配管途中で圧力の不連続が生じ30 msec～100 msecで計算が停止してしまう現象が生じたため、全ケースの比較ができなかった。圧力の不連続発生の原因は、現在のところ不明である。

しかし、STELRAによって、SWAC-11と同じ均質流でMartinelli-Nelsonの相関を使用した計算が可能なので（HEM/M-Nモデル）、各定常値との比較をHEM/M-Nモデルで行なった。その結果、40 kg/cm² a付近の圧力ではHEM/ThomモデルとHEM/M-Nモデルはほとんど差がなかった。従って、SWAC-11もHEM/Thomモデルと差がないと考えられる。

また、前節で述べたように、ラプチャ板破裂圧のばらつきや、定常時における水加熱器圧力の低下があるため個々の試験ケースを全て対象とすると、計算ケースが膨大となるため、エンタルピーをパラメータとした計算では、圧力は40 kg/cm²のみ実施した。ただし、典型的試験例であるW332、W325に関しては、温度分布も考慮した試験条件による計算を行なった。

4.3 定常水噴出率

飽和水試験（3.3節）と同様に測定平均水噴出率と解析結果を比較し、Fig. 4.1に示した。両者はほぼ一致しており、Fig. 4.1から以下のことが結論される。

- (1) 定常水噴出率に関してサブクール度が大きくなるに従い、モデルによる計算結果の差は小さい。
- (2) いずれのモデルによる計算結果も、40 kg/cm² a近傍でのサブクール水の定常水噴出率の測定データとよく一致している。
- (3) HEM/M-NとSWAC-11は同じモデルに立脚しているので、SWAC-11も妥当であると考えられる。
- (4) HEM/ThomとHEM/M-Nが一致しているのは、3章の結論から低圧領域の比較であったためと考えられる。

4.4 スラスト力

4.4.1 SWAC-11による計算結果と試験結果との全体的な比較

飽和水試験（3.4節）と同様に、15 msecのデータは「ばね・質量」モデルで処理されたものである。

実施された試験のなかで、ラプチャ板が30%しか開口しなかったり、初期の開口が完全でなく、途中で再開口したと思われる試験（W323）があった。

そこで、問題のなかった試験ケースから、エンタルピーの異なるサブクール水条件の試験2ケースを選び、SWAC-11と比較した結果をFig. 4.2、Fig. 4.3に示す。なお、同

図中の現象の始まりは時間軸原点ではなく、信号の立上り時間である。

両図から全体的な比較の結果、以下のことが結論される。

- (1) 飽和水試験で得られたスラスト力と比較して、初期ピークは顕著でなく、初期値以降の方が大きな値となっている。一方、計算では初期値が大きく、その後単調に減少している。
- (2) 測定データは、1 sec までの間の波形が非常に不安定であり、突発的なピークが表われている。(Fig. 4.3 参照)しかし、この不安定な波形は1 sec 頃には安定化し、定常に達する。
- (3) この不安定現象は、温度分布を考慮した解析でも模擬できなかった。従って、現在のところ原因が不明である。
- (4) サブクール度の大きい計算では、SWAC - 11 は計算途中で止まる場合があった。(W 325 の解析例がそれである。)

次項以降に、試験全体で得られた定常値、初期準定常値、初期ピーク値と解析結果とを比較する。

4.4.2 定常スラスト力

試験で得られた定常スラスト力と、STELRAによるHEM/Thomモデル、HEM/M-NモデルおよびMoodyモデルによる計算結果とを比較してFig. 4.4に示した。計算は、水加熱器圧力が $40 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ である場合であり、一方試験での圧力は $40 \sim 46.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ であった。(比較対象としている定常時には、水加熱器圧力はこの値より数 $\text{kg/cm}^2 \text{ a}$ 低い値である。) 本図から以下のことが結論される。

- (1) 定常スラスト力に関する試験データのばらつきは大きい。
- (2) 各モデルを比較すると、Moodyモデルはサブクール度にほとんど依存しないで、ほぼ一定値である。
- (3) HEM/Thom, HEM/M-Nは 240 kcal/kg でピークとなっていて、水噴出率の単調な傾向と異なっている。これは、サブクール度が大きくなるに従い配管中の二相部分が縮小して出口まで単相になると、出口圧力が低下するため、一方水噴出率は単調に増加するため、両者の和としてはピークが形成されるのである。(出口圧力のエンタルピー依存性は4.5.2参照)
- (4) サブクール度に対する傾向やスラスト力の予測値から判断して、HEM/Thomモデルが最もよく一致する。ただし、計算値よりも40%程度大きい測定結果も存在している。

4.4.3 初期準定常スラスト力

4.4.1で述べたように、サブクール水の初期準定常スラスト力は、飽和水の時と比較して一定していない。そこで、測定結果も約5 msecまでのスラスト力を対象として整理し、

SWAC - 11 の計算結果と比較して Fig. 4.5 に示した。また、二相状態でのスラスト力もラプチャ板破裂圧が不明であるが、参考として示し、過熱蒸気試験も合わせて示されている。本図の計算結果も初期圧力は $40 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ で計算されており、一方、本試験では $40 \sim 46.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ であった。本図から以下のことが結論される。

- (1) エンタルピーをパラメータとして考えると、初期準定常スラスト力は飽和水条件で最大となる。つまり、サブクール度が大きくなると初期準定常スラスト力は小さくなるし、クォリティが大きくなっても初期準定常スラスト力は小さくなる。
- (2) データのばらつきは大きいですが、SWAC - 11 の計算と測定値はほぼ一致している。

4.4.4 初期スラスト力ピーク値

初期スラスト力ピーク値の物理的意味は、3.4 節で述べたとおり全スラスト力である。

本試験で得られたピーク値と $F/S \cdot P_o = 1.0$ の関係を Fig. 4.6 に示す。試験時の初期圧力が $40 \sim 46.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ なので、 $P_o = 40, 45 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ の両方を Fig. 4.6 に示してある。本図から以下のことが結論される。

- (1) 飽和水条件（エンタルピーが約 260 kcal/kg のところ）では、 $F/S \cdot P_o = 1.0$ よりも大きな値が存在するのは 3.4.4 で述べたとおりである。
- (2) また、過熱蒸気条件はガス噴出試験と同様に $F/S \cdot P_o = 1.0$ に一致する。
- (3) サブクール水条件では、 $F/S \cdot P_o = 1.0$ よりも小さな値である。
- (4) しかし、ガス噴出試験で確認されたスラスト力の計測方法がサブクール水で妥当であるか否か現状では断定できないため、(3)の結論の一般性には疑問がある。つまり、サブクール水はガスに較べて音速が早いため、(3.3)式の Wave Force の持続時間が短くなり、従って、初期に発生するピークは鋭くなると予想される。他方、現状の計測は、そのデータ処理法は、その鋭いピークをなまらせる可能性があるからである。

4.5 圧 力

4.5.1 SWAC - 11 による計算結果と試験結果との全体的な比較

計測法、計測位置については 3.5 節で述べたとおりであり、長時間の圧力計測が可能であった試験は W323, W324, W325, W332, W362 である。

4.4 節のスラスト力と同様に、サブクール度の異なる W332, W325 と SWAC - 11 と比較した結果を Fig. 4.7, Fig. 4.8 に示す。（計算は 100 msec までであるが、Appendix 9, 10 には長時間のデータおよび温度の測定結果も示されているので参照されたい。）なお、現象の始まりは同図中の時間軸原点ではなく、P-8AあるいはP-8Bの信号の下がり始めである。

両図をもとに全体的な比較を行なうと、以下の結論が得られる。

- (1) 試験の出口圧力の下がり方は急激であり、最低値に達した後再びゆるやかに回復する。一方、計算値は初期条件で設定したエンタルピーに相当する飽和圧力までは急激に低下するが、それ以後の傾向は異なる。(特にW332)
- (2) 上流側への圧力の伝播過程は、計算結果の方が早い。特に飽和水条件に近いW332は、測定結果の減圧波伝播が遅れている。(W332の伝播速度は、飽和水条件の時とほぼ同じである。)
- (3) サブクール度の大きいW325では、上流側圧力(P-5A)の傾向が異なる。測定結果では、減圧された圧力がすぐ回復し、それが下流側に伝播しているのが観察されるが、計算結果では減圧されたままの一定圧力が持続している。
- (4) 本計算は、配管内温度分布を入力値として計算したものであるが、初期過渡変化の傾向は完全には一致していない。不一致の原因としては、熱力学的非平衡が考えられる。
- (5) 長時間の過渡変化は概略一致しており、測定結果は約1 sec頃には定常に達している。(Appendix 参照)

4.5.2 定常圧力

試験で得られた定常圧力と、STELRAによる(HEM/Thomモデル, HEM/M-NモデルおよびMoodyモデルによる計算結果とを比較してFig. 4.9に示した。ただし、計算では水加熱器圧力を 40 kg/cm^2 としているのに対し、試験では圧力は $42 \sim 46.5 \text{ kg/cm}^2$ であった。(比較対象としている定常時には水加熱器圧力は、この値より数 kg/cm^2 低い値である。)本図から以下のことが結論される。

- (1) 配管途中での圧力(P-6B)に関しては、どのモデルでもそれほど差がなく、いずれも試験結果とほぼ一致している。
- (2) 出口端での圧力(P-8B)に関しては、サブクール度の小さい領域では、HEM/ThomモデルとHEM/M-Nモデルによる計算結果が最も高く、Moodyモデルとは傾向が異なる。しかし、どのモデルが正しいかは、エンタルピーが $215 \sim 255 \text{ kcal/kg}$ の測定データが得られてないので、断定できない。

4.5.3 初期減圧値

ラプチャ板が破断して5 msecまでの減圧された出口の圧力値と、SWAC-11による計算結果を比較して、Fig. 4.10に示した。但し、計算条件は初期値 $40 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ としたものであり、試験は $40 \sim 46.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ であった。本図から以下のことが結論される。

- (1) 4.5.1で述べたように圧力の微細波形を比較すると形状は異なっているが、5 msecまでの平均的減圧値はSWAC-11と一致する。

4.6 過熱蒸気試験結果

本章では、主にサブクール水による試験結果を中心に記述してきた。本節では、過熱蒸気について結果をまとめる。

解析法に関しては、過熱蒸気が理想気体として扱えるので、第1報のガス噴出試験と同様に行なった。

4.6.1 定常解との比較

解析解には断熱流れ、等温流れの解が知られており、本試験体系は $4 f \frac{L}{D} = 12.668$ であるから、W362 に関しては下表の計算結果となる。(計算法は、第1報 Appendix 4.6 参照)

Table 4.1 過熱蒸気の定常解析解

	断熱流れ	等温流れ
入口マッハ数 Mo (-)	0.2192	0.2161
出口圧力 P_E ($kg/cm^2 a$)	$0.205 P_o$	$0.246 P_o$
噴出流量 $\frac{W}{S}$ ($kg/s \cdot m^2$)	$4.72 \times 10^{-3} P_o$	$4.65 \times 10^{-3} P_o$
スラスト力 $\frac{F}{S}$ (kg/m^2)	$0.472 P_o - P_\infty$	$0.493 P_o - P_\infty$
出口温度 T_E ($^{\circ}K$)	$0.876 T_o$	T_o

上表は、 $T_o = 585 (^{\circ}K)$ として計算したものであり、W362 の試験条件 $P_o = 44.5 kg/cm^2 a$ を代入すると、試験結果と比較できる。

一方、SWAC - 11 による計算結果も得られている。これらの結果と、試験結果をまとめて下表に示す。

Table 4.2 W362 の解析解と試験結果の比較

	解 析 結 果			試験結果
	断熱流れ	等温流れ	SWAC - 11	
定常噴出率 (kg/sec)	0.20	0.19	0.22	0.19
定常スラスト力 (kg)	18.7	19.5	19.4	16
定常出口圧力 ($kg/cm^2 a$)	9.1	11.0	7.5	8.3

上表から分るように、解析値と測定値はほぼ一致し、断熱と等温の差も小さい。

4.6.2 非定常解との比較

SWAC - 11 による計算結果とスラスト力および圧力の測定結果との比較を Fig. 4.11, Fig. 4.12 に示す。これらの図から、ガス噴出試験で確認されたと同様に、SWAC - 11 の妥当性が検証された。

しかし、詳細には、単相流の場合、SWAC - 11 の計算結果は出口圧力を低めに推定している。

また、初期スラスト力ピーク値は、Fig. 4.6 に示したように、 $F/S \cdot P_0 = 1.0$ が成立している。

5. ま と め

蒸気発生器伝熱管破断時の水噴出率に関するデータを得るために、長い管路での高温・高圧水噴出試験を実施した。本試験は、大別すると(I)飽和水試験と(II)圧力一定条件試験とに分けられる。(I)は飽和水を使用し、圧力を20～120 kg/cm² aまでパラメータとした試験である。(II)はエンタルピーをパラメータとした試験であるが、主にサブクール水条件で行なった。この時の圧力は、ほぼ40 kg/cm² aである。

また、本研究では測定困難な水噴出率の過渡変化の代わりにスラスト力に注目したものであり、「ばね・質量」モデルを適用することで、極めて短時間のスラスト力の過渡変化データを測定できた。これらのデータは、現在までのところ世界中で発表例がないと思われる。

これらの試験結果は、SWAC-11と比較された。特に、定常時の物理量に対してはSWAC-11以外に、SWAC-11の均質流の仮定の妥当性をみるためにMoodyモデルと、また二相増倍係数の影響をみるためにHEM/Thomを使って、各モデルを比較すると同時に、測定結果と比較された。比較結果は本文中に詳細に記述されているが、主な結論を以下に示す。

I 飽和水試験

- (1) 定常時においてSWAC-11, Moodyモデル, HEM/Thomモデルを比較すると,
 - (i) 定常水噴出率, 定常スラスト力については, HEM/Thomモデルが測定結果と最もよく一致した。
 - (ii) Moodyモデルは水噴出率を高め, スラスト力を低めに予測する。
 - (iii) 定常時出口圧力は, SWAC-11とMoodyモデルが測定結果とよく一致した。
 - (iv) SWAC-11は, 全体を通して概略よく合っているが, 高圧領域では水噴出率, スラスト力を15～15%低く見積る。これは, 二相増倍係数にThomの相関を使用することで改善されよう。
- (2) 噴出開始から5 msec後頃の値を初期準定常値と定義し, スラスト力と圧力の測定結果とSWAC-11の計算結果を比較した。SWAC-11はほぼ妥当な結果を示しているが, 高圧領域でスラスト力と圧力を低めに予測することが分った。これも二相増倍係数によるものと推定される。
- (3) スラスト力, 圧力の過渡変化全体の計算結果と測定結果と比較すると, 計算結果は単調な変化を示しているのに対し, 測定結果はより複雑な波形であり, 完全には一致しなかった。これは, 熱力学的非平衡によるものと考えられる。また, 減圧波形にも不一致点が認められた。
- (4) 噴出直後のスラスト力は, Wave ForceとBlowdown Forceの合力Fであるが, そのF

と初期圧力 P_0 と断面積 S との関係は飽和水条件では $F/S \cdot P_0 > 1.0$ であり、データを包絡すると整理式としては、 $F/S \cdot P_0 = 1.36$ であった。

II 圧力一定条件試験

- (1) サブクール水条件での定常値について、SWAC - 11, Moody モデル, HEM/Thom モデル, HEM/Martinelli - Nelson (M-N) モデルで解析し比較した。
 - (i) SWAC - 11 は、サブクール度が大きくなると計算上の不安定が生じ、定常に達する前に計算がストップした。そのため、SWAC - 11 と同じ流動モデルである HEM/M-N モデルによる計算を行なった。
 - (ii) 定常水噴出率に関しては、各モデル間でほとんど差がなく、いずれも測定結果とほぼ一致した。
 - (iii) 定常スラスト力に関しては、HEM/Thom, HEM/M-N のモデルが測定結果とよく一致した。
 - (iv) 従って、SWAC - 11 の流動モデルは、計算の不安定を改良すれば、サブクール水に関しても適用できる。
- (2) 初期準定常値に関して、スラスト力と圧力の測定結果と SWAC - 11 の計算結果を比較した。いずれの測定値もばらつきが大きかったが、SWAC - 11 とほぼ一致した。
- (3) スラスト力、圧力の過渡変化全体の計算結果と測定結果と比較すると、スラスト力に関しては初期準定常値以降、圧力に関しては減圧波形の伝播特性に不一致点が認められた。
- (4) 過熱蒸気による試験結果は、定常値および非定常値ともに計算値と測定値は一致する。これは、ガス噴出試験と同様な結論であった。

6. 謝 辞

本試験装置の組立，試験準備，試験の実施，データの再生は，蒸気発生器安全性試験室の試験グループ員の佐々木和一氏，渡辺智夫氏，川部浩康氏，および東興機械工業(株)派遣作業員の手で行なわれた。実施に際して，上記の人々が創意に富んだ提案をしてくれたことに対し，深く感謝します。

また，本試験の実施にあたり御指導，御協力をいただいた堀雅夫蒸気発生器開発部長，高速増殖炉開発本部大後美道副主任研究員，実験プロジェクトグループ各位に心から感謝の意を表します。

7. 参 考 文 献

- (1) Pradip Saha, " A Review of Two-Phase Steam-Water Critical Flow Models with Emphasis on Thermal Nonequilibrium, " BNL-NUREG-50907, 1978
- (2) H. Fauske, " Contribution to the Theory of Two-Phase, One-Component Critical Flow, " ANL-6633, 1962
- (3) F. J. Moody, " Maximum Flow Rate of a Single Component, Two-Phase Mixture, " Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, Vol. 87, 1965
- (4) R. E. Henry, " Calculational Techniques for Two-Phase Critical Flow, " Proceedings of the Japan-US Seminar on Two-Phase Flow Dynamics (Japan), 1979
- (5) C. W. Hirt, N. C. Romeo, " Application of a Drift-Flux Model to Flashing in Straight Pipes, " Los Alamos Scientific Laboratory, LA-6005-MS, 1975
- (6) W. C. Rivard, M. D. Torrey, " Numerical Calculation of Flashing from Long Pipes Using a Two-Field Model " Los Alamos Scientific Laboratory, LA-6104-MS, 1975
- (7) 広井博, 三宅収, 佐藤稔「ガス噴出試験による SWACS 水噴出率計算モジュールの検証——LMFBR 蒸気発生器伝熱管破断時の水噴出率に関する試験研究(第1報)——」
PNC SN941 81-194 1981年10月
- (8) 日本機械学会, 蒸気表, 1968
- (9) 渡辺収, 三宅収, 進藤嘉久, 佐藤稔, 「大リーク・ナトリウム-水反応解析コード SWACS/REG3 水噴出率計算モジュール SWAC-11 の説明と適用性の検討——大リーク・ナトリウム-水反応解析(第9報)——」 PNC SN952 80-03 (1980. 6)
- (10) 三宅収, 広井博, 佐藤稔, 「SWACS 水噴出率計算モジュール(SWAC-11)の改造——LMFBR 蒸気発生器伝熱管破断時の水噴出率に関する試験研究(第3報)——」近刊
- (11) F. J. Moody, " Maximum Two-Phase Vessel Blowdown from Pipes, " APED-4827 (1965)
- (12) 赤川浩爾, 「気液二相流」コロナ社(昭49)
- (13) 日本機械学会, 「Na加熱大型蒸気発生器の水漏洩対策調査研究〔2〕」, SJ254 79-01, 1979年3月
- (14) J. R. S. Thom, " Prediction of Pressure Drop during Forced Circulation Boiling of Water, " Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 7, 1964
- (15) R. T. Lahey, F. J. Moody, "The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor," American Nuclear Society p 236 Fig. 5-18
- (16) F. J. Moody, "Time-Dependent Pipe Forces Cause by Blowdown and Flow Stoppage,"

Transactions of the ASME, Sep., 1973

- (17) A. R. Edwards, T. P. O'Brien, "Studies of Phenomena connected with the Depressurization of Water Reactors," J.Br. Nucl. Energy Soc., Vol.9 (Apr. 1970)

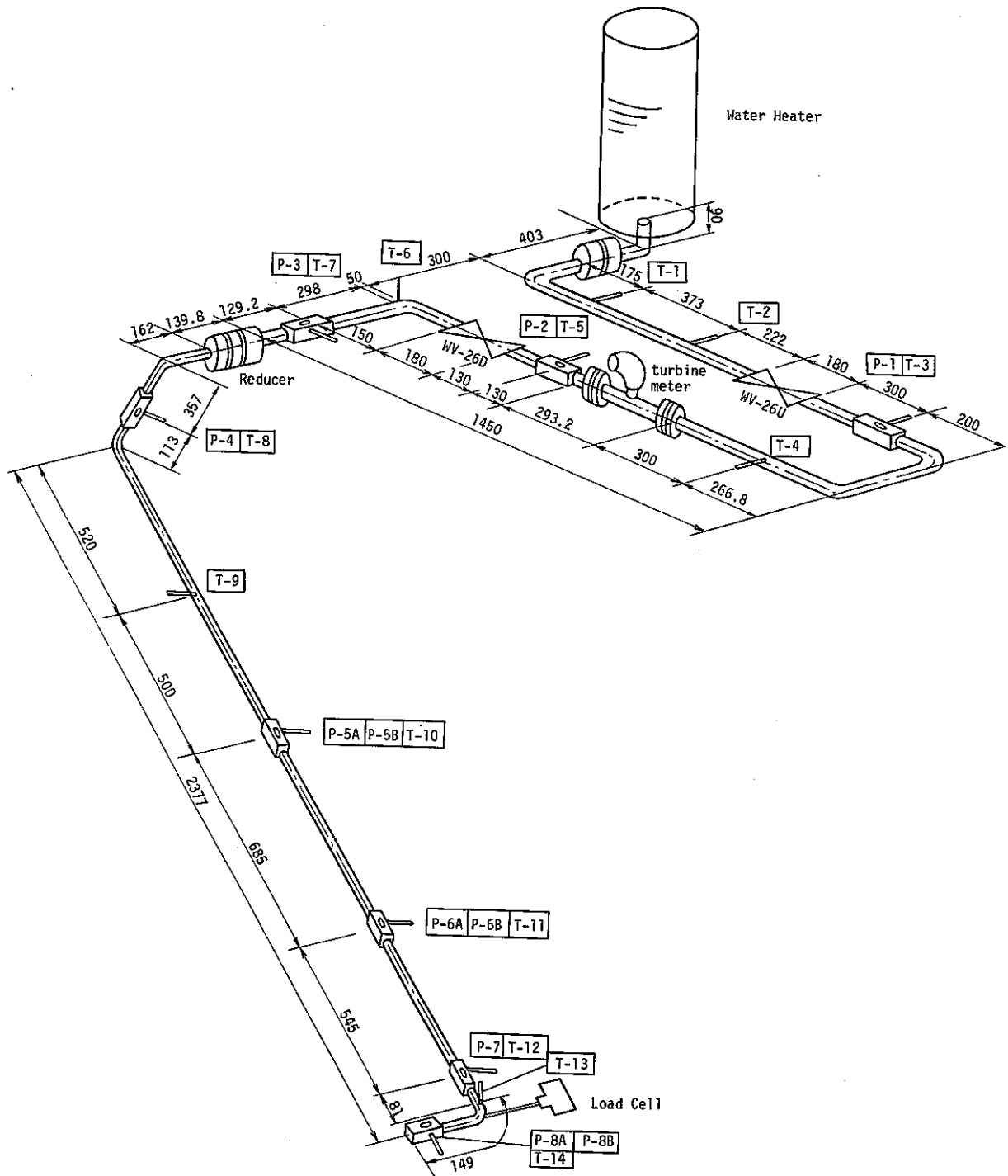


Fig. 2.1 Dimension of Test Apparatus and Instrument Location

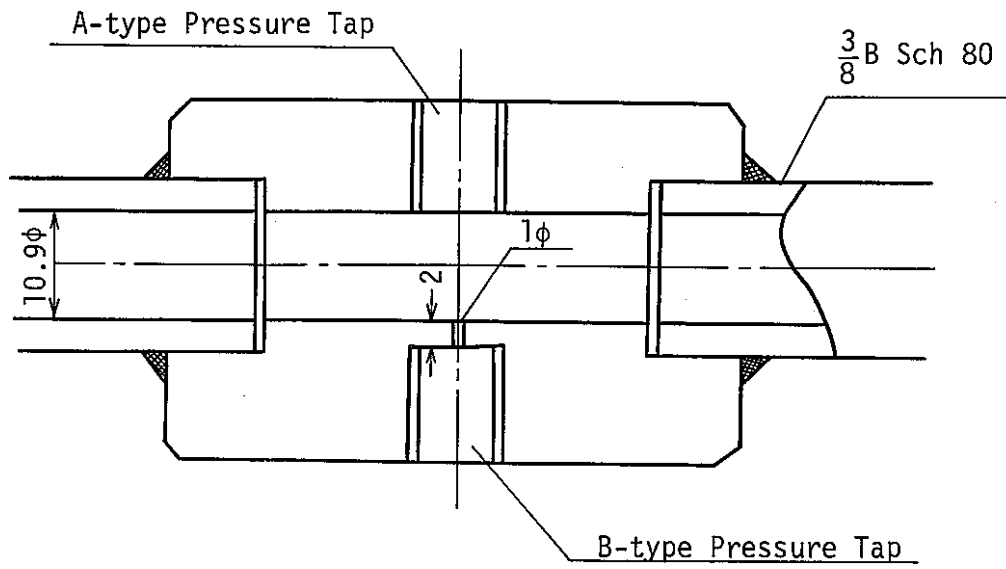


Fig. 2.2a Two Types of the Pressure Tap

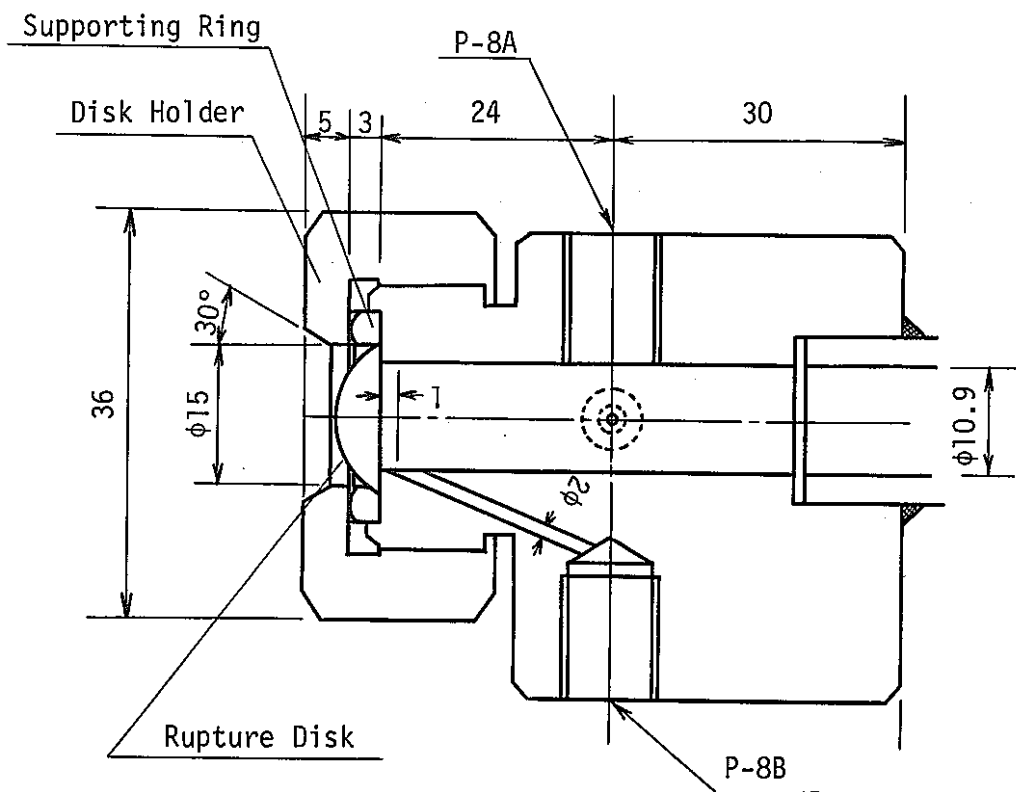


Fig. 2.2b Detail of the Pipe End

Table 2.1 Conditions and Major Results of Saturated Water Blowdown Tests

Item Unit Test No.	Test Date	Water Heater Condition		Rupture Disk		Total Quantity of Water kg	Blowdown Duration sec	Steady Flow Rate		Thrust Force			Description
		Temperature	Pressure	Design Pressure	Bursting Method			Average	by Turbine	Initial Peak	Initial Quasi-steady	Steady	
		Initial After Test °C	Initial After Test kg/cm ² a	kg/cm ² d	—			kg/sec	kg/sec	kg	kg	kg	
W211	7/7	217 218	21.0 21.0	25	spear	1.16	2.08	0.56	— ⁽¹⁾	— ⁽²⁾	— ⁽²⁾	11.5~12.5	(1) failed to measure. (2) The Rupture Disk (R/D) abnormally burst.
W212	7/8	217 217	20.5 20.0	25	spear	1.05	2.30	0.46	— ⁽¹⁾	26.5	20~23	9~10.5	
W221	7/8	254 253	41.0 40.5	50	spear	1.72	2.38	0.72	— ⁽¹⁾	50	36~42	20~23	
W222	9/18	254 249	41.0 38.0	50	modified spear	8.47	10.6	0.80	— ⁽¹⁾	— ⁽³⁾	— ⁽³⁾	18	(3) failed to measure because of the bursting method of the R/D.
W223	11/25	255 253	46.0 45.0	50	arc	2.10	2.84	0.74	0.88	36~40	33~43	21	
W231	7/11	277 276	60.0 59.5	75	spear	2.48	2.18	1.14	1.12	68	54~57	29	
W232	11/18	276 269	61.0 55.0	75	arc	8.11	8.05	1.01 ⁽⁴⁾	— ⁽¹⁾	38~42 ⁽⁴⁾	45~59 ⁽⁴⁾	30 ⁽⁴⁾	(4) The R/D tore open about 70%.
W233	11/19	276 271	61.0 56.0	75	arc	7.86	7.50	1.05	1.00~1.01	41~44	44~54	38	
W241	7/24	296 295	80.0 79.0	100	modified spear	4.44	3.64	1.22	1.31~1.32	— ⁽³⁾	— ⁽³⁾	40	
W242	9/19	296 287	81.0 71.0	100	modified spear	10.42	8.60	1.21	1.16~1.27	— ⁽³⁾	— ⁽³⁾	52	
W244	11/14	296 287	81.0 73.5	100	arc	8.58	6.97	1.23	1.22~1.35	93~104	71~81	54	
W251	7/25	326 318	121 111	150	modified spear	5.15	3.55	1.45	1.57~1.61	— ⁽³⁾	— ⁽³⁾	60	
W252	11/17	325 317	121 109	150	arc	8.61	5.66	1.52	1.52~1.57	120~131	108~116	74~77	

Table 2.2 Conditions and Major Results of Constant Pressure Water Blowdown Tests

Item Unit Test No.	Test Date	Water Heater Condition		Rupture Disk		Total Quantity of Water kg	Blowdown Duration sec	Steady Flow Rate		Thrust Force			Description
		Temperature	Pressure	Design Pressure	Bursting Method			Average	by Turbine	Initial Peak	Initial Quasi-steady	Steady	
		Initial After Test °C	Initial After Test kg/cm ² a	kg/cm ² d	—			kg/sec	kg/sec	kg	kg	kg	
W311	8/30	151 151	41.0 31.0	50	modified spear	4.71	3.85	1.22 ⁽¹⁾	— ⁽¹⁾	— ⁽¹⁾	— ⁽¹⁾	— ⁽¹⁾	(1) The R/D tore open about 30%.
W312	9/22	151 150	41.0 25.0	↑	modified spear	9.35	7.00	1.34 ⁽¹⁾	— ⁽¹⁾	— ⁽¹⁾	— ⁽¹⁾	— ⁽¹⁾	
W321	9/10	201 201	41.0 34.0		modified spear	2.87	2.01	1.43	1.19~1.44	— ⁽²⁾	— ⁽²⁾	16~17.5	(2) failed to measure because of the bursting method of the R/D.
W322	9/21	220 218	41.0 32.5		modified spear	6.61	7.32	0.90	0.78~1.11	— ⁽²⁾	— ⁽²⁾	30	
W323	11/20	201 205	42.0 36.0		arc	4.40	2.72	1.62	1.18~1.44	14 ⁽³⁾	14~25 ⁽³⁾	22.5~25	(3) The R/D abnormally burst.
W324	11/21	208 208	46.0 38.5		arc	— ⁽⁴⁾	2.85	— ⁽⁴⁾	1.18~1.55	23	24~29	27	(4) failed to measure.
W325	11/25	207 206	46.5 38.0		arc	4.82	3.11	1.55	1.09~1.56	12.5	12~13	24	
W331	9/11	241 241	40.0 38.5		modified spear	1.64	2.06	0.80	0.76~0.99	— ⁽²⁾	— ⁽²⁾	25	
W332	11/21	247 246	46.0 42.0		arc	2.46	2.90	0.85	0.79~1.02	25	24~26	33~36	
W341	8/29	287 286	71.0 68.5		natural burst	3.39	3.06	1.11	1.19~1.20	36~41 ⁽⁶⁾	23~26 ⁽⁶⁾	41 ⁽⁵⁾	(5) These data are for the saturate water of 71.0 ata.
W342	9/20	287 279	71.0 63.5		natural burst	9.98	9.07	1.10 ⁽⁵⁾	1.14~1.16 ⁽⁵⁾	43~47 ⁽⁶⁾	26 ⁽⁶⁾	43 ⁽⁵⁾	(6) The exact bursting pressure was unknown.
W351	8/27	326 322	121 115		natural burst	4.58	3.11	1.47 ⁽⁷⁾	1.57~1.63 ⁽⁷⁾	25~34 ⁽⁶⁾	18~20 ⁽⁶⁾	58~59 ⁽⁷⁾	(7) These data are for the saturated water of 121 ata.
W361	9/13	348 340	36.5 17.5	↓	modified spear	— ⁽⁸⁾	3.38	— ⁽⁸⁾	— ⁽⁸⁾	— ⁽¹⁾	— ⁽¹⁾	14	(8) not measured.
W362	11/22	312 308	44.5 23.0	50	arc	— ⁽⁸⁾	3.16	0.19 ⁽⁹⁾	— ⁽⁸⁾	39~42	16~22	16	(9) estimated by the pressure decrease of water heater.

Table 2.3 Initial Temperature Distributions of Saturated Water Blowdown Tests

Tag No. Test No.		Unit : °C													
		T-WH	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8	T-9	T-10	T-11	T-12	T-13
W211	217	203	206	197	210	213	218	219	219	209	197	203	205	209	199
W212	217	211	217	216	219	217	239	217	218	218	217	214	217	217	219
W221	254	245	252	253	256	251	273	255	255	269	247	245	251		251
W222	254	245	254	255	256	254	255	256	255	255	248	245	253	257	257
W223	255	248	258	259	256	258	259	259	259	253	255	251		253	259
W231	277	267	275	276	278	276	277	278	276	278	275	272	276	279	277
W232	276	264	274	263	272	272	279	276	274	276	270	273	266	271	276
W233	276	264	273	265	275	274	285	275	275	277	276	273	264	269	275
W241	296	274	292	295	297	291	309	297	307	303	297	289	306	299	263
W242	296	285	294	297	302	296	313	298	309	299	297	292	297	304	298
W244	296	284	293	296	299	296	315	296	294	296	290	293	292	298	298
W251	326														
W252	325	311	320	320	325	318	327	325	325	329	326	317	317	323	327

Table 2.4 Initial Temperature Distributions of Pressure Constant Water Blowdown Tests

Unit : °C

Tag No. Test No.	T-WH	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8	T-9	T-10	T-11	T-12	T-13	T-14
W311	151	151	155	146	155	146	161	166	150	152	126	152	154	156	152
W312	151	150	153	148	157	154	151	155	153	147	159	154	152	154	148
W321	201	195	200	196	207	194	209	216	204	204	172	202	198	201	196
W322	220	218	123	215	225	216	228	238	222	218	220	218	217	221	216
W323	201	195	202	194	203	196	210	218	202	192	210	198	197	202	202
W324	208	204	210	198	208	203	202	211	210	210	217	210	210	214	213
W325	207	203	209	200	205	203	207	213	204	207	215	202		201	205
W331	241	236	242	229	241	231	252	249	241	247	220	238	238	242	239
W332	247	244	252	235	244	236	248	252	248	240	246	238	241	246	249
W341	287	276	286	289	290	280	202	255	291	291	253	249	269	275	277
W342	287	276	286	289	290	276	311	230	278	313	208	282	301	324	285
W351	326	314	320	326	329	314	346	282	333	336	148	184	302	432	292
W361	348														
W362	312	317	313	275	335	255	257	318	309	310	273	308		312	307

RUN-W223

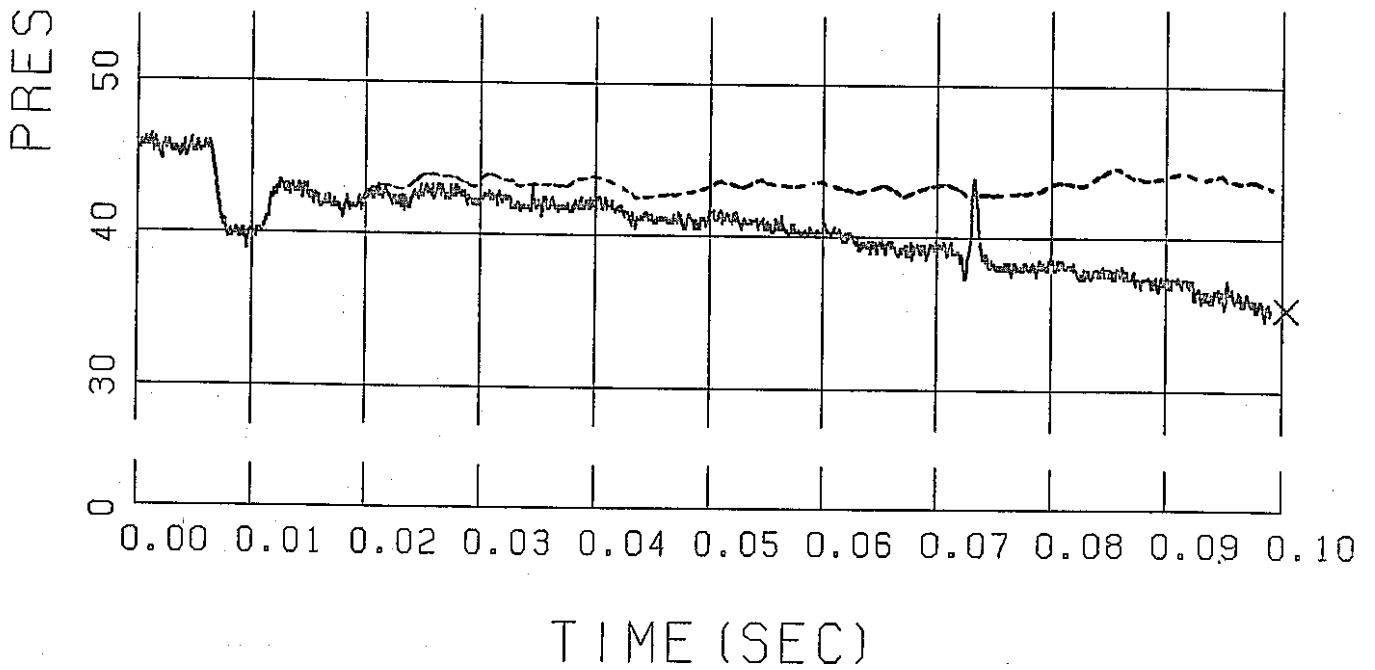
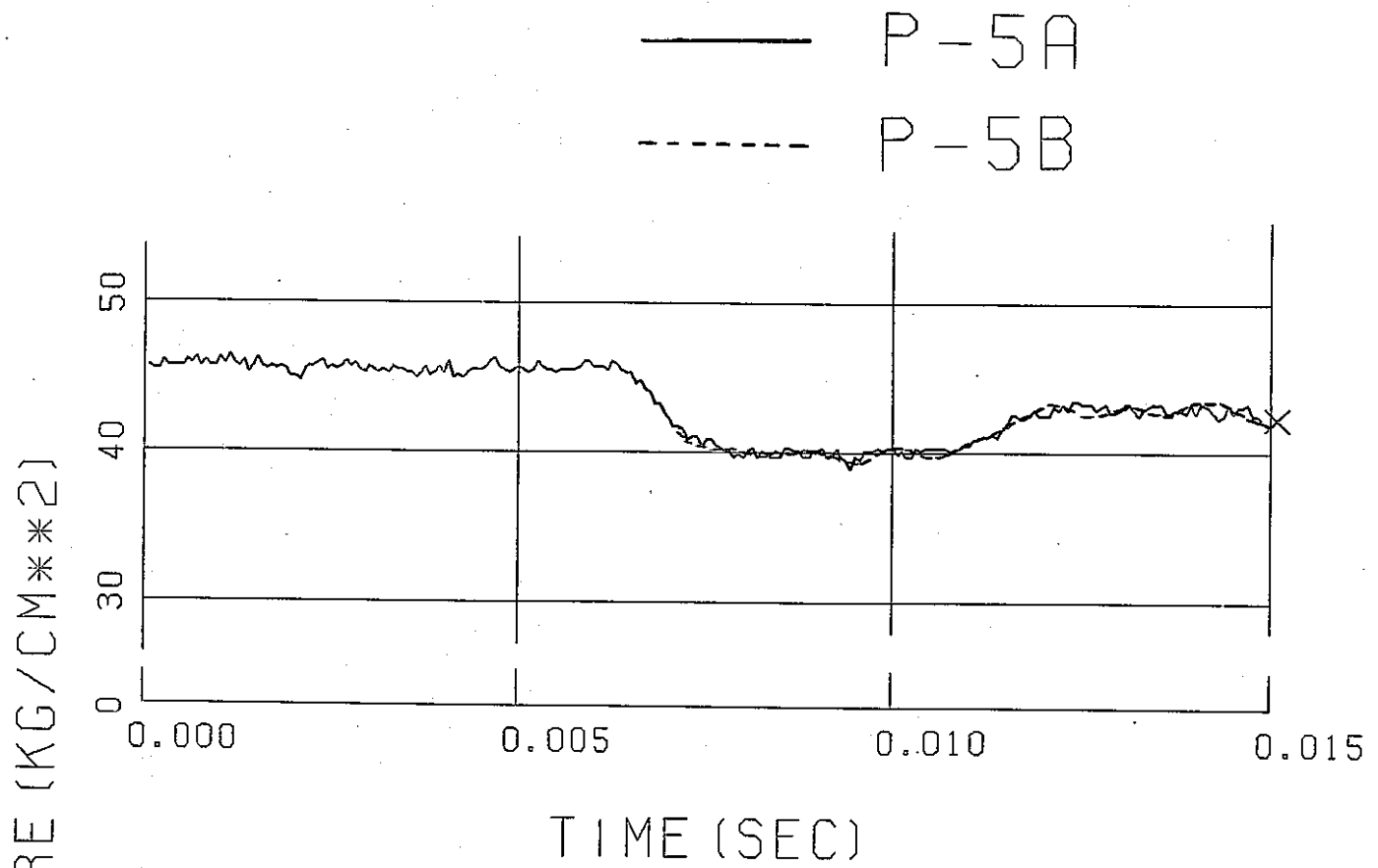


Fig. 2.3 Comparison of Pressure Data Measured by Different Pressure Taps (W223, P-5)

P-6A RUN-W223

P-6B

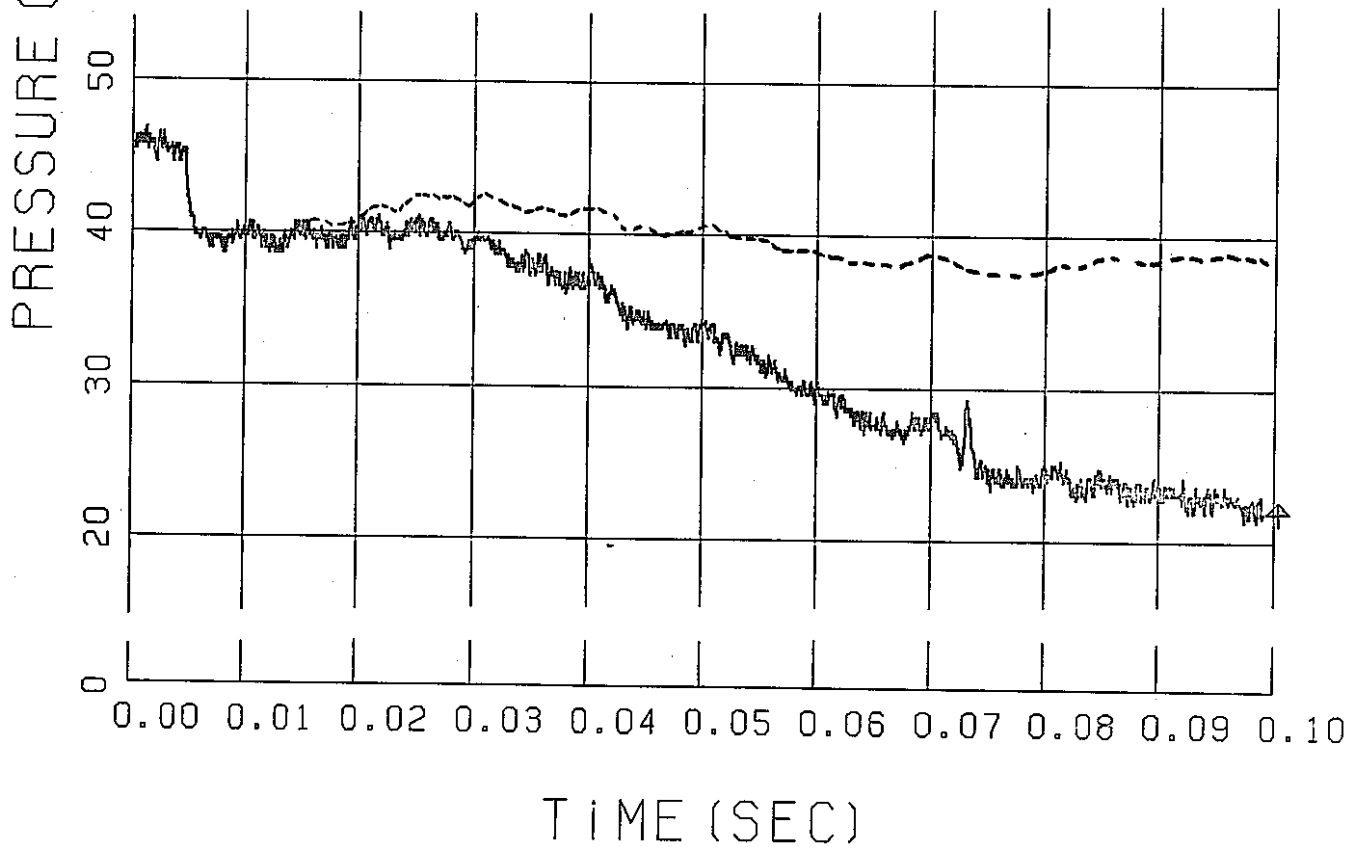
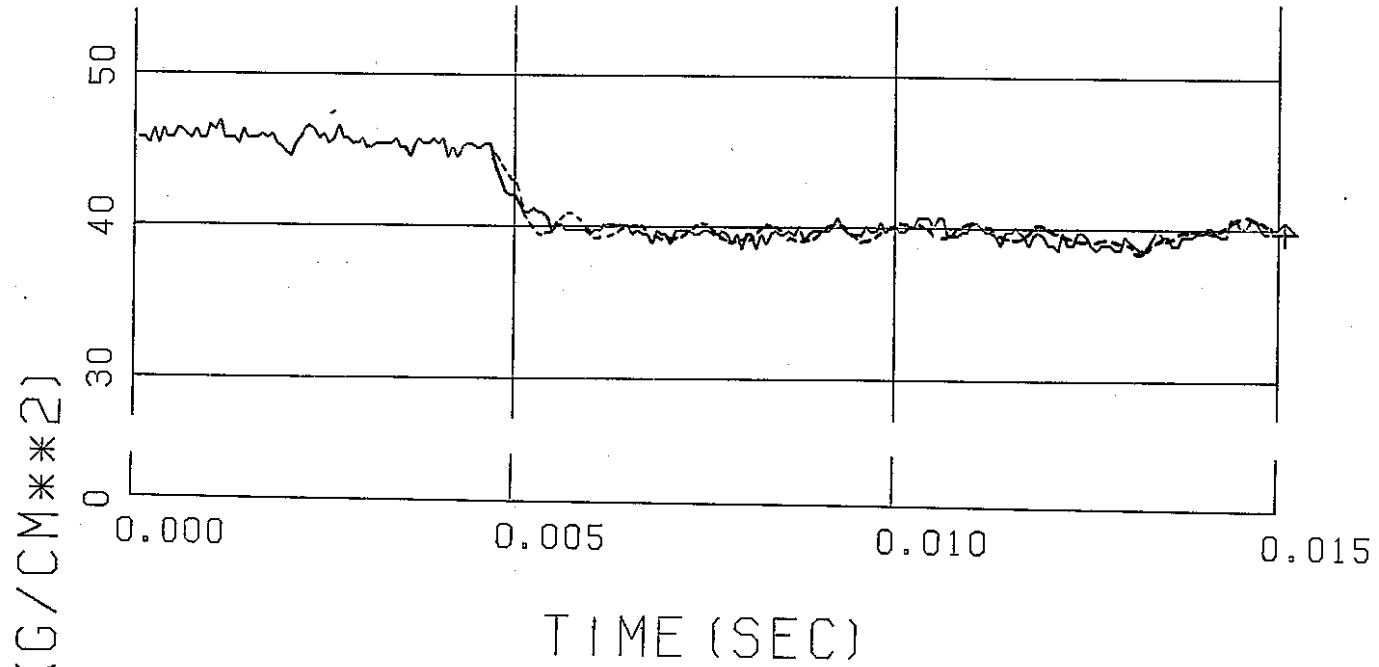


Fig. 2.4 Comparison of Pressure Data Measured by Different Pressure Taps (W223, P-6)

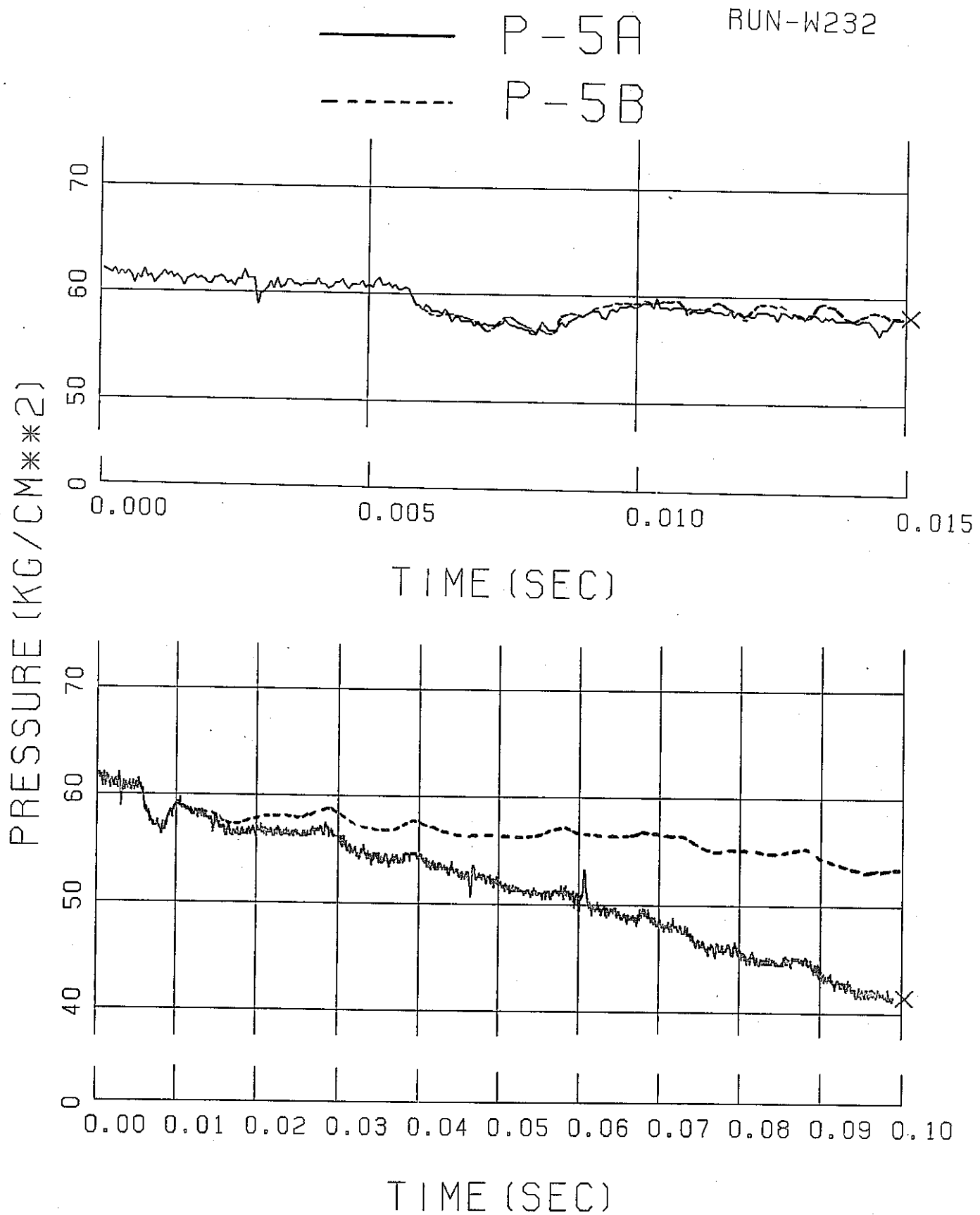


Fig. 2.5 Comparison of Pressure Data Measured by Different Pressure Taps (W232, P-5)

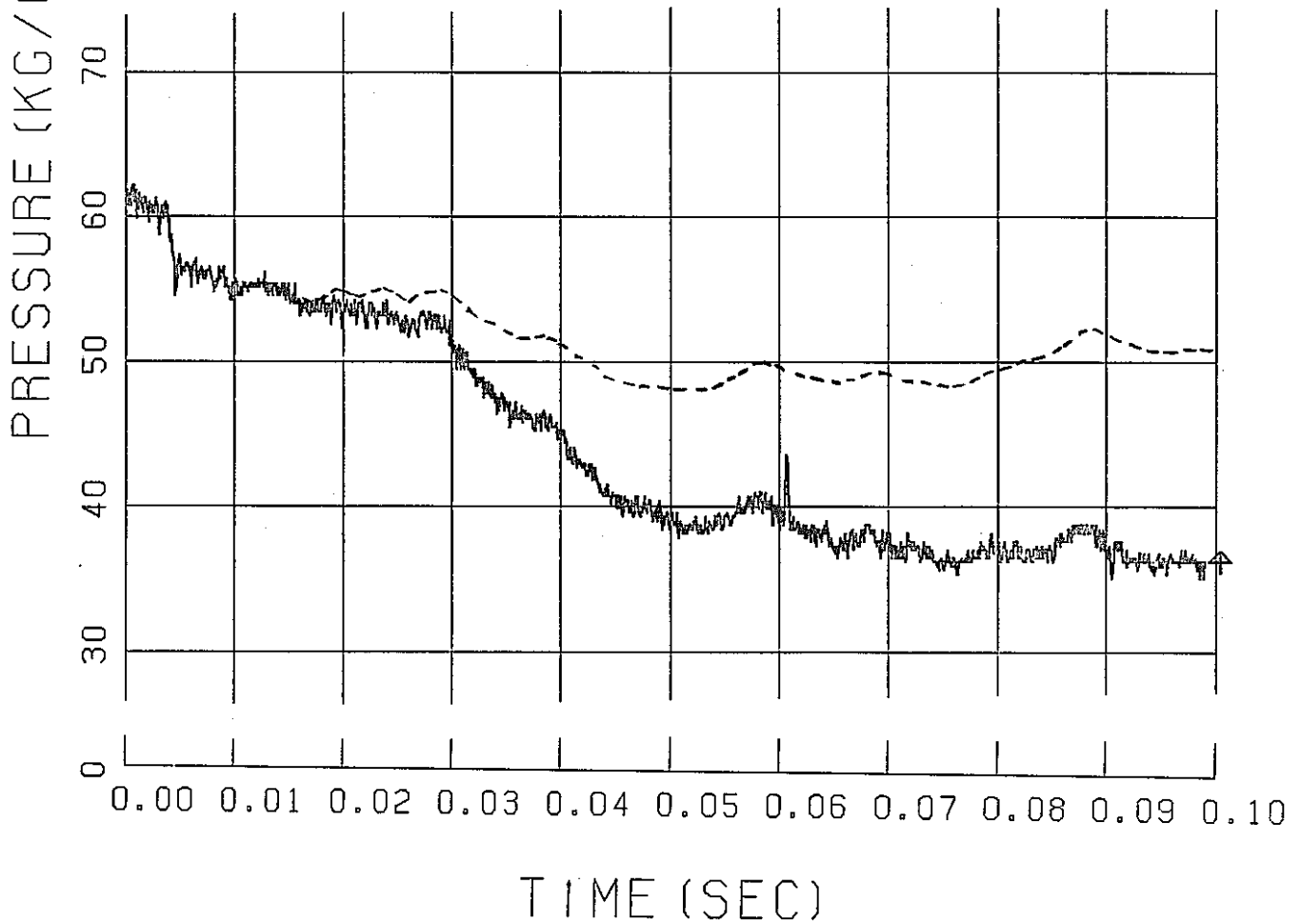
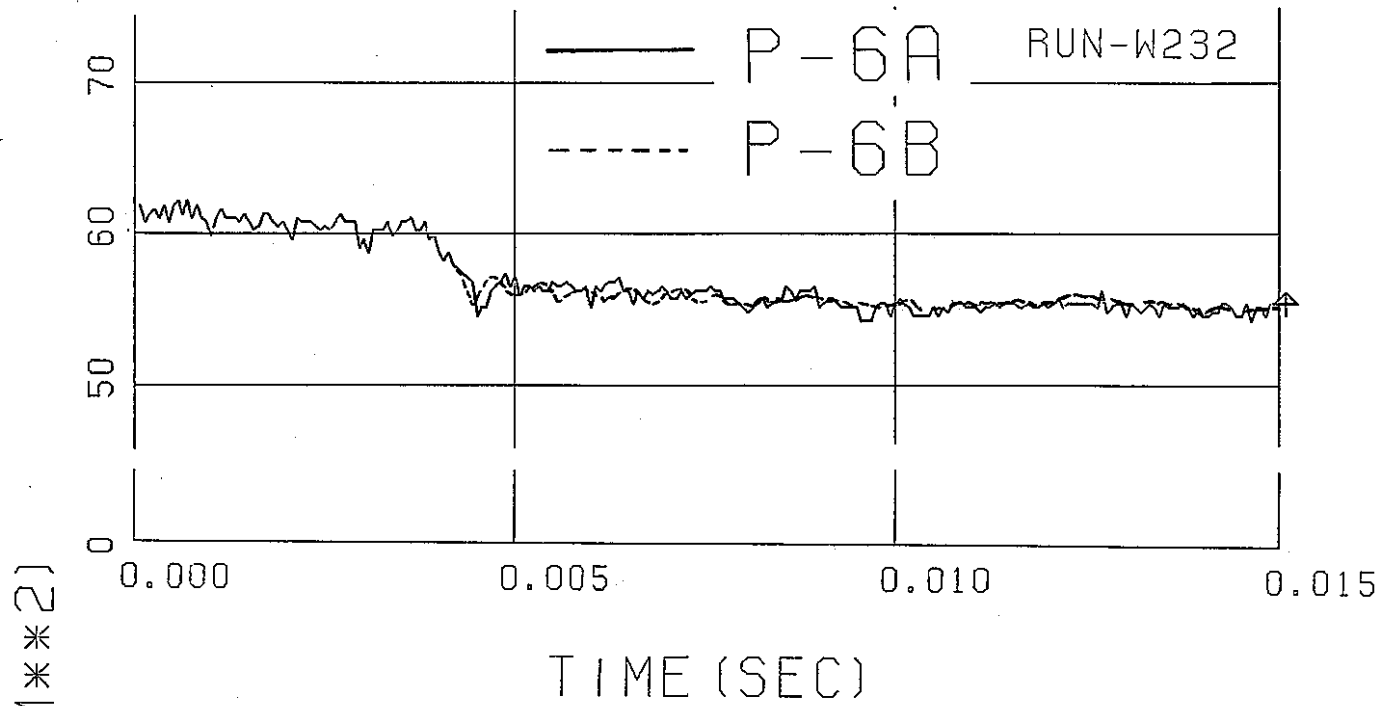


Fig. 2.6 Comparison of Pressure Data Measured by Different Pressure Taps (W232, P-6)

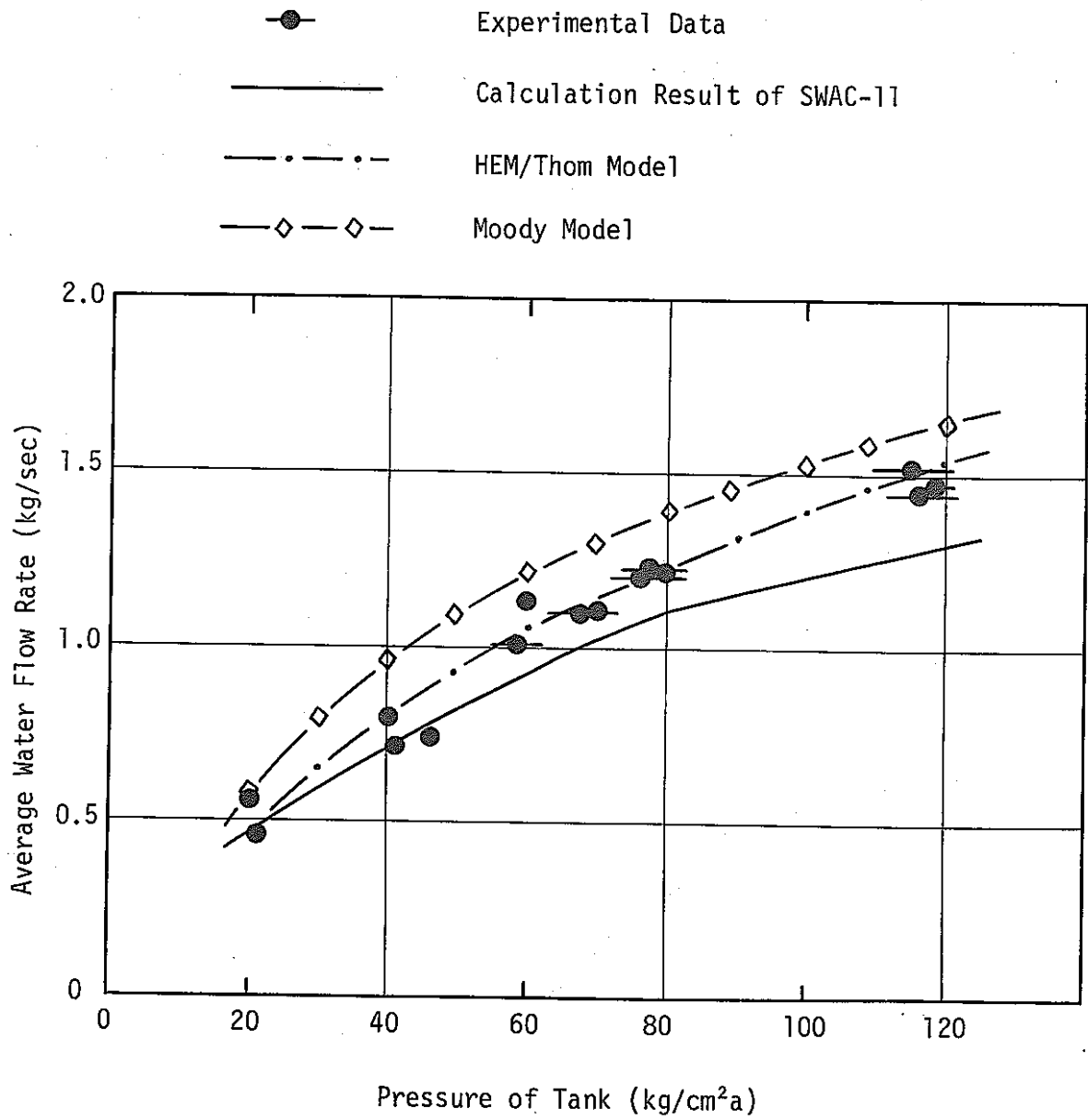


Fig. 3.1 Comparison of Average Water Flow Rates and Calculation Results

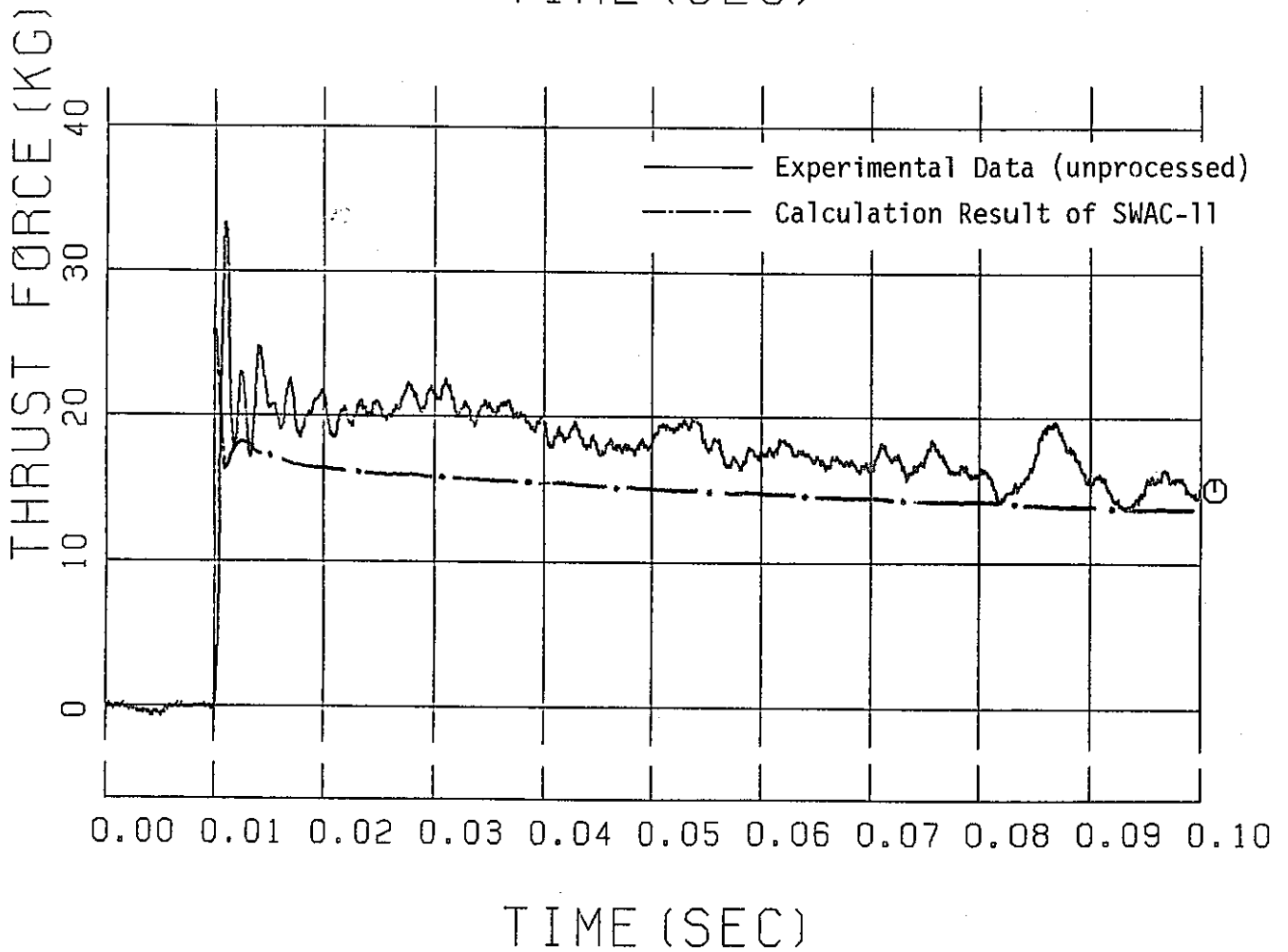
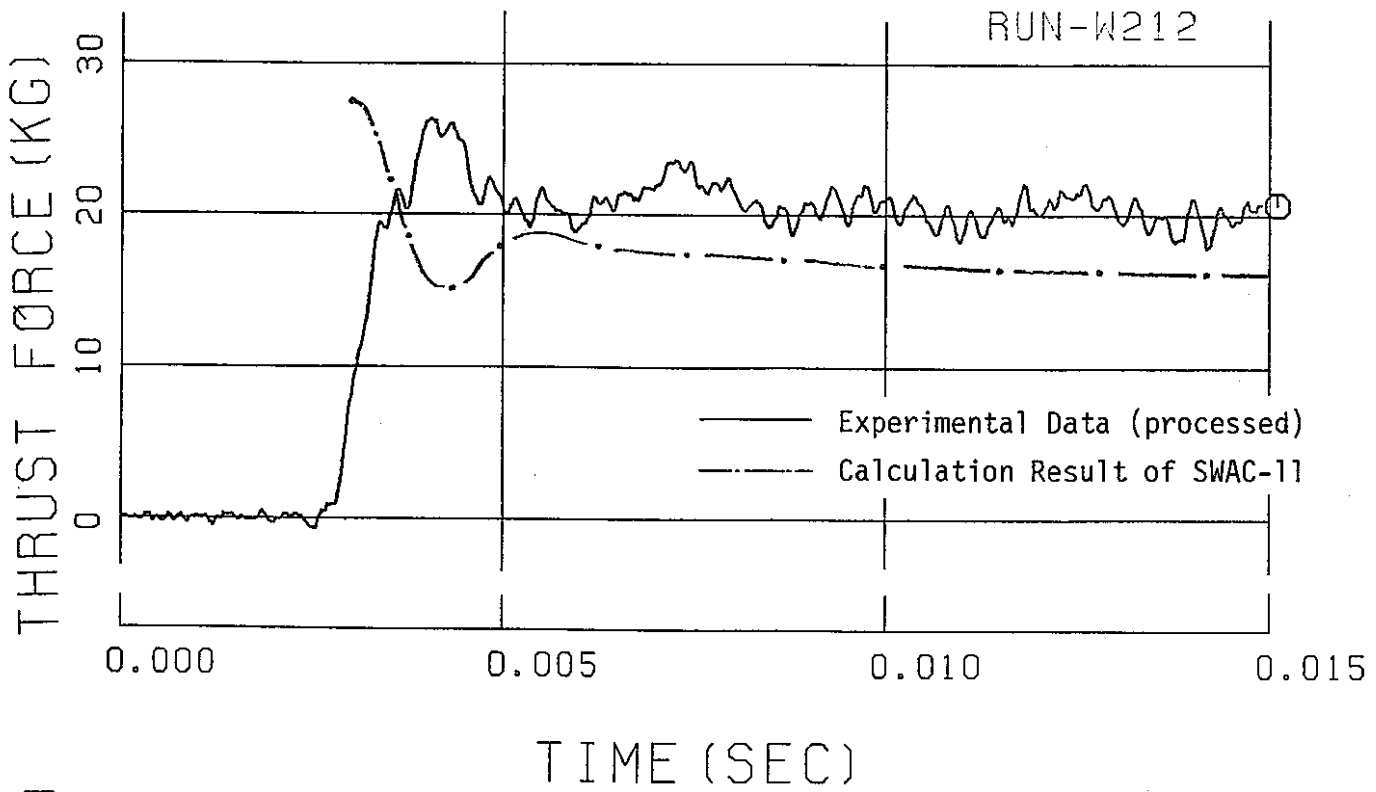


Fig. 3.2 Comparison of Thrust Force Transient in W212

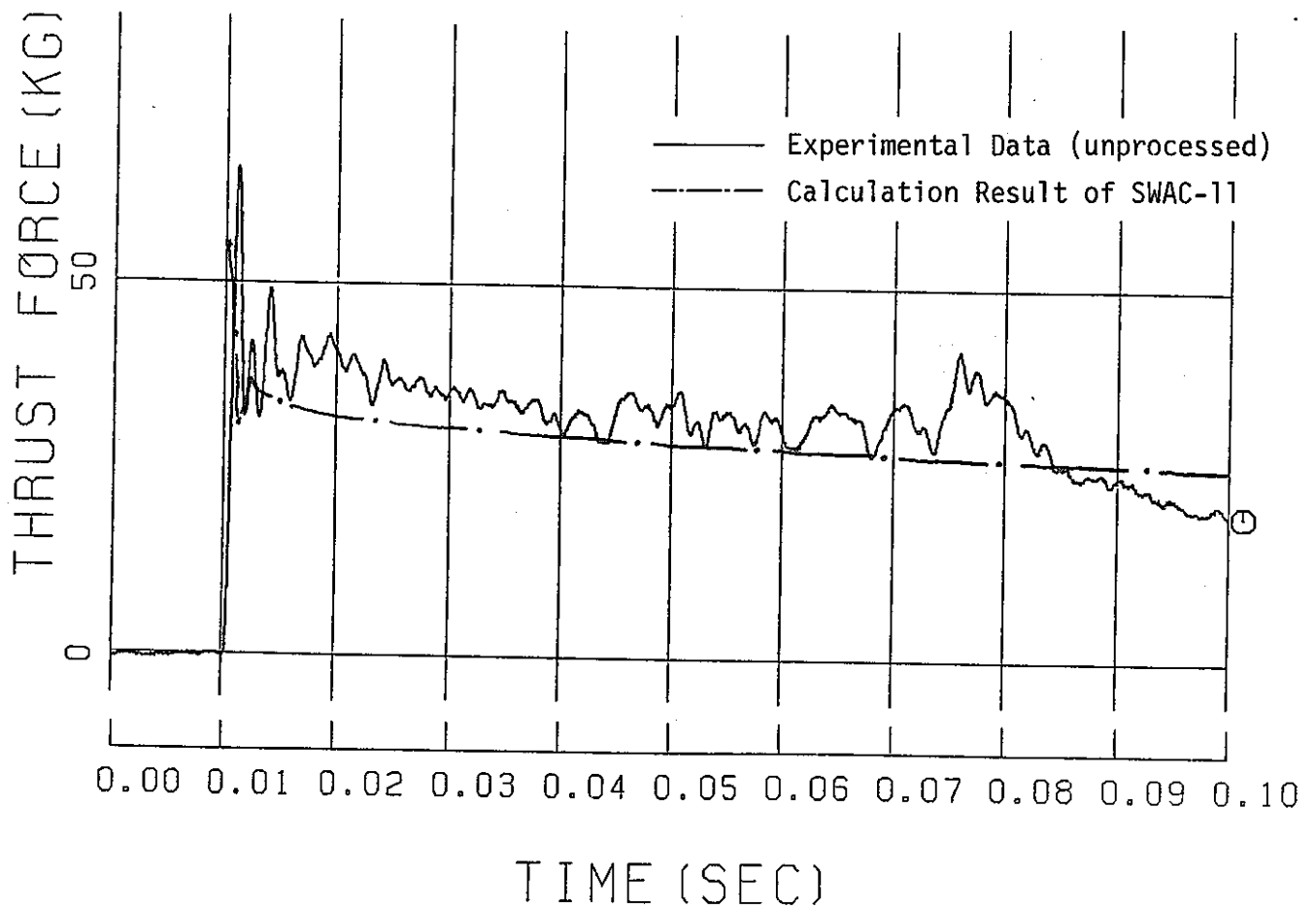
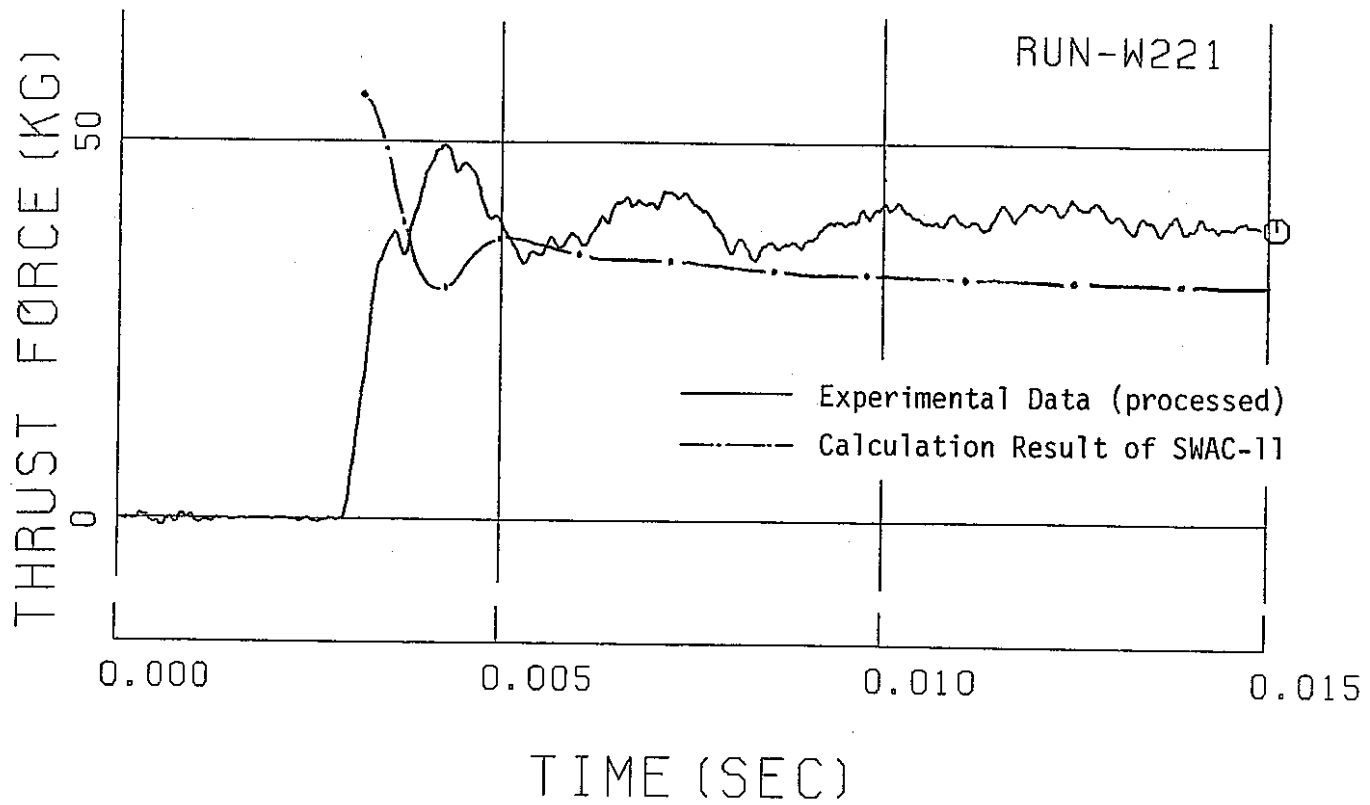


Fig. 3.3 Comparison of Thrust Force Transient in W221

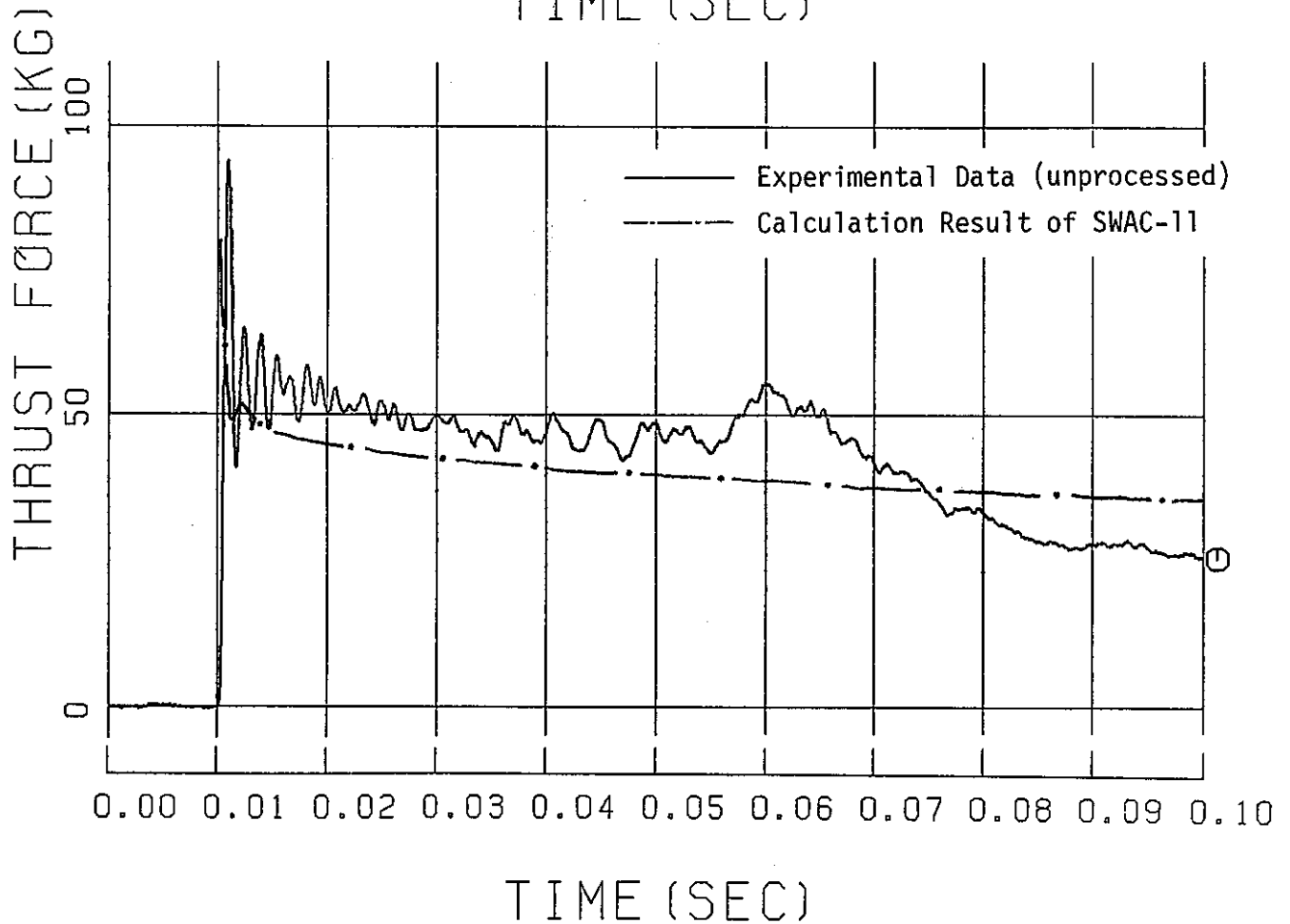
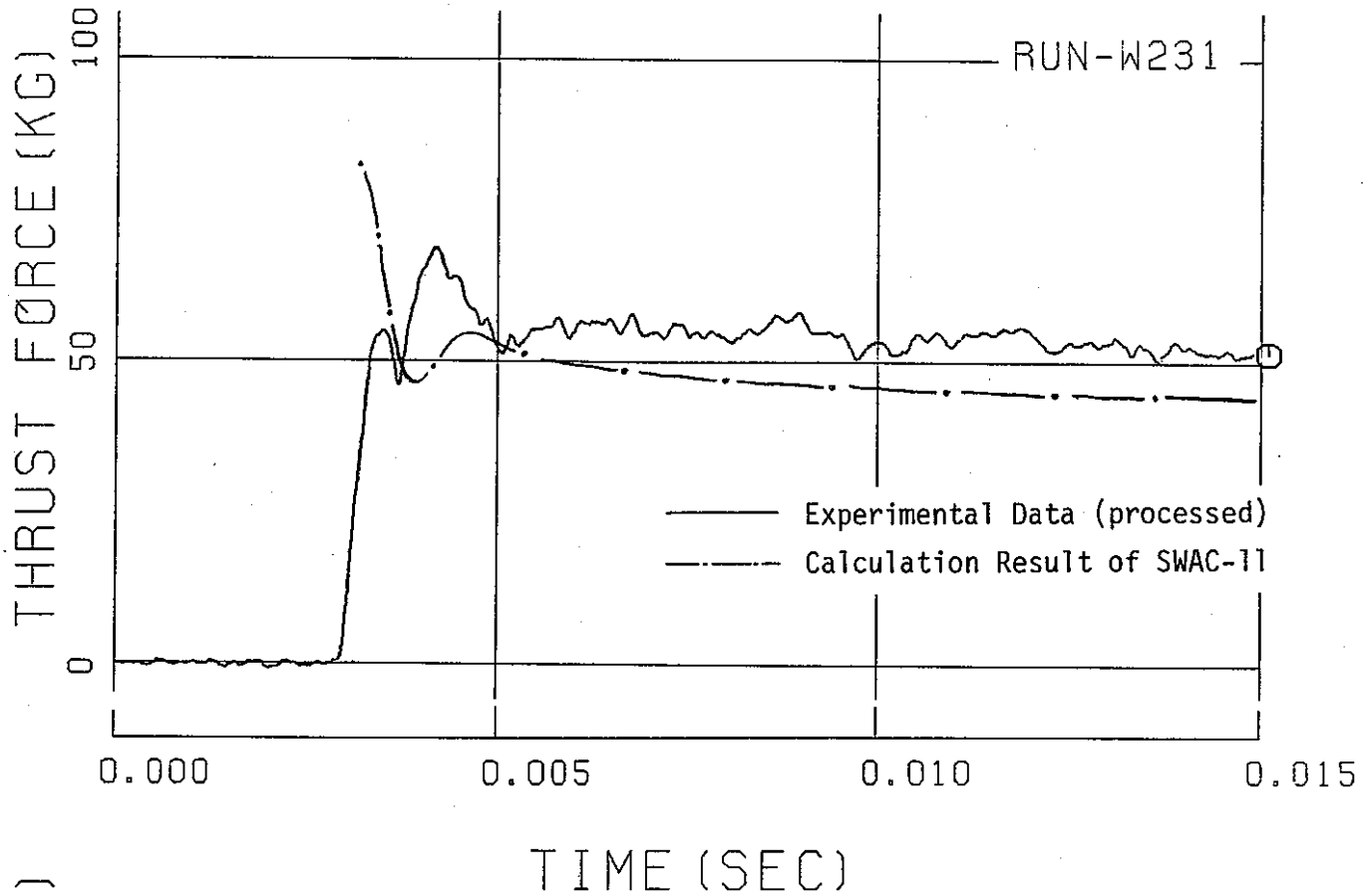


Fig. 3.4 Comparison of Thrust Force Transient in W231

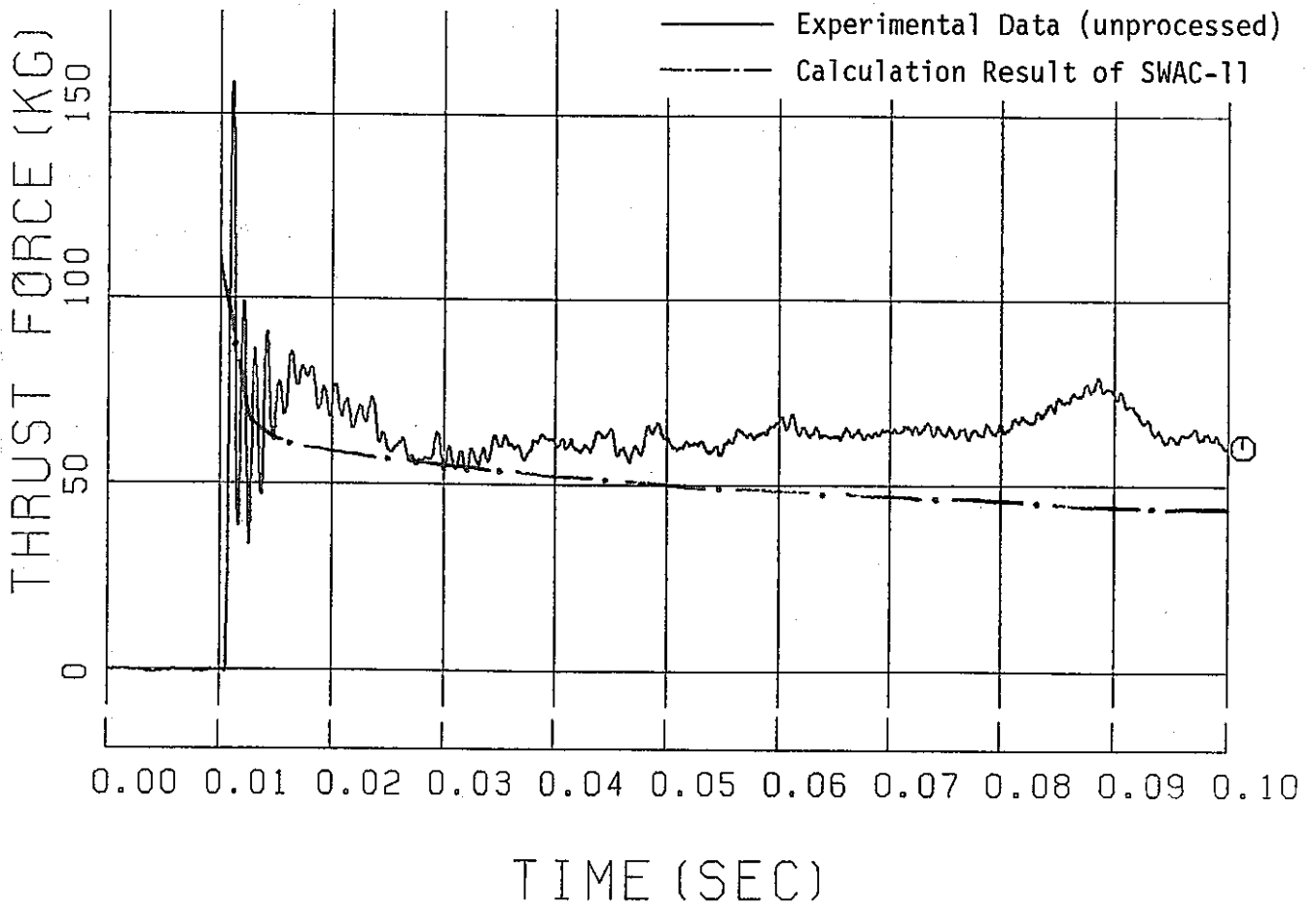
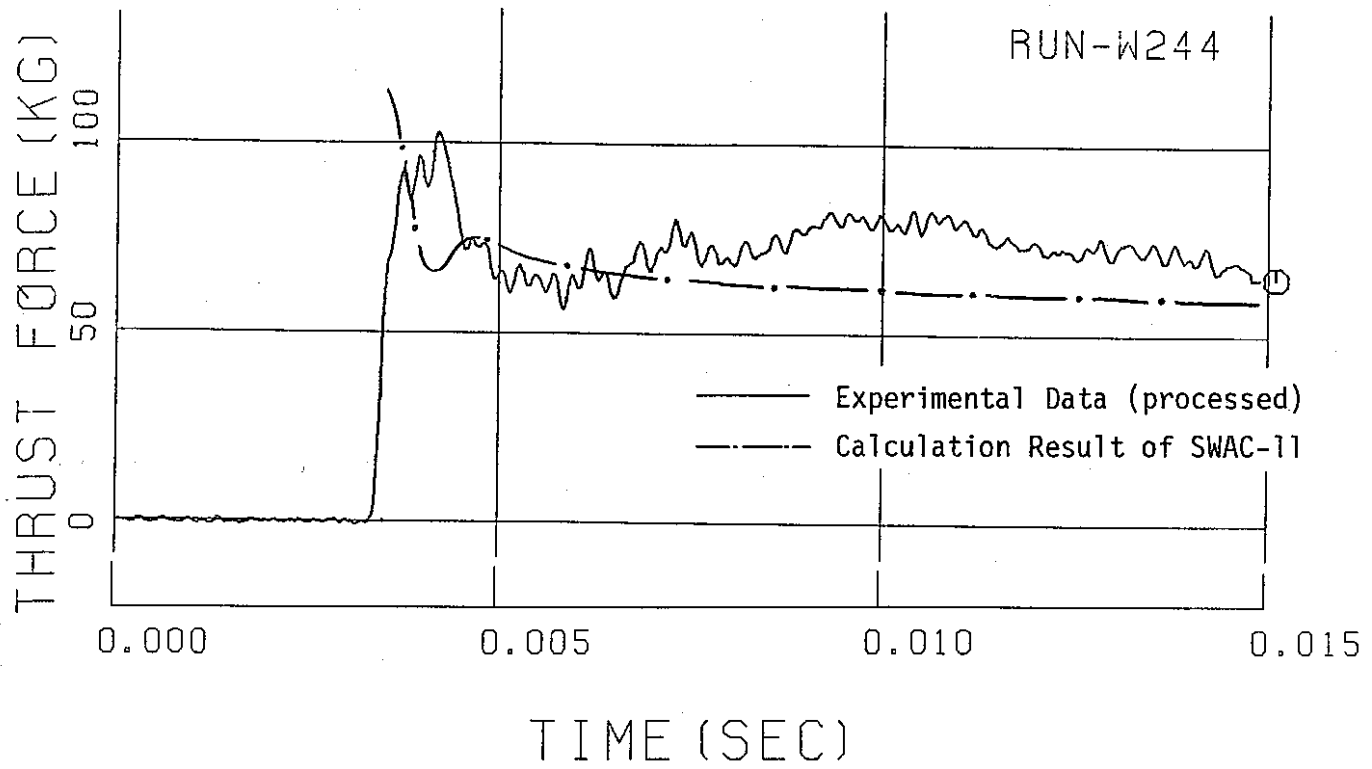


Fig. 3.5(1) Comparison of Thrust Force Transient in W244

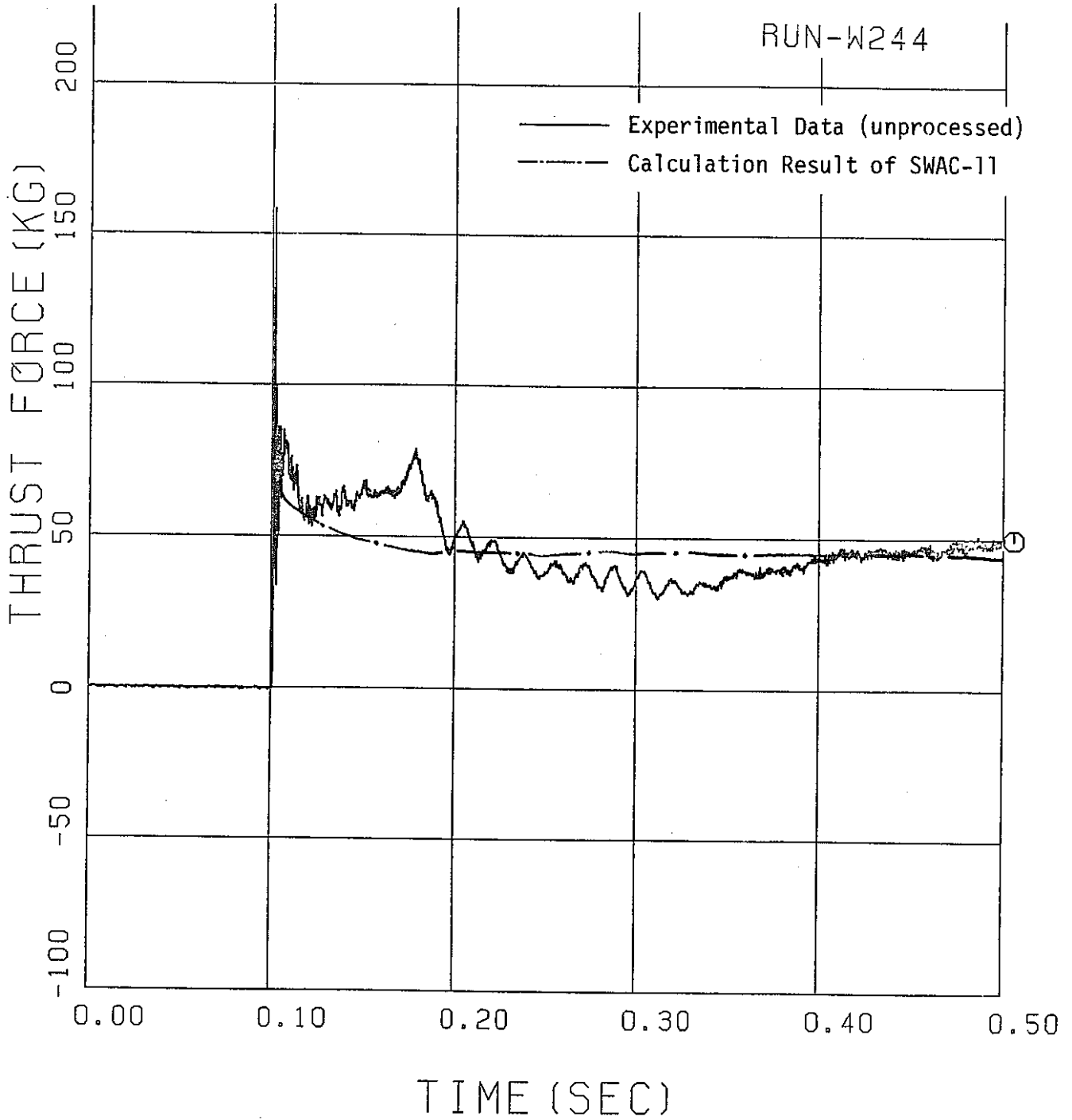


Fig. 3.5(2) Comparison of Thrust Force Transient in W244

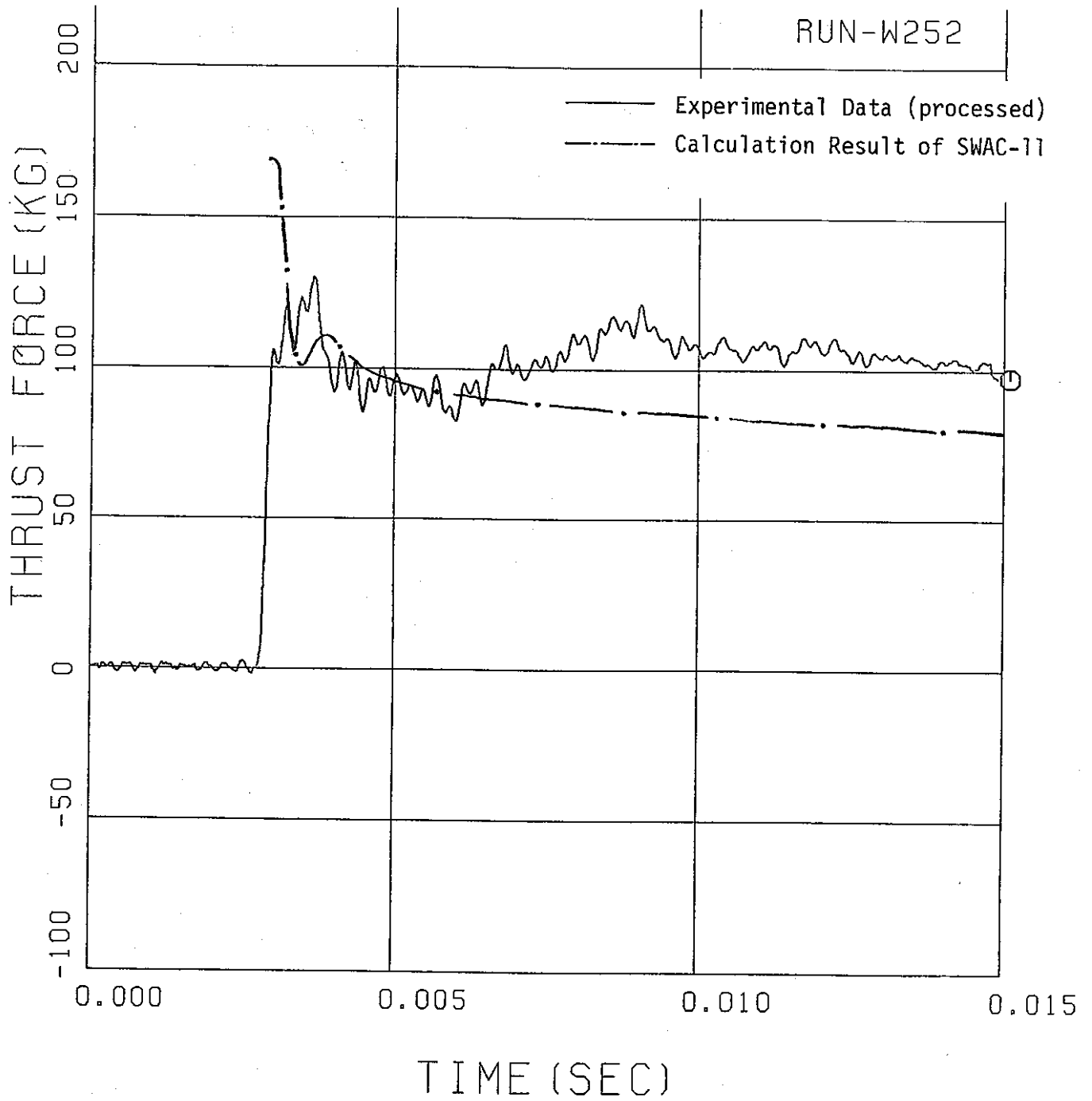


Fig. 3.6(1) Comparison of Thrust Force Transient in W252

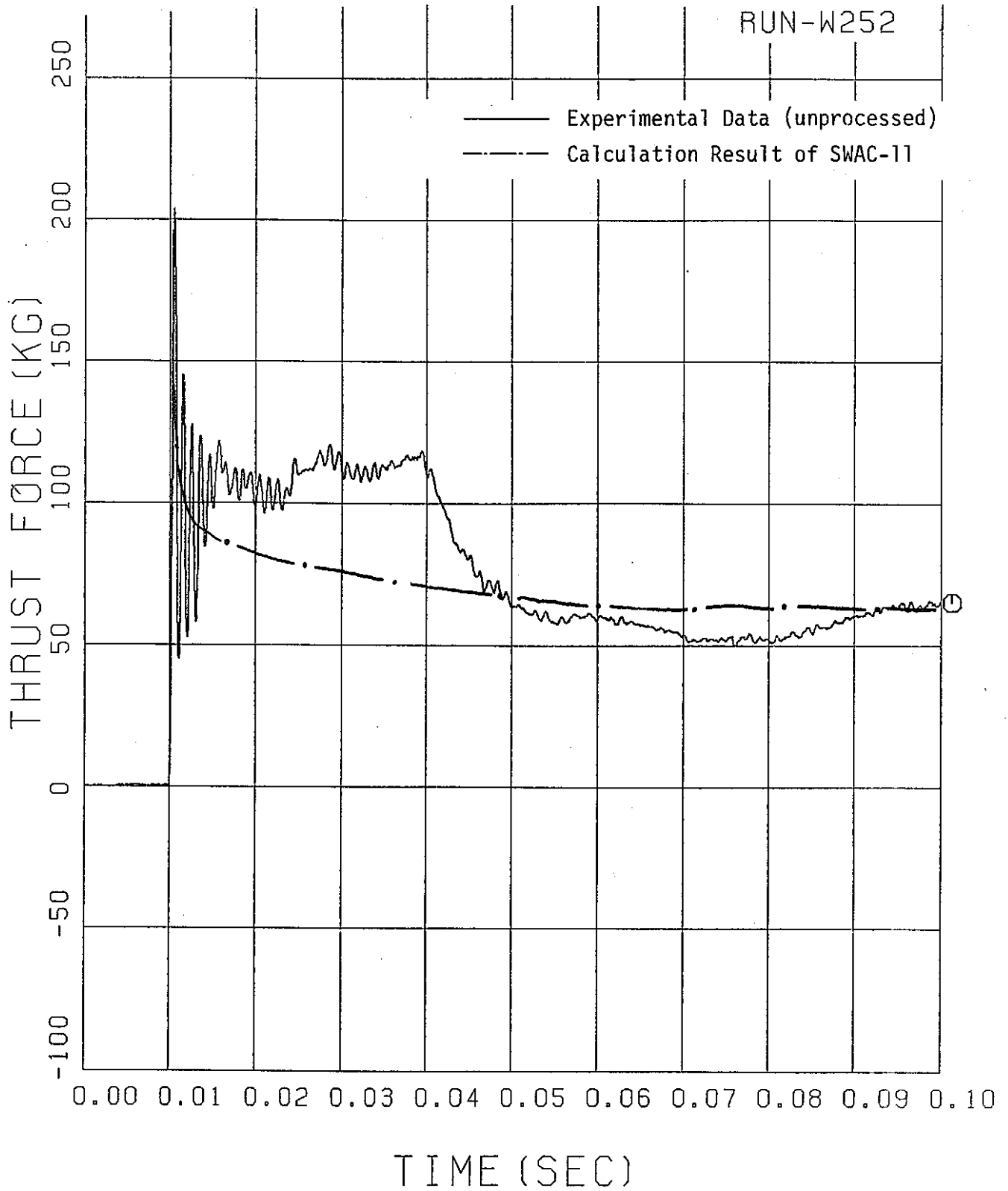


Fig. 3.6(2) Comparison of Thrust Force Transient in W252

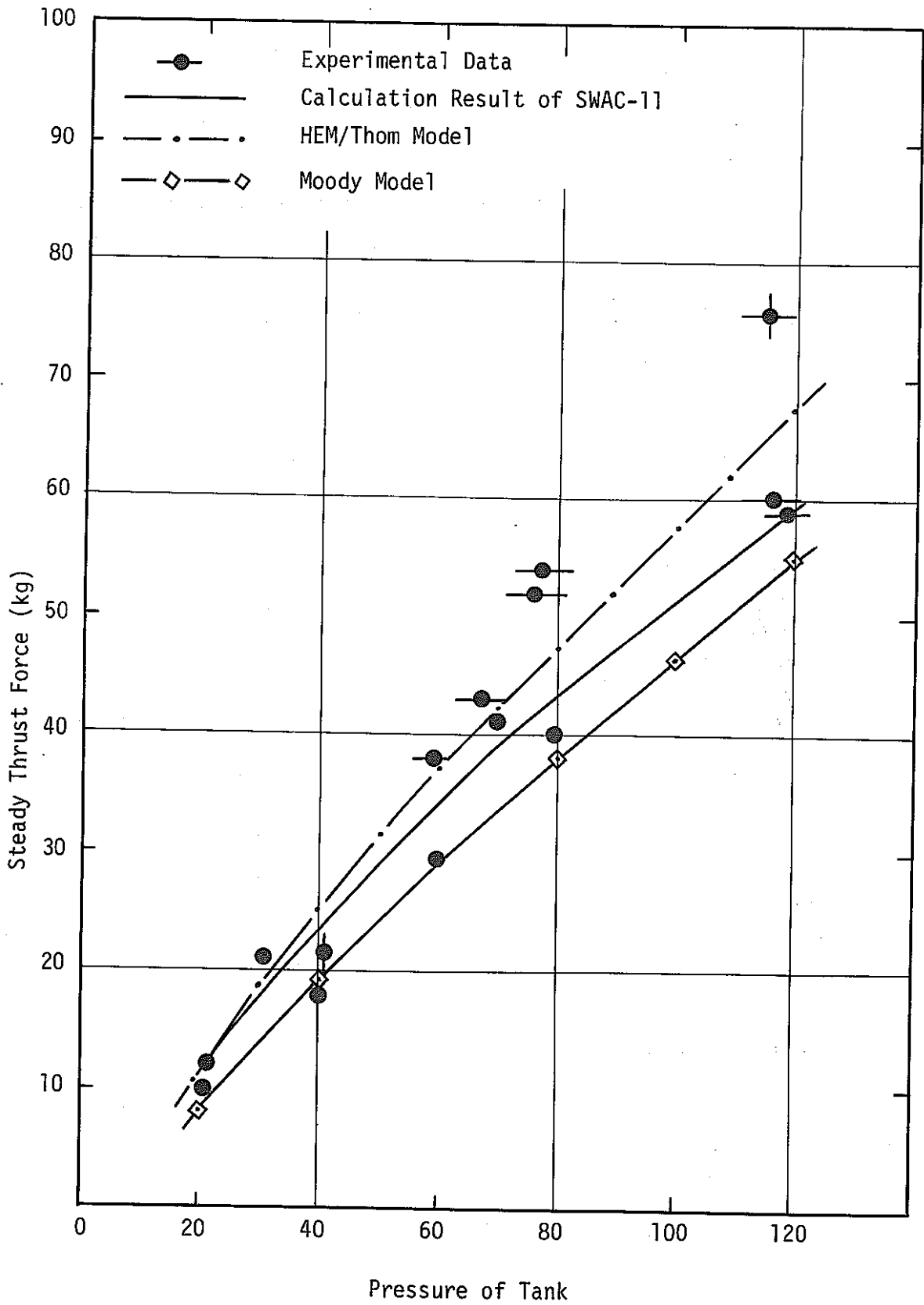


Fig. 3.7 Comparison of Steady Thrust Force Data and Calculation Results

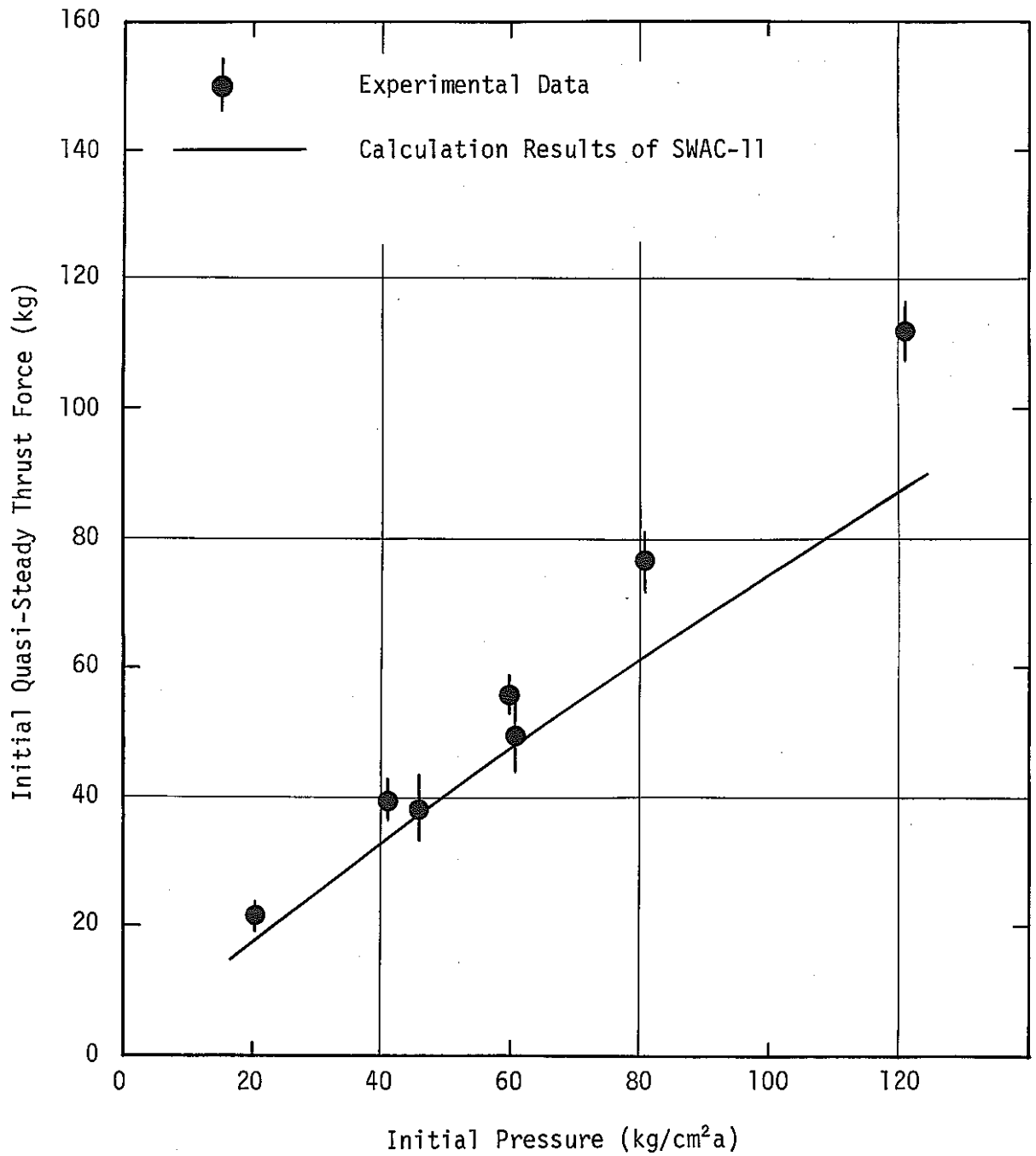


Fig. 3.8 Comparison of Initial Quasi-Steady Thrust Force Data and Calculation Results

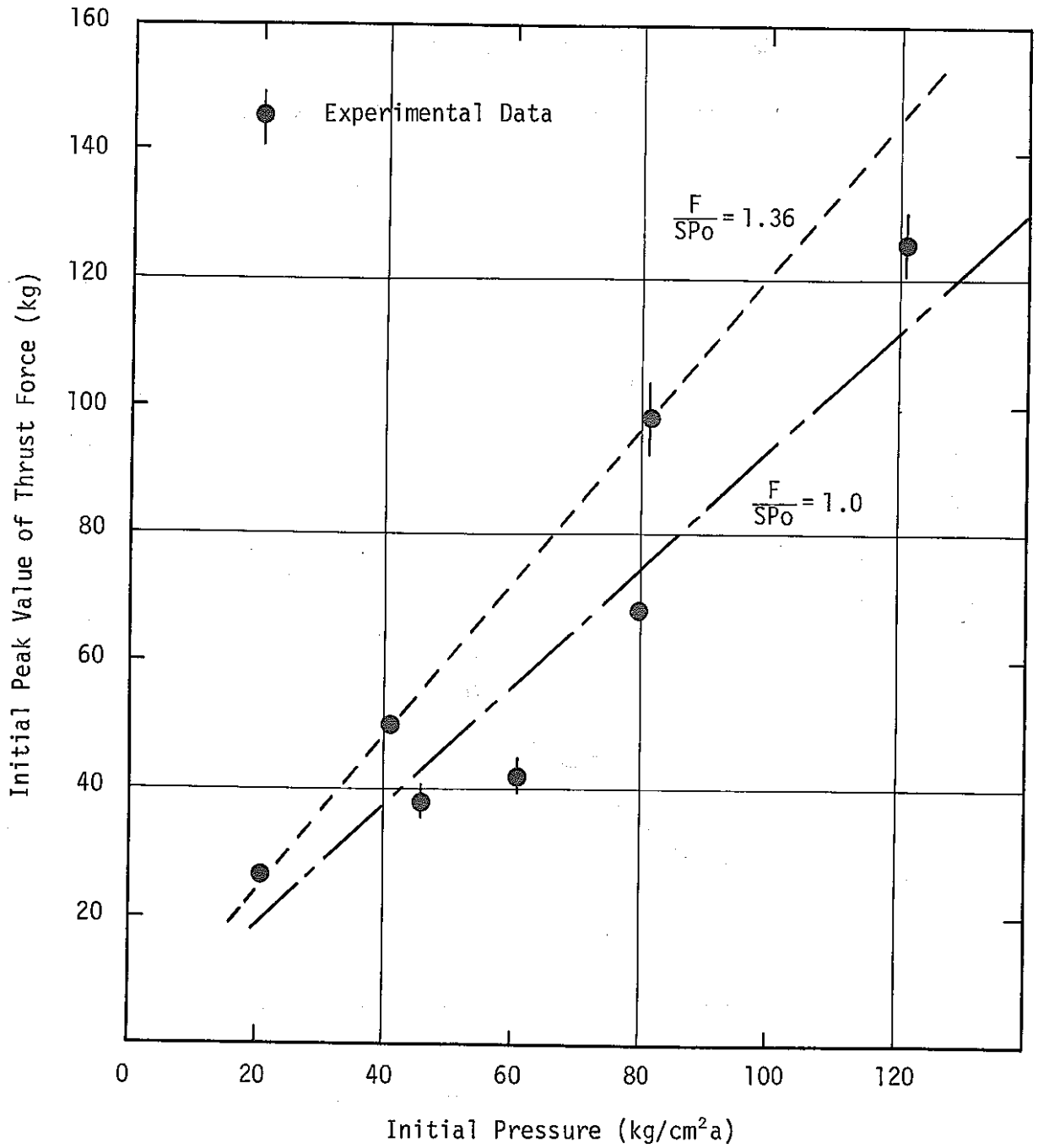


Fig. 3.9 Total Thrust Force

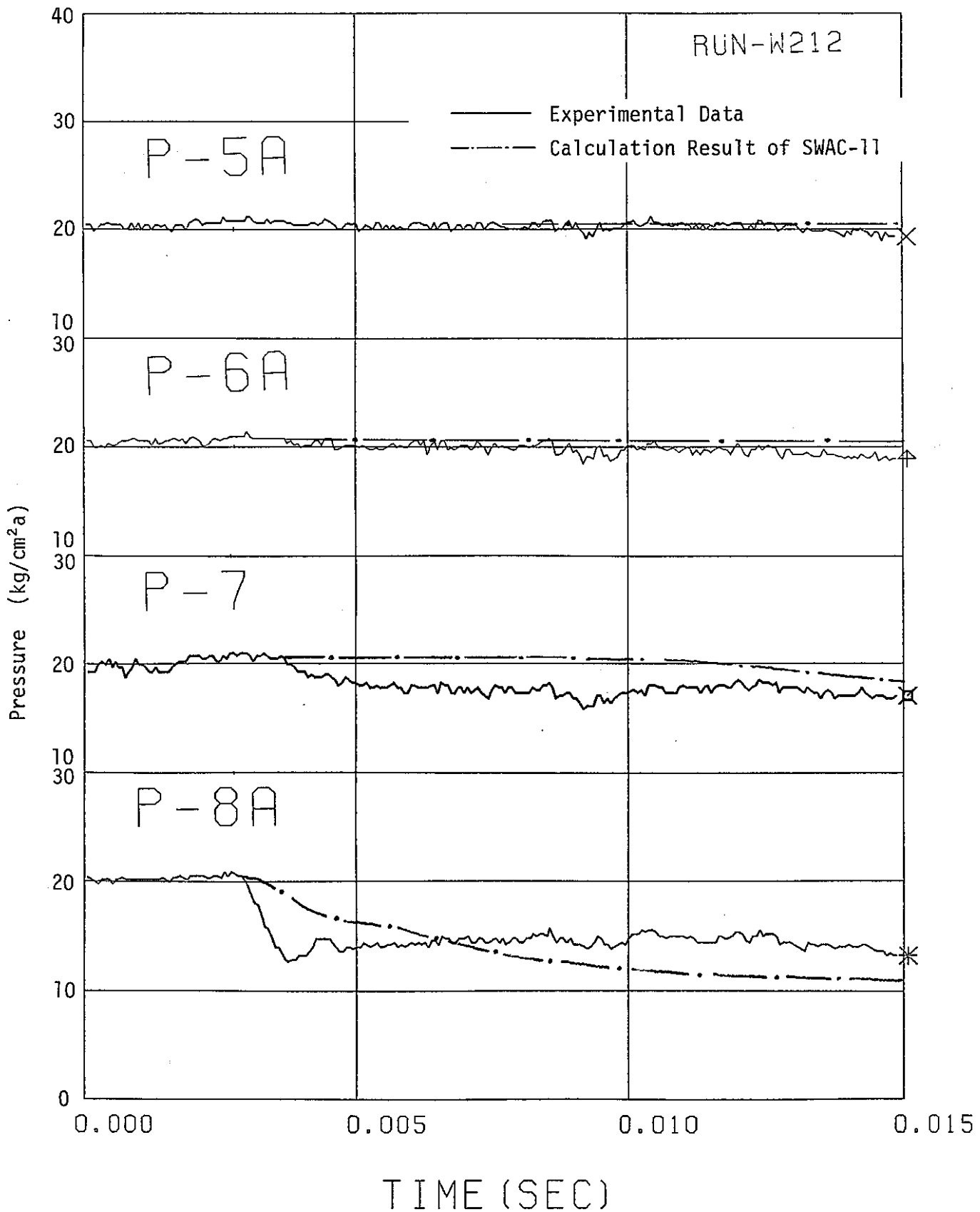


Fig. 3.10' Comparison of Pressure Transients in W212

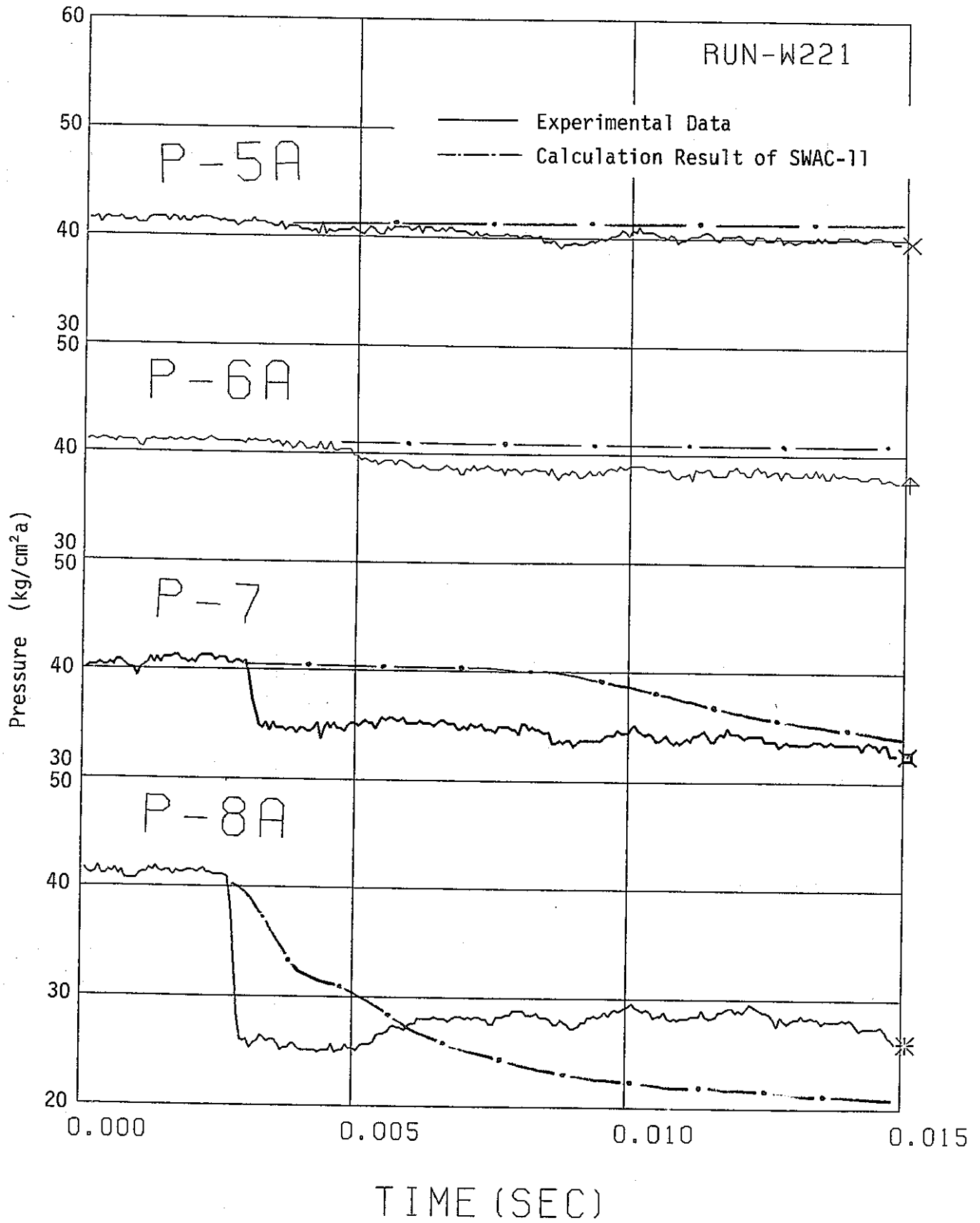


Fig. 3.11 Comparison of Pressure Transients in W221

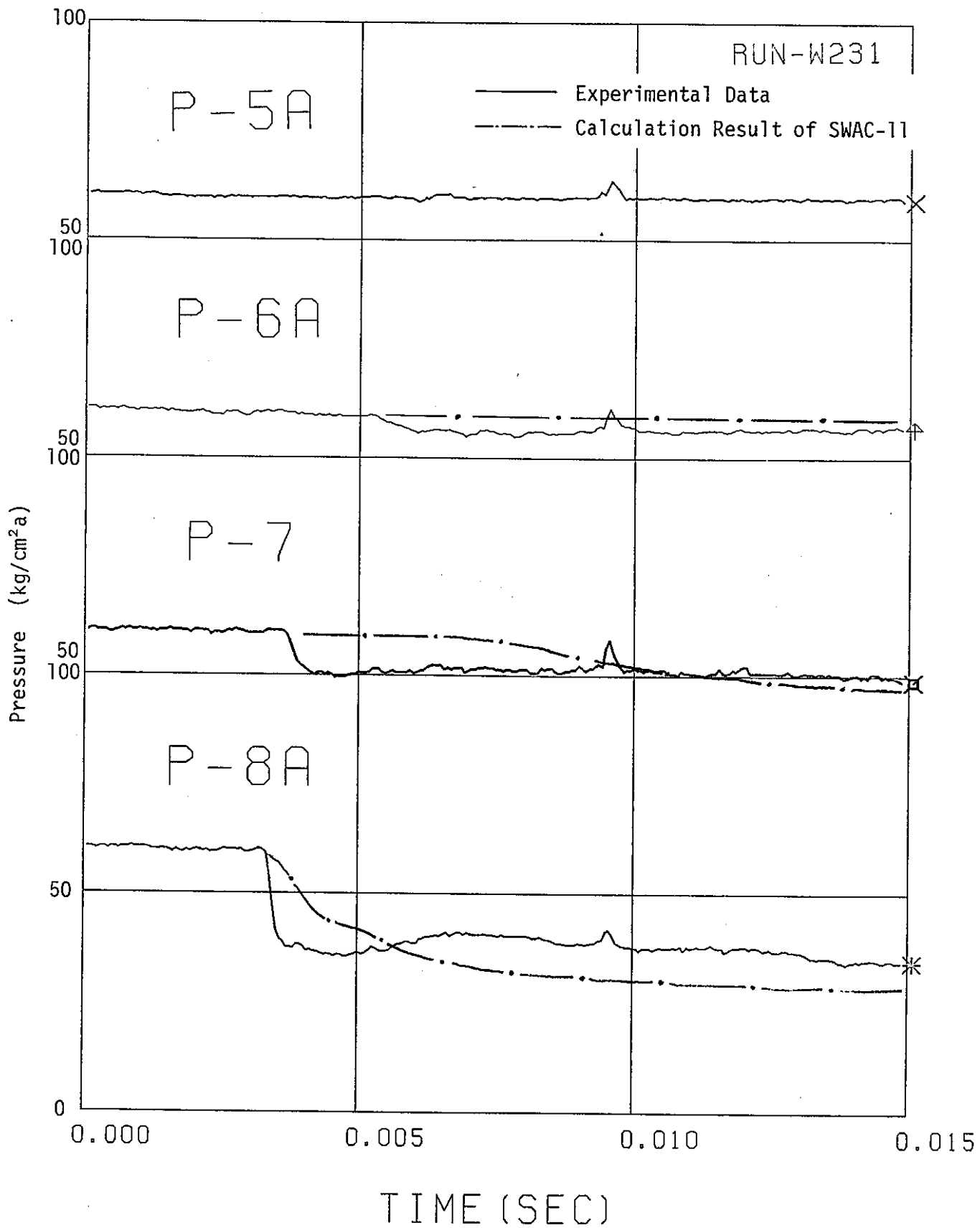


Fig. 3.12 Comparison of Pressure Transients in W231

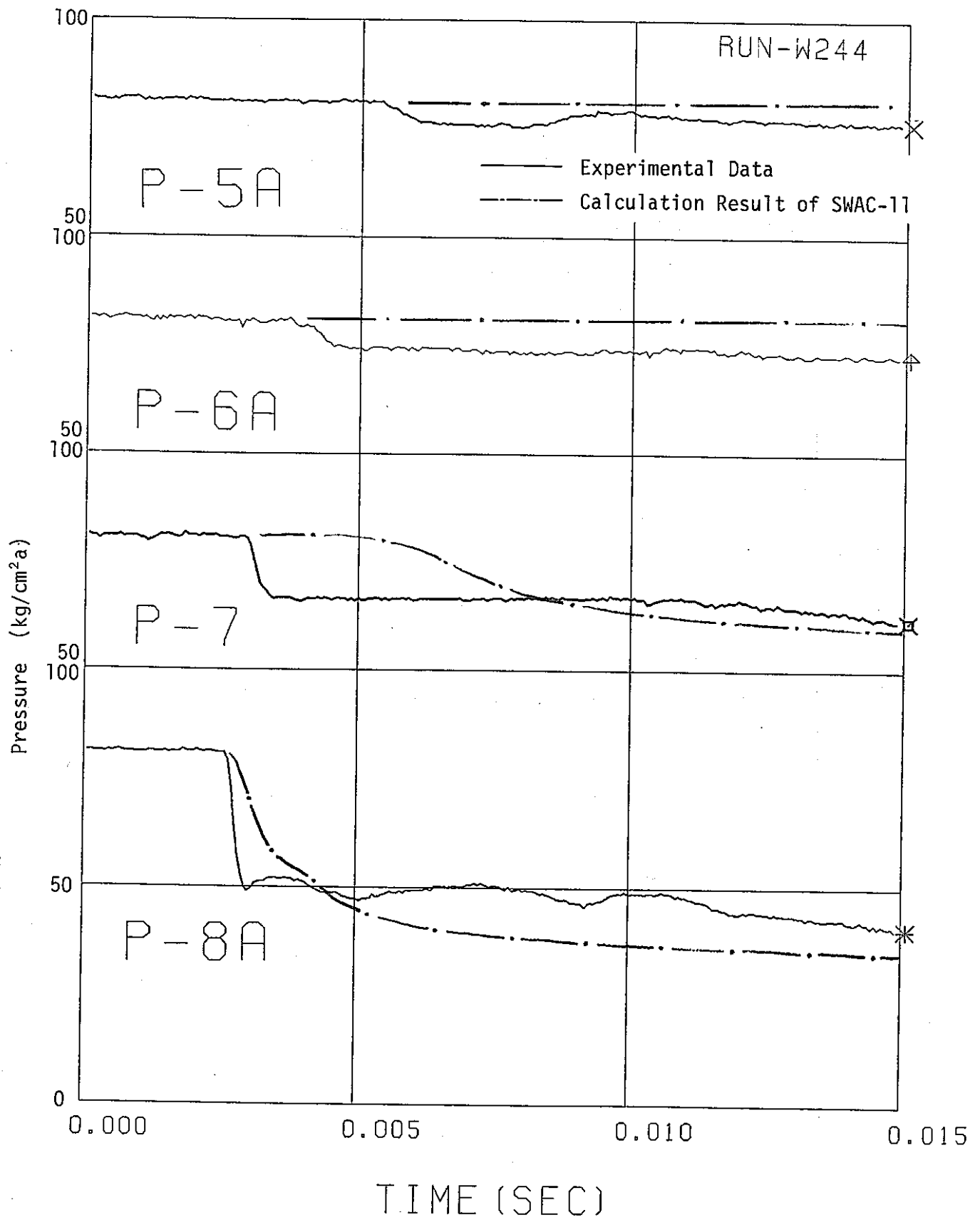


Fig. 3.13(1) Comparison of Pressure Transients in W244

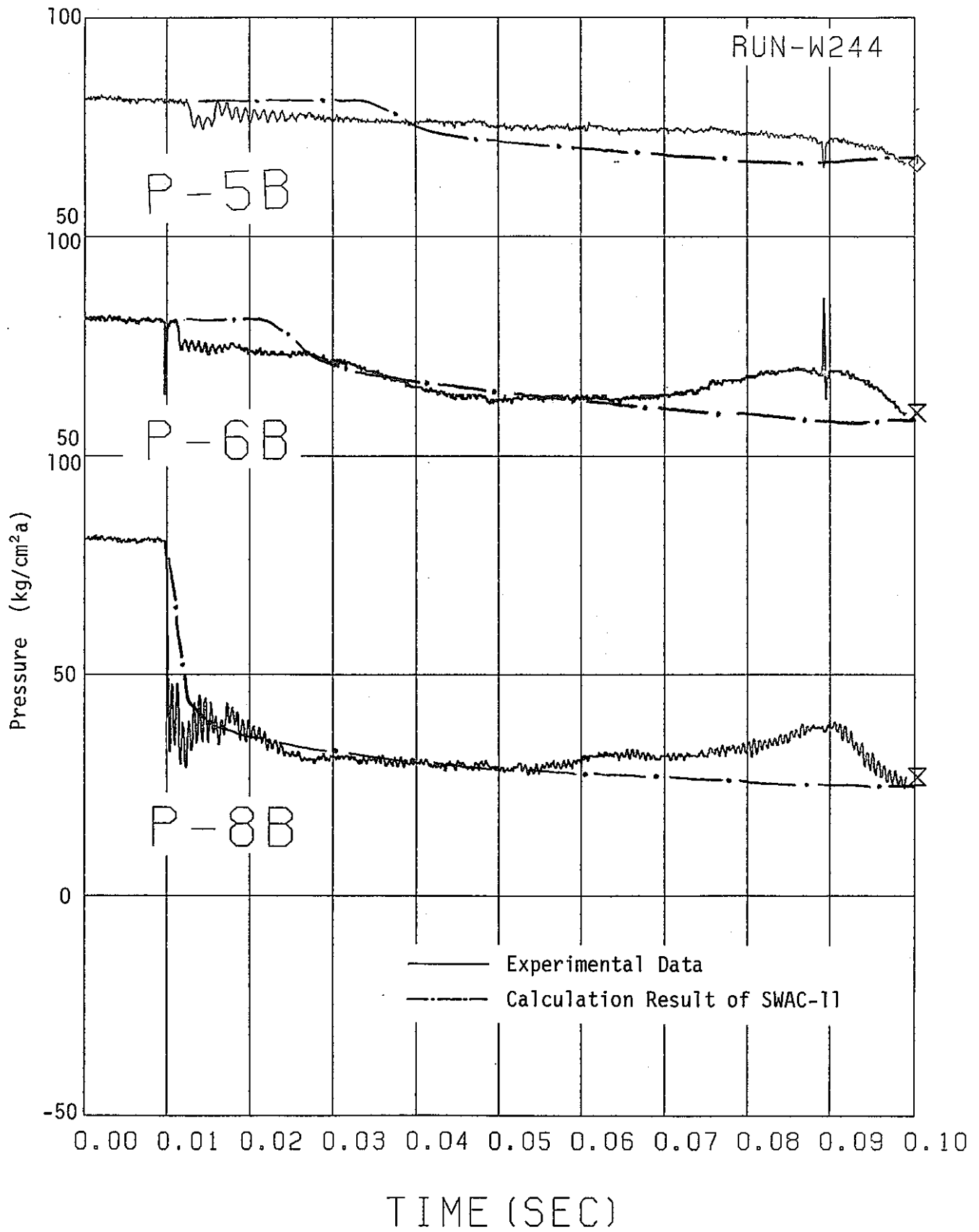


Fig. 3.13(2) Comparison of Pressure Transients in W244

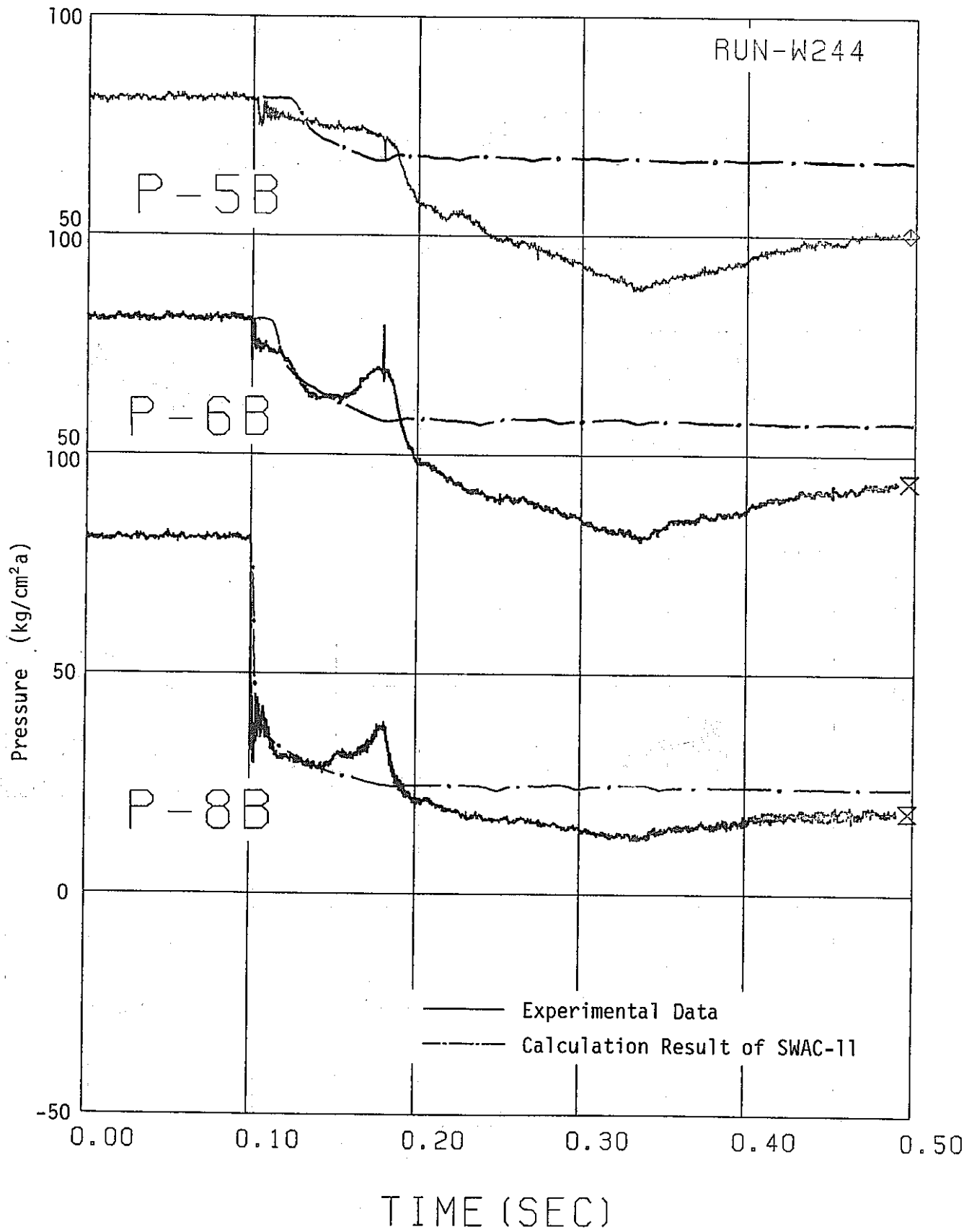


Fig. 3.13(3) Comparison of Pressure Transients in W244

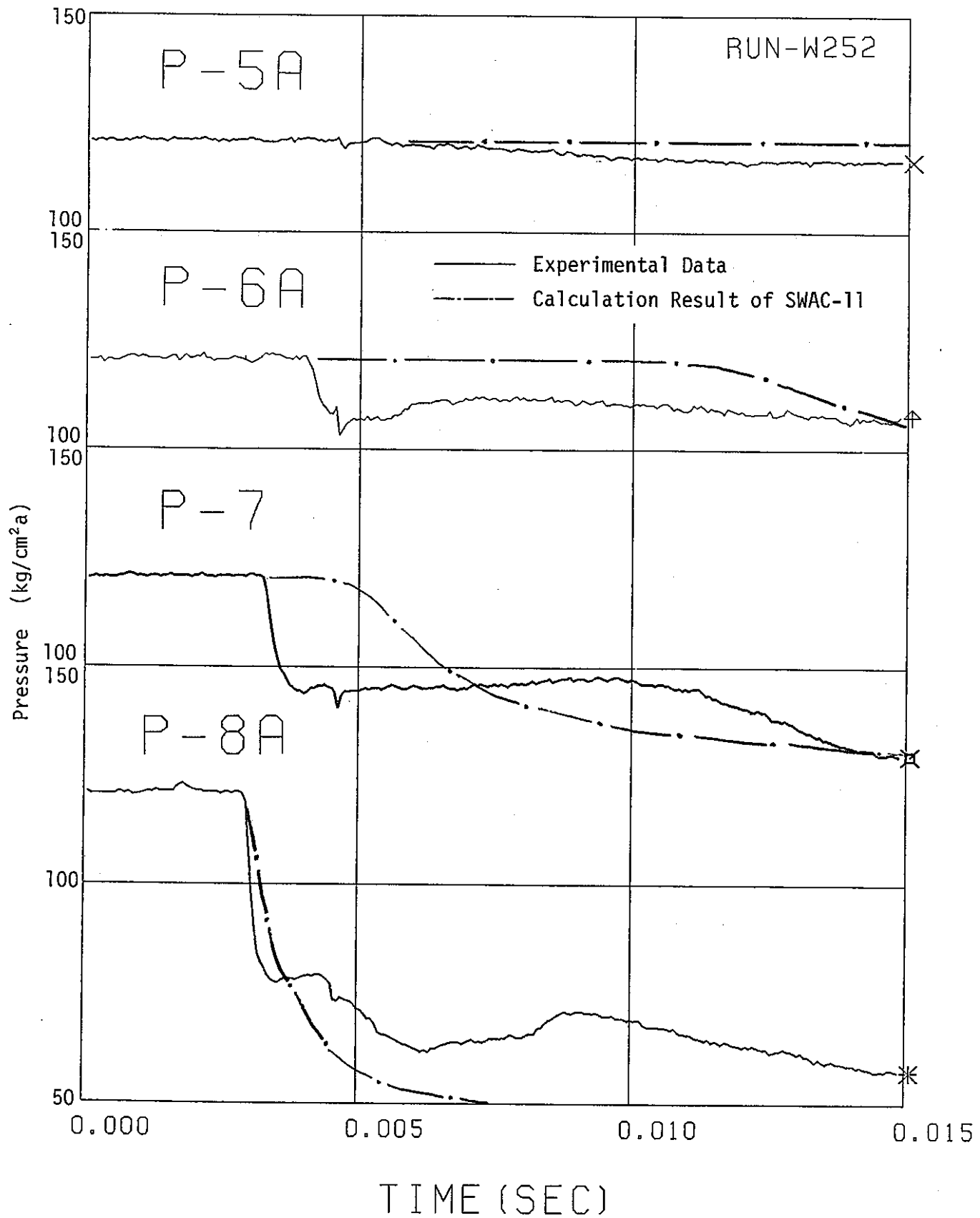


Fig. 3.14(1) Comparison of Pressure Transients in W252

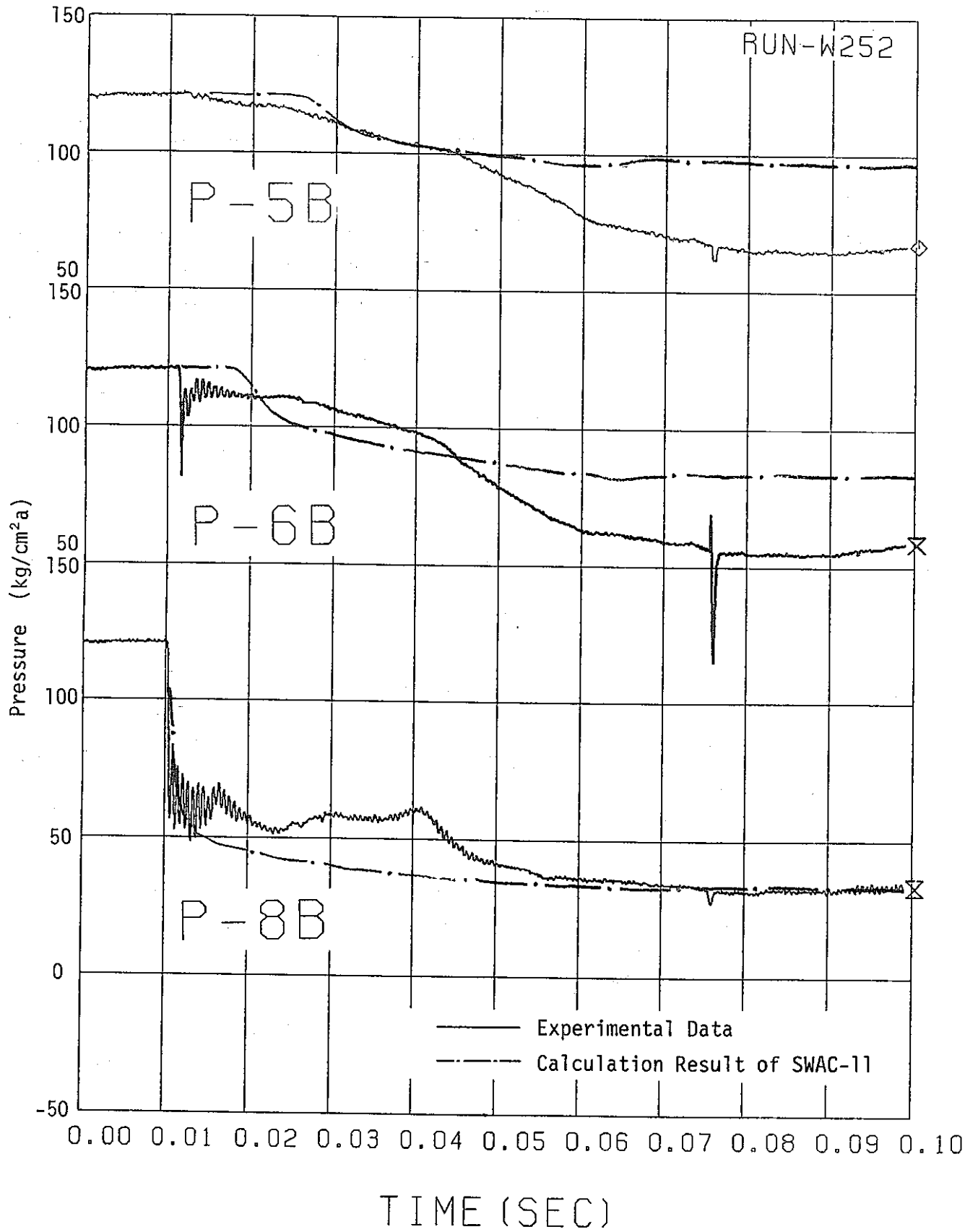


Fig. 3.14(2) Comparison of Pressure Transients in W252

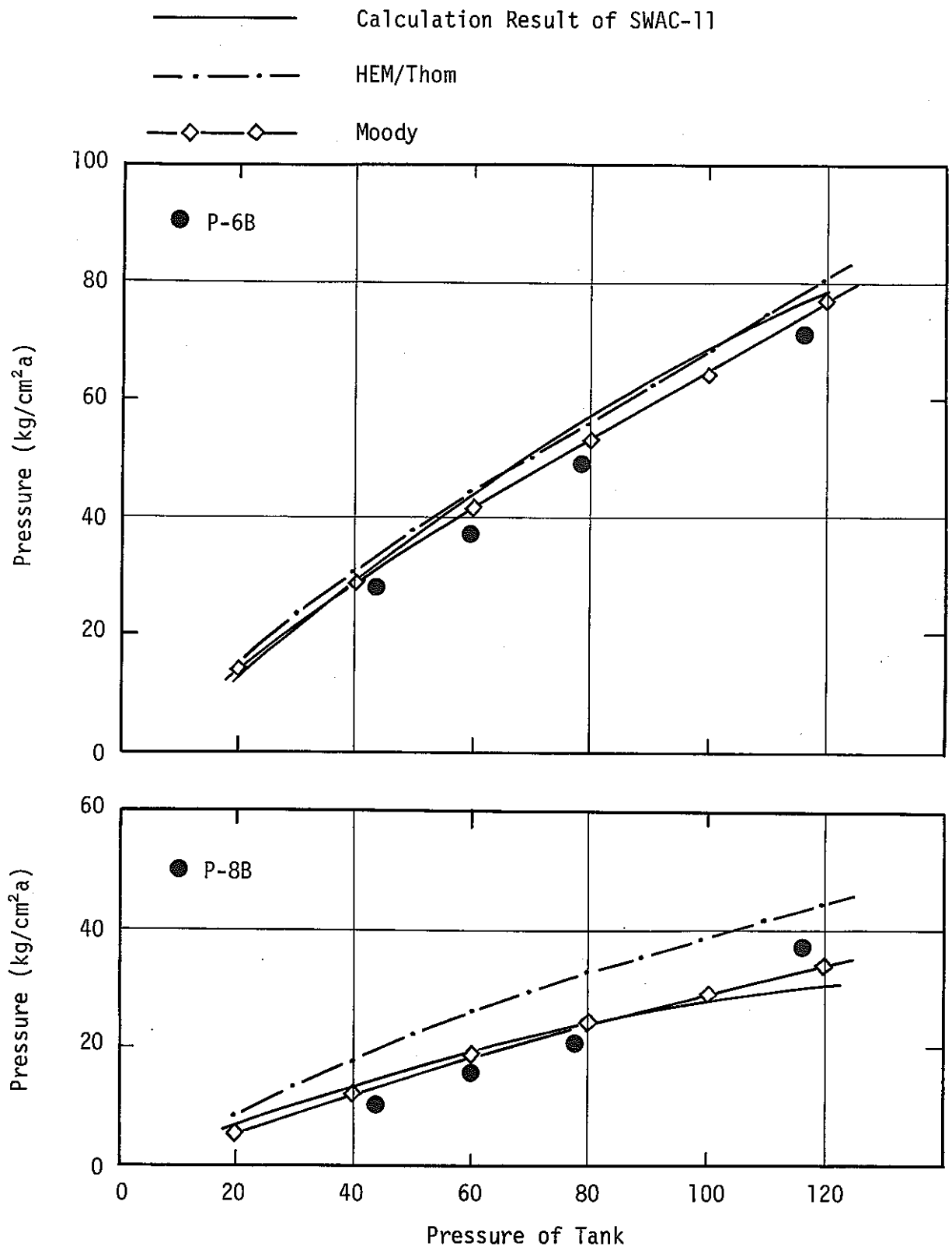


Fig. 3.15 Comparison of Steady Pressures

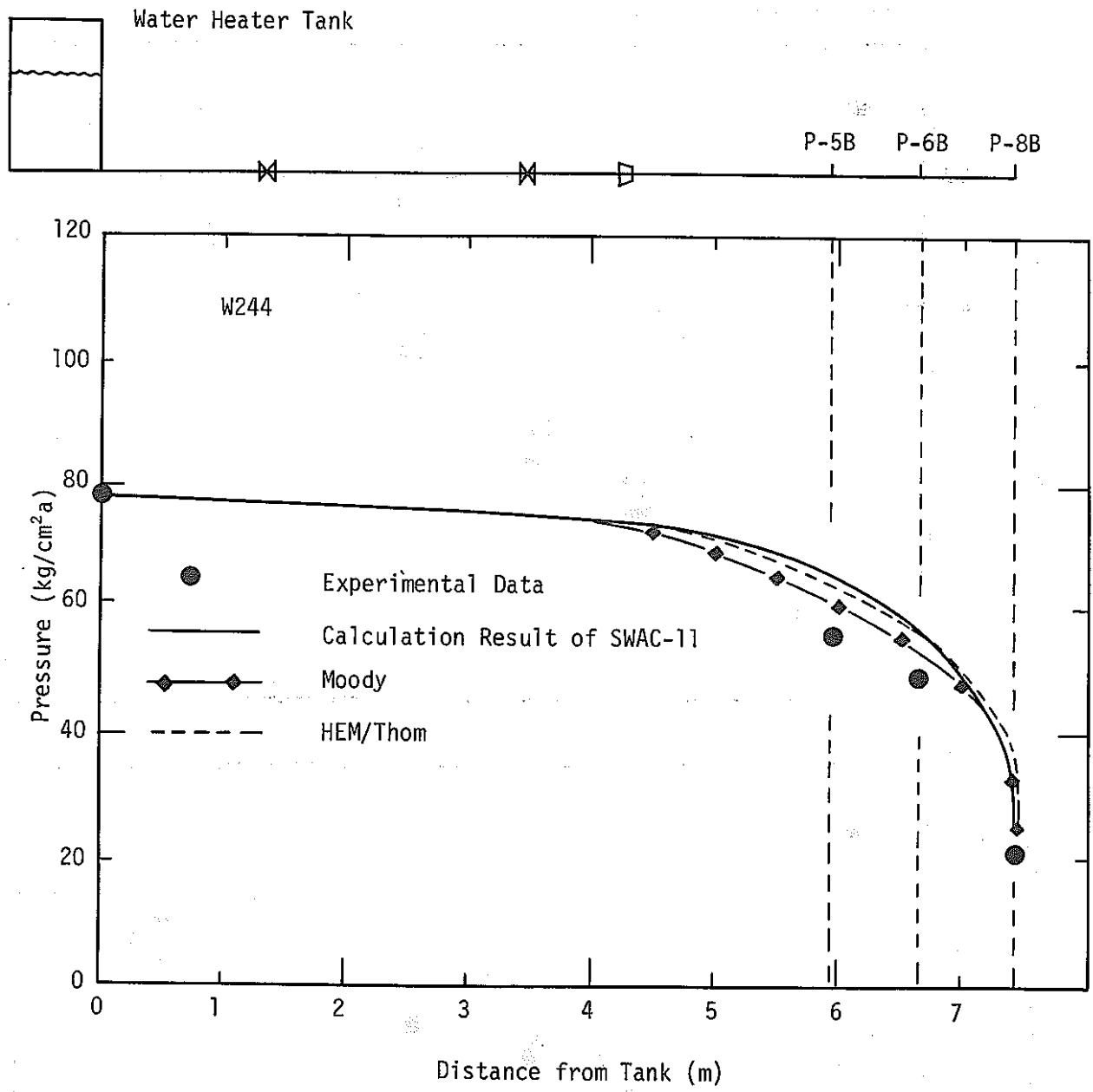


Fig. 3.16 Comparison of Pressure Distribution in W244

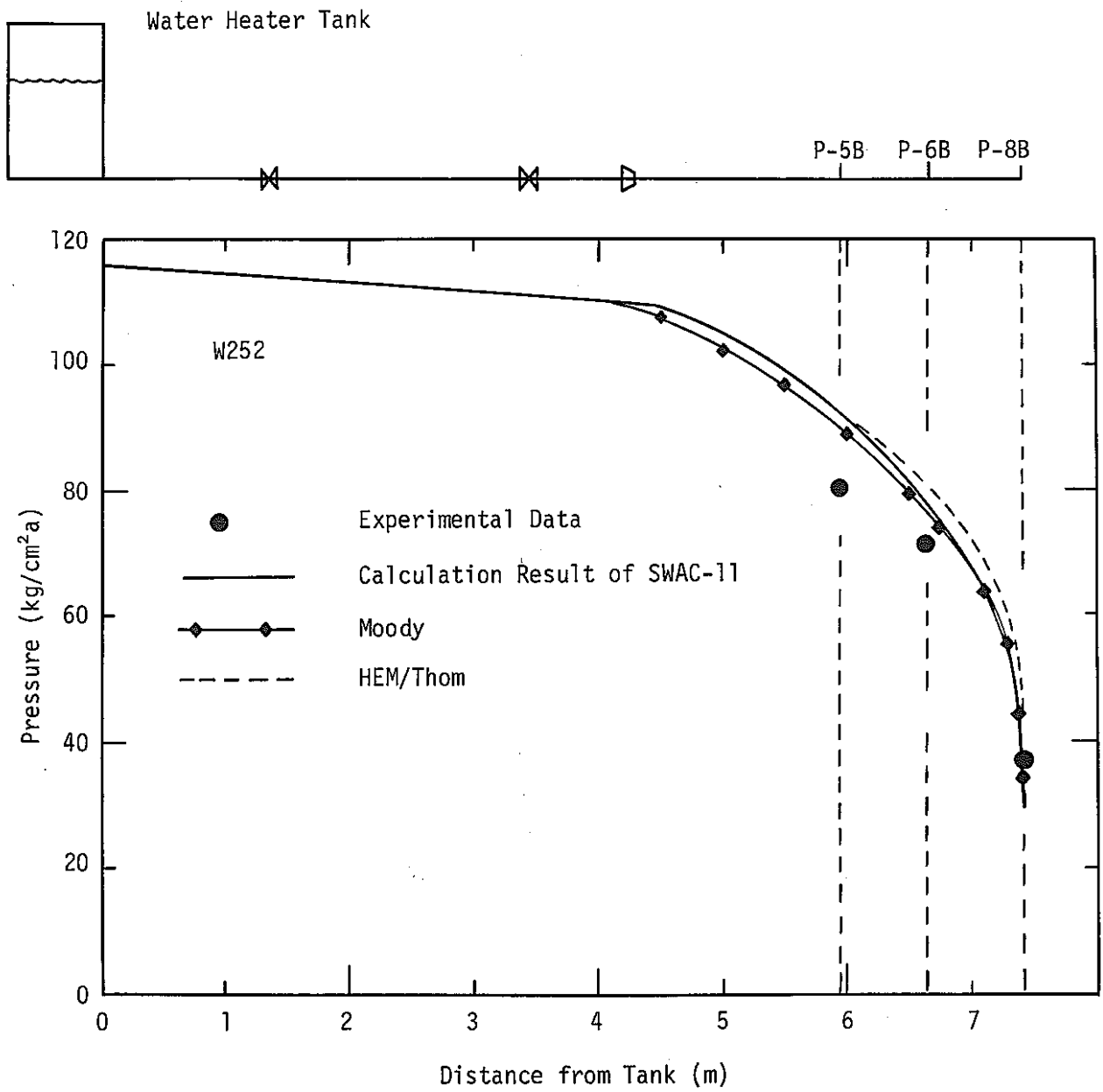


Fig. 3.17 Comparison of Pressure Distribution in W252

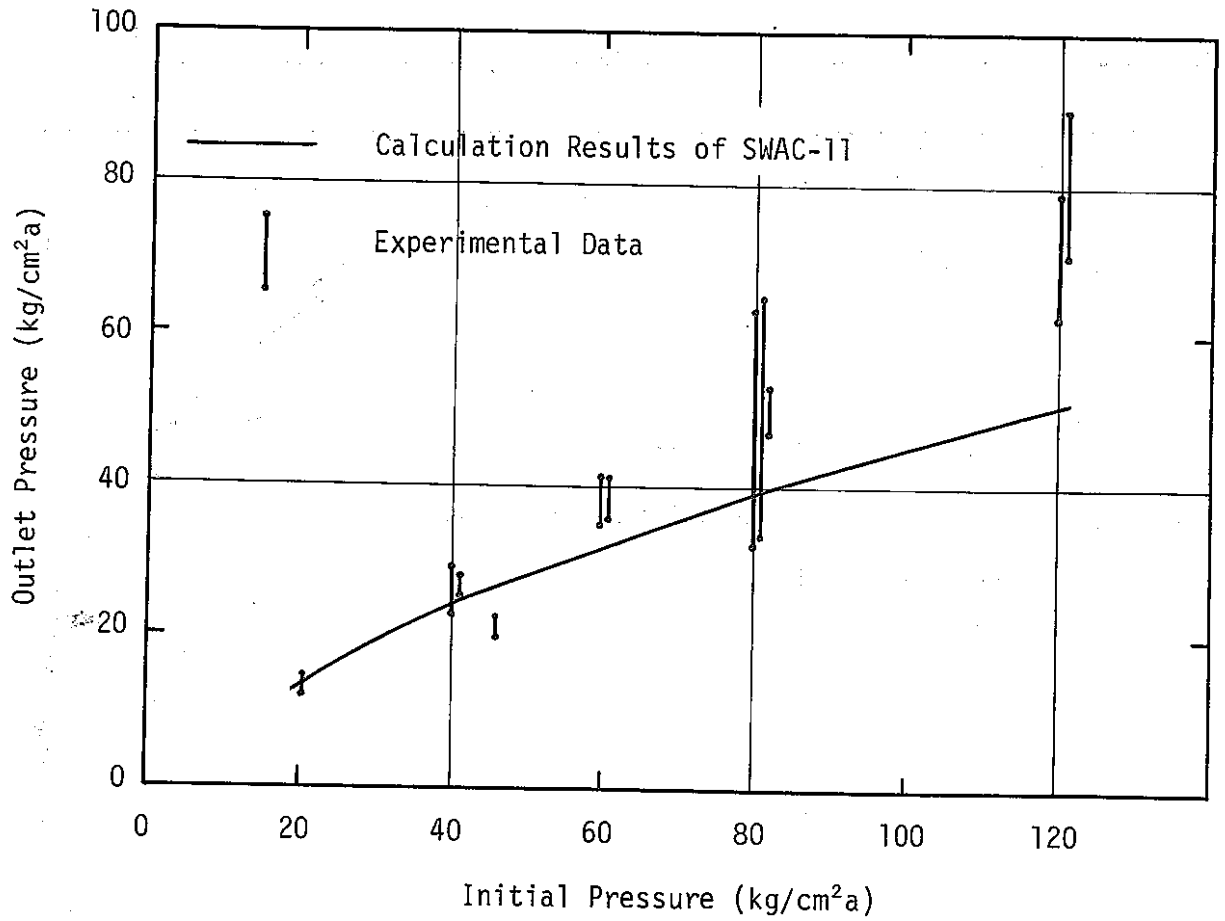


Fig. 3.18 Outlet Pressure just after Rupture Disk Burst

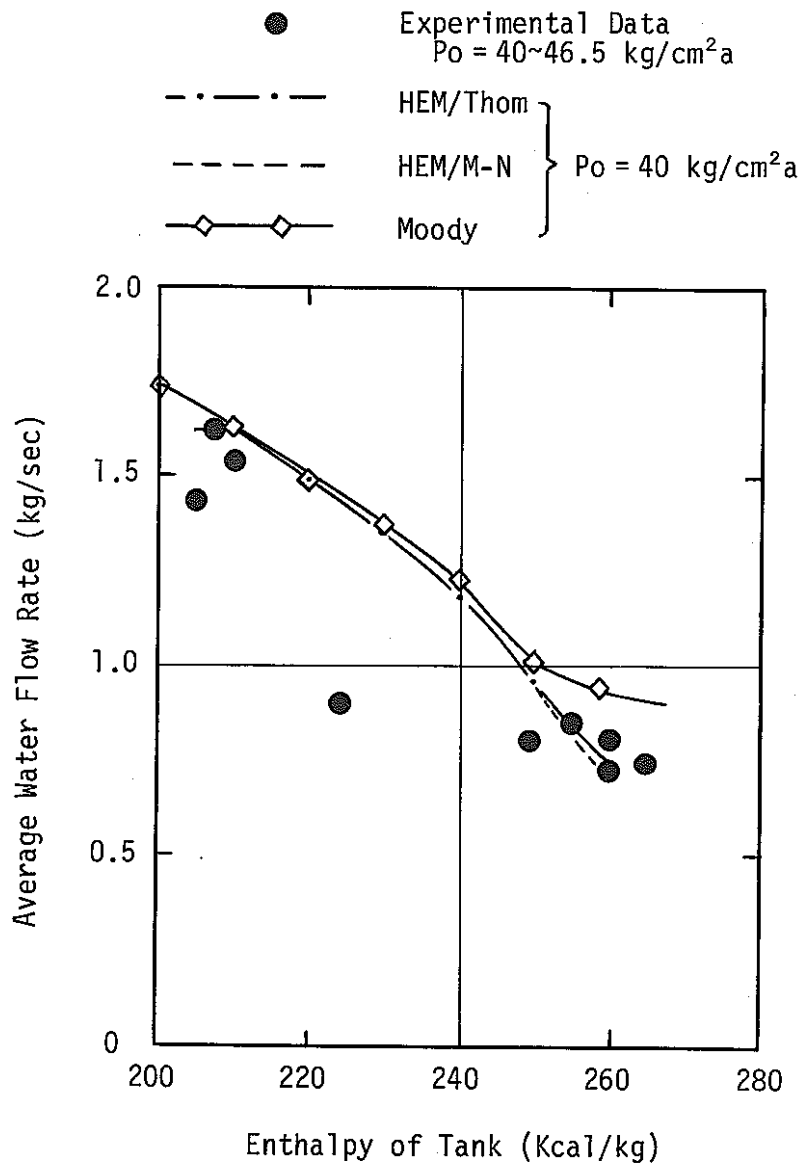


Fig. 4.1 Comparison of Steady Water Flow Rates and Calculation Results

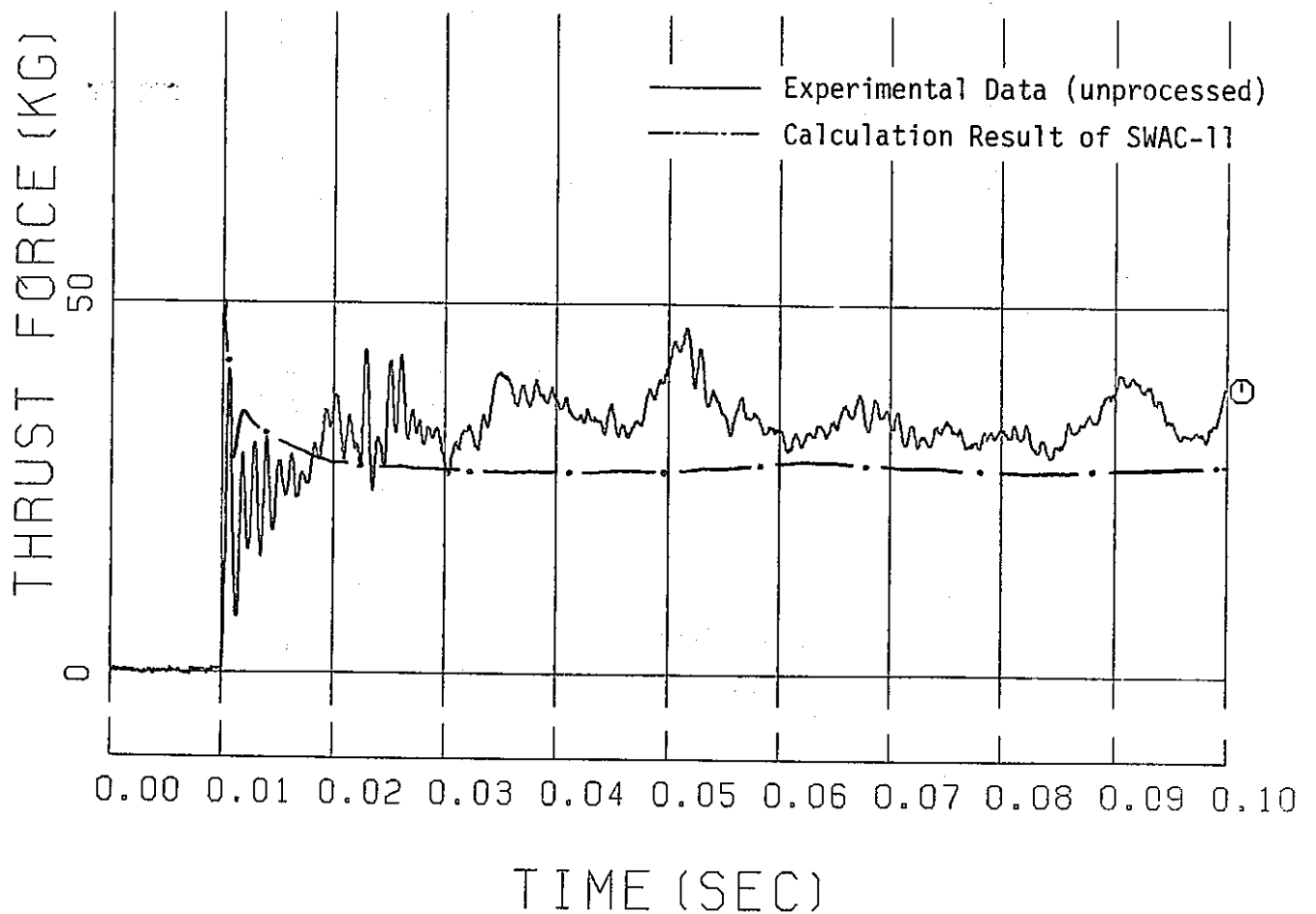
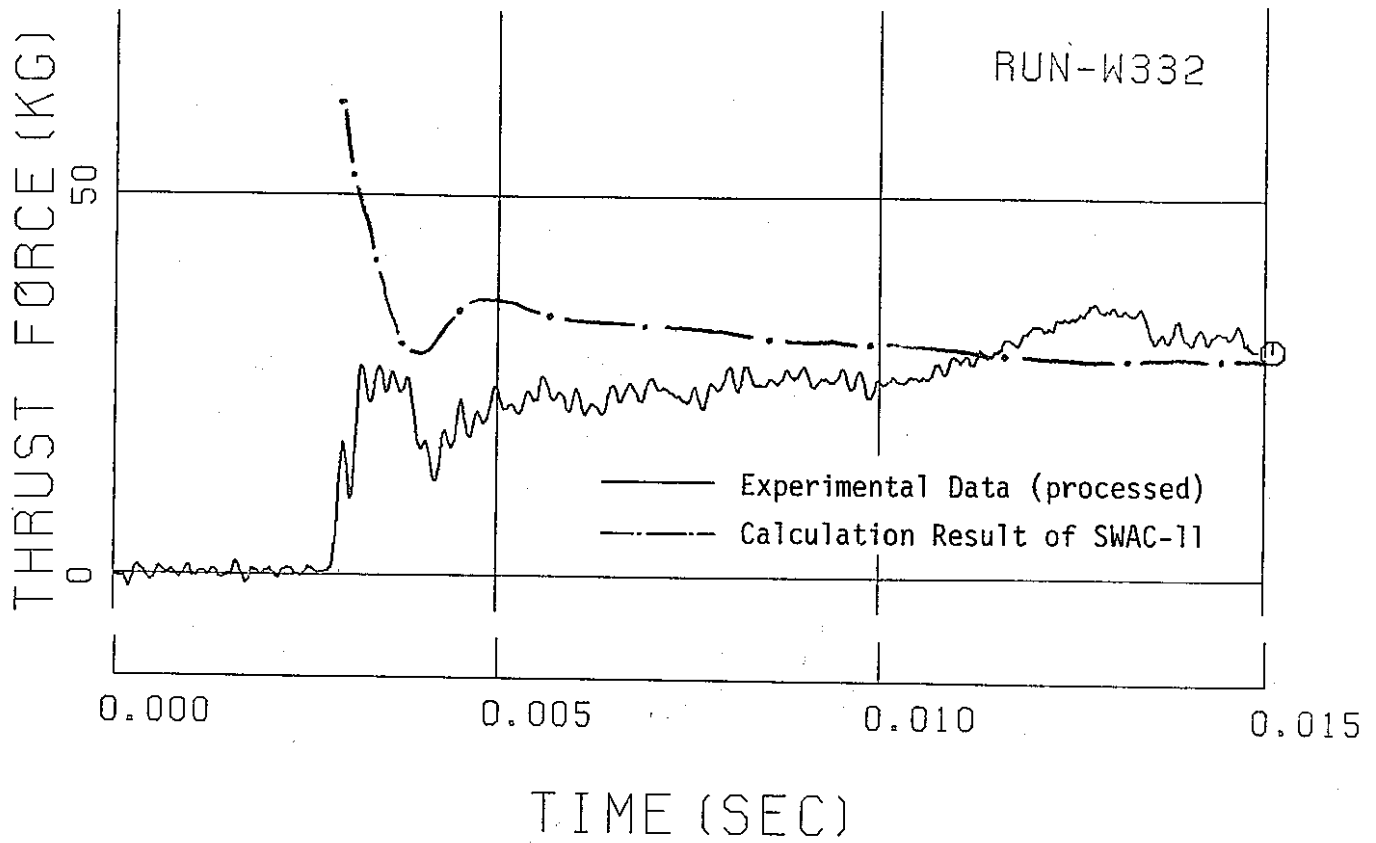


Fig. 4.2 Comparison of Thrust Force Transient in W332

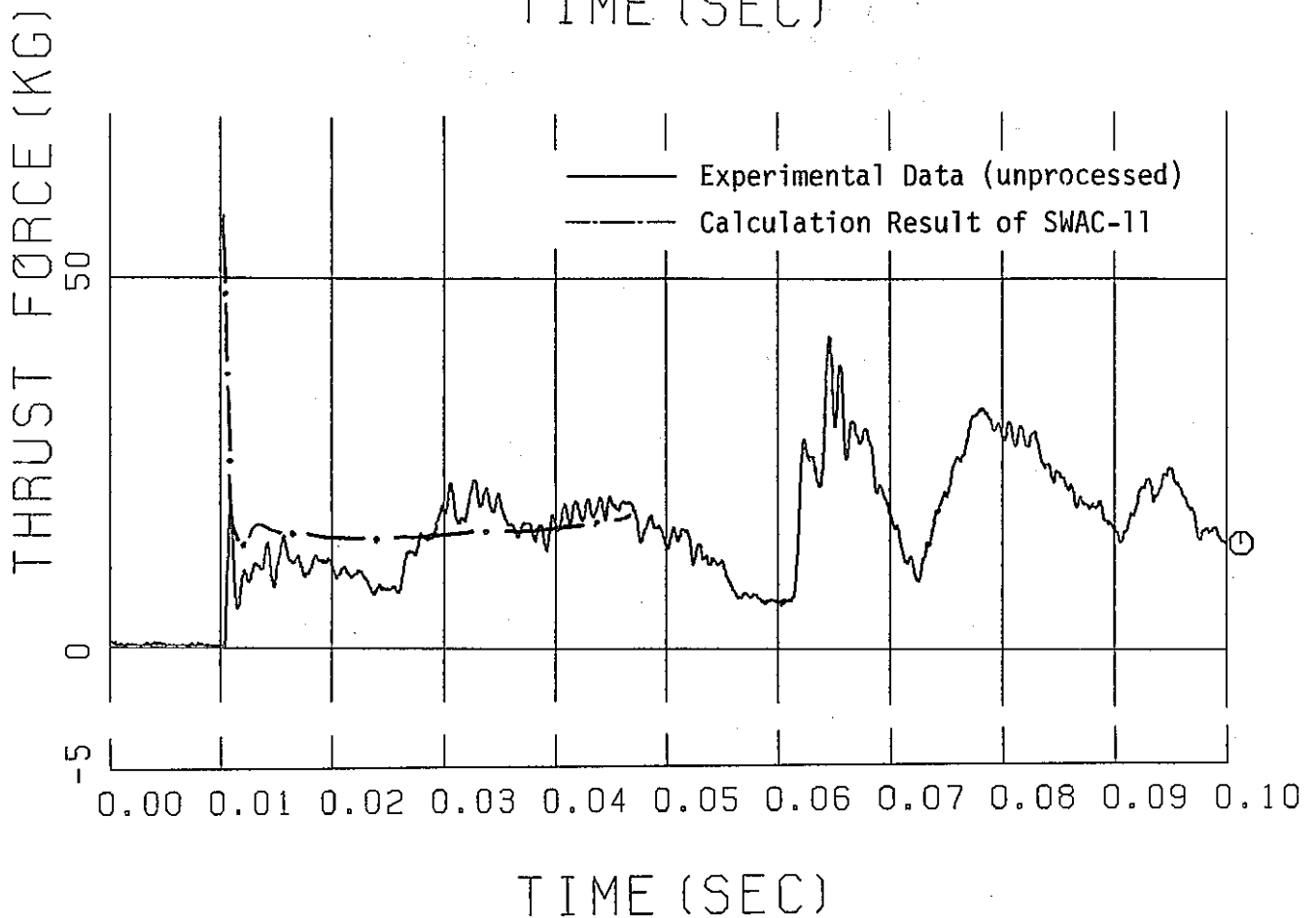
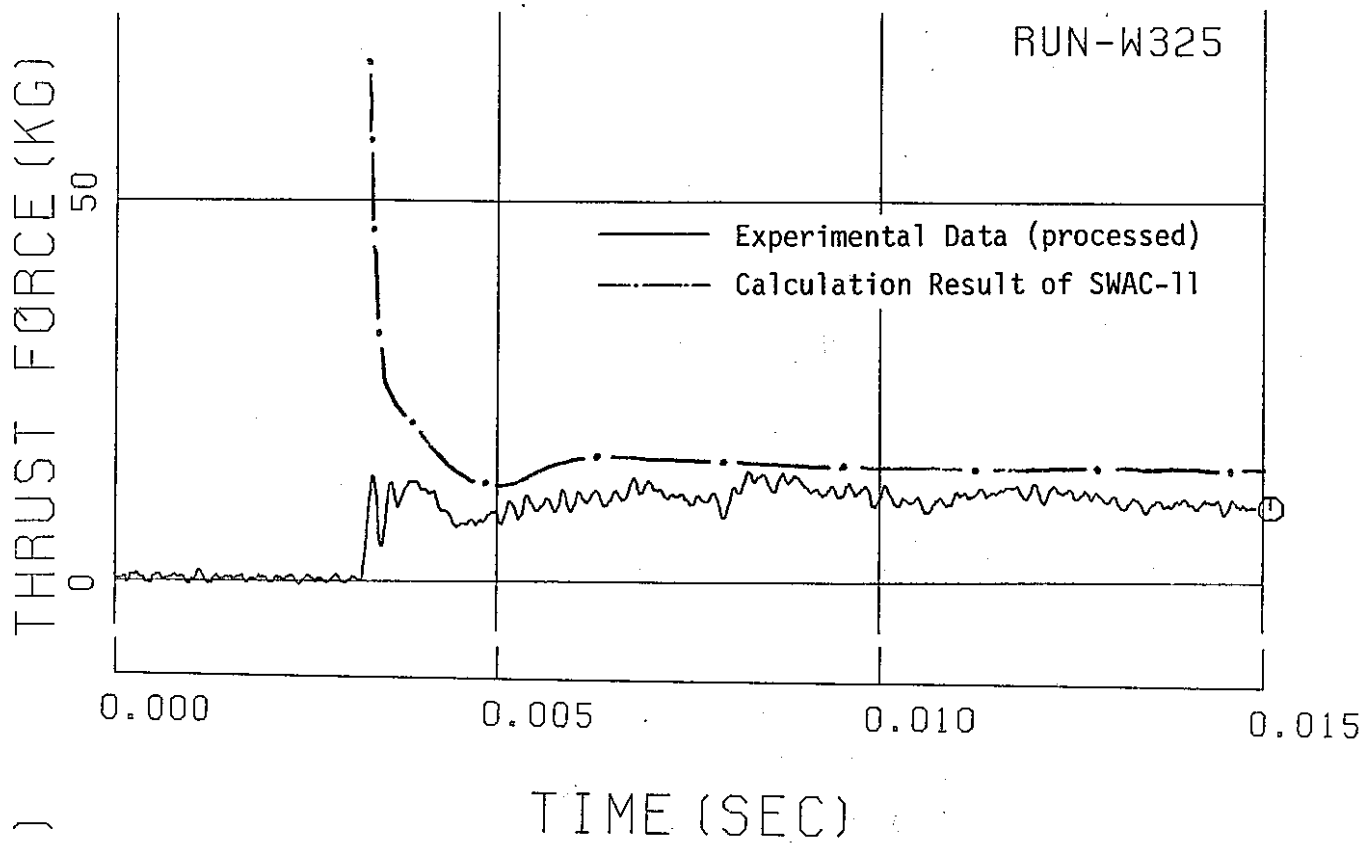


Fig. 4.3 Comparison of Thrust Force Transient in W325

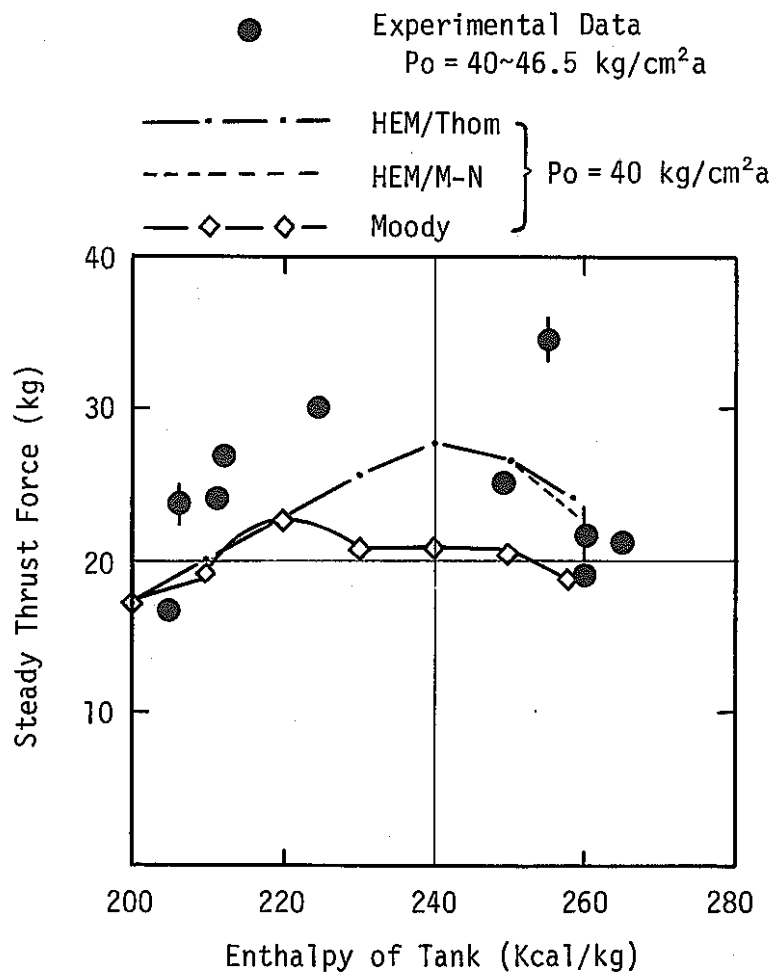


Fig. 4.4 Comparison of Steady Thrust Force Data and Calculation Results

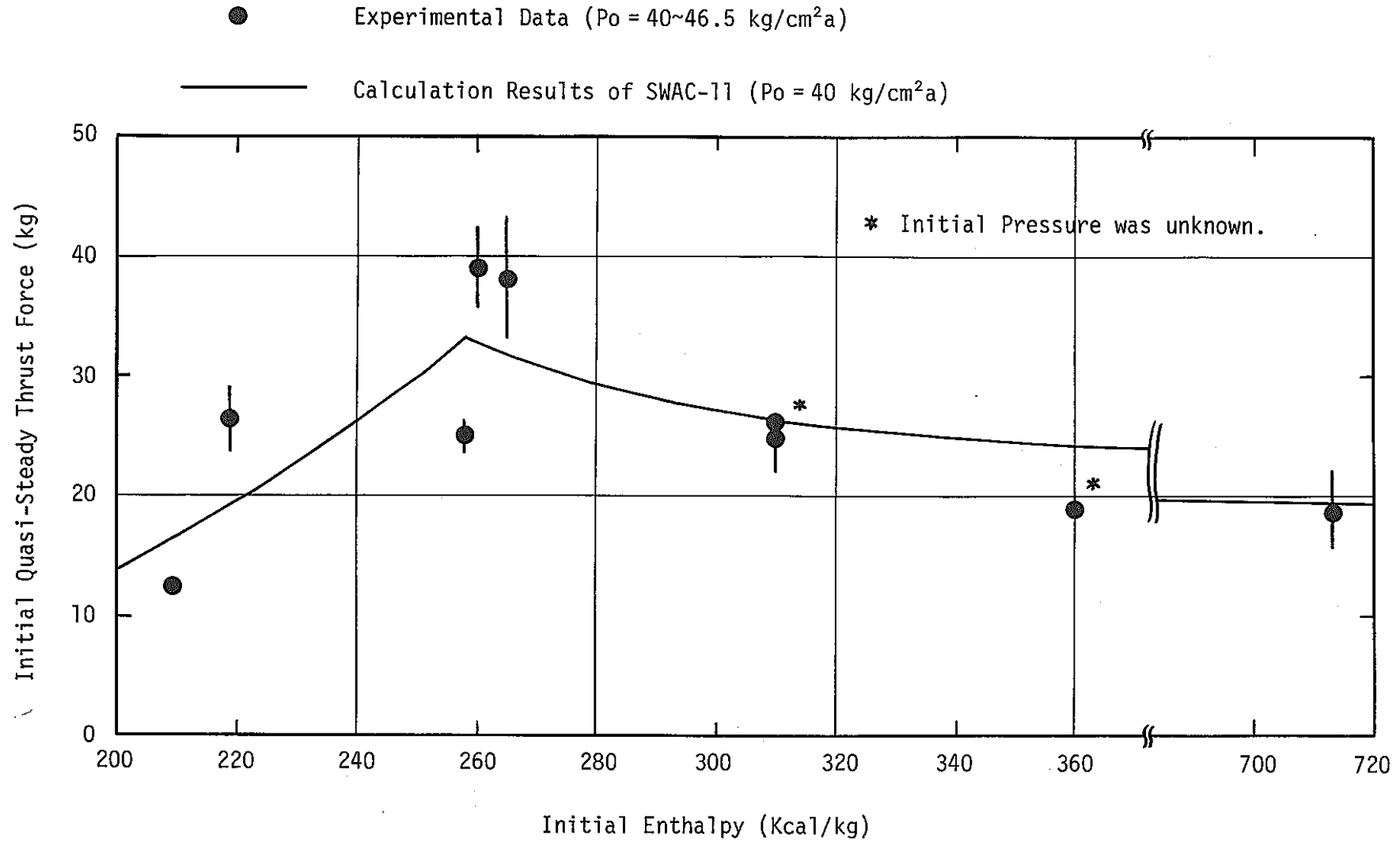


Fig. 4.5 Comparison of Initial Quasi-Steady Thrust Force Data and Calculation Results

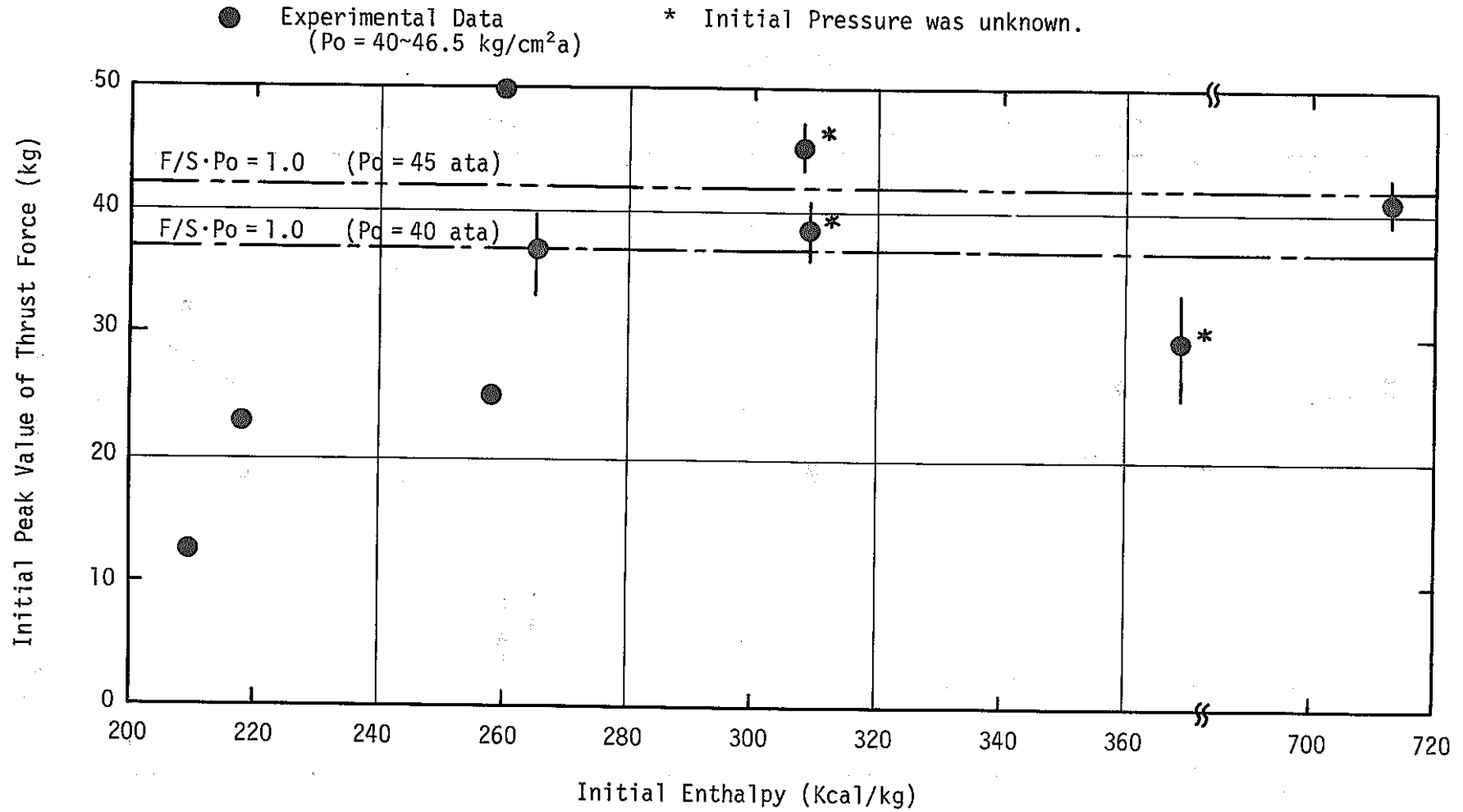


Fig. 4.6 Total Thrust Force

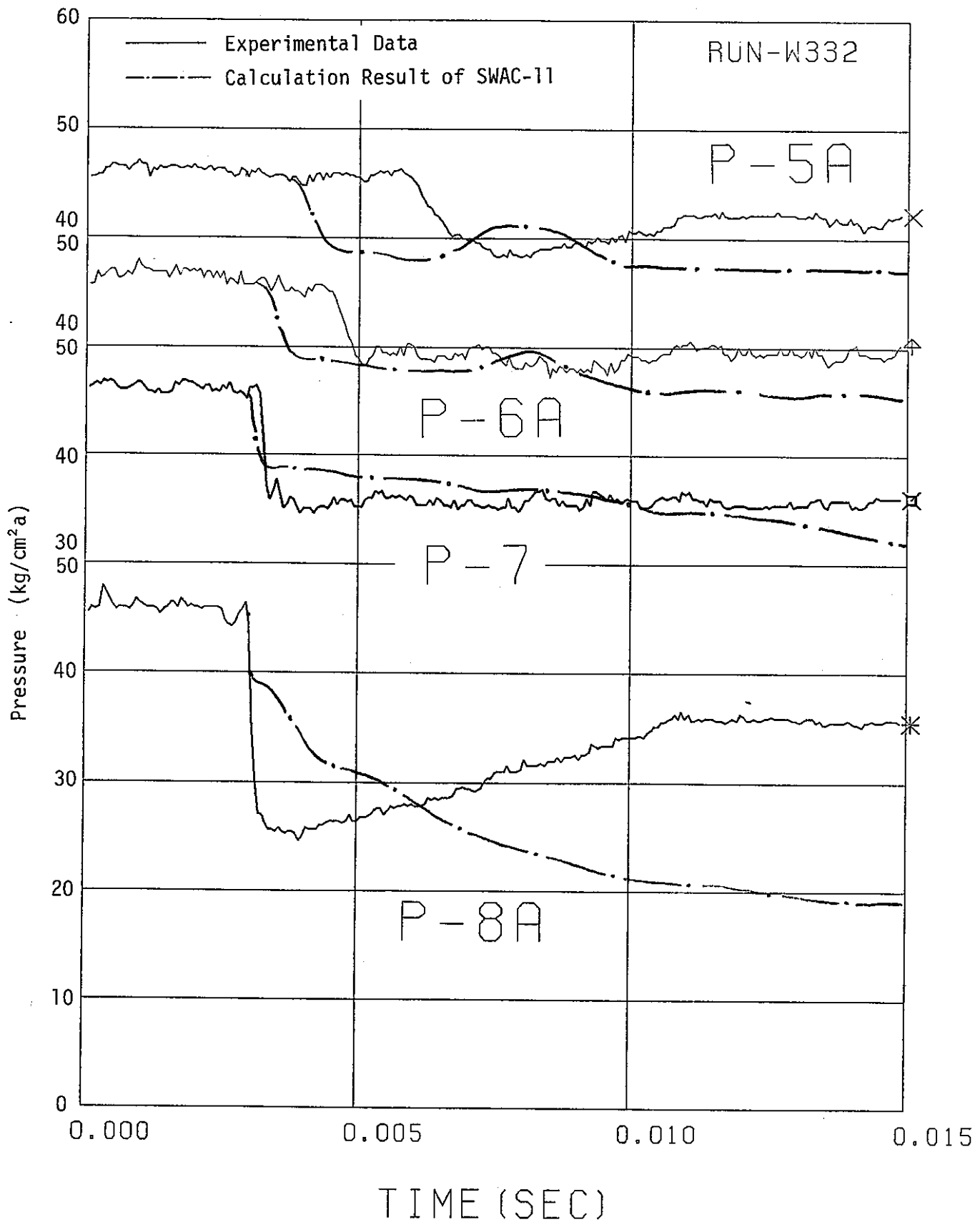


Fig. 4.7(1) Comparison of Pressure Transient in W332

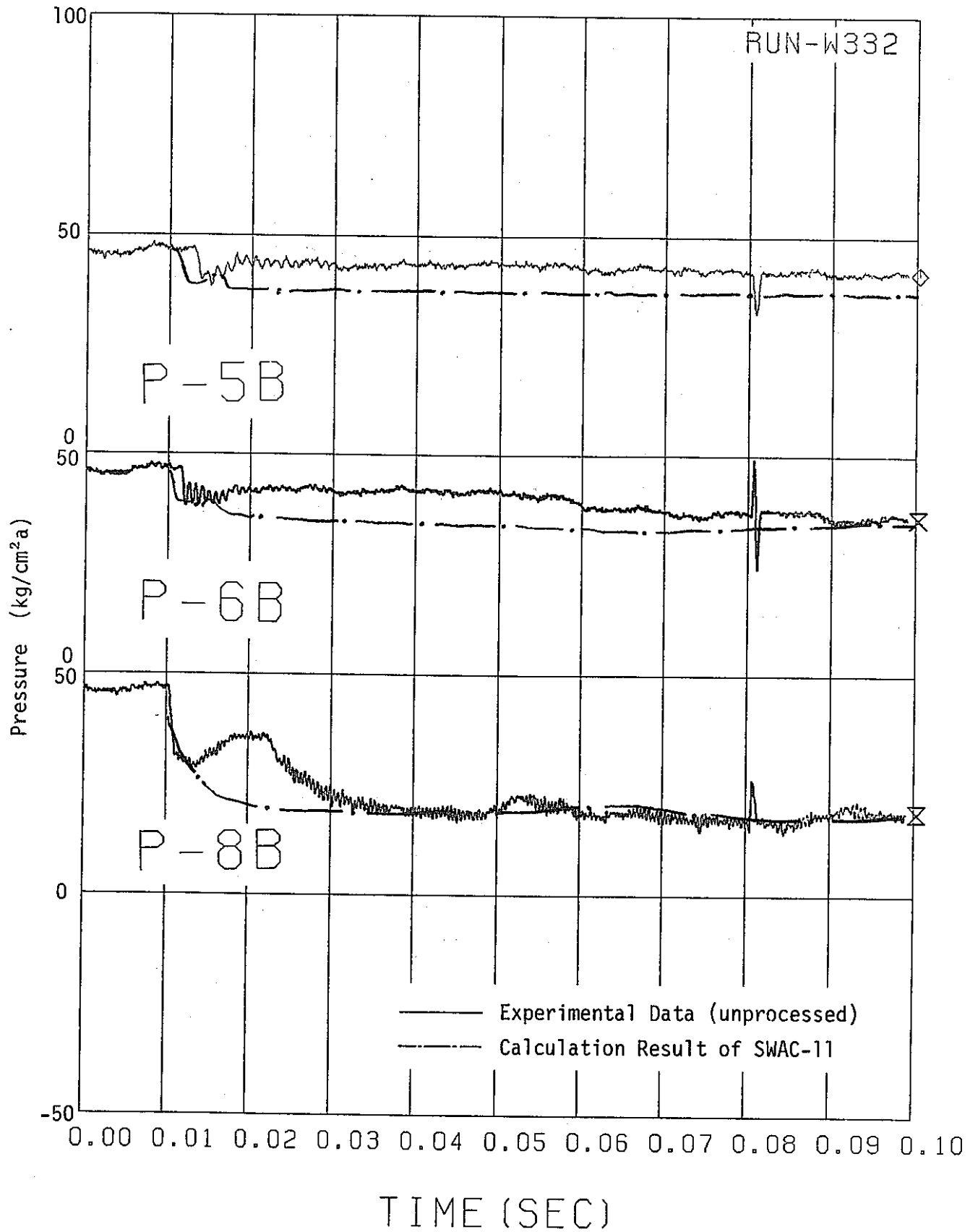


Fig. 4.7(2) Comparison of Pressure Transient in W332

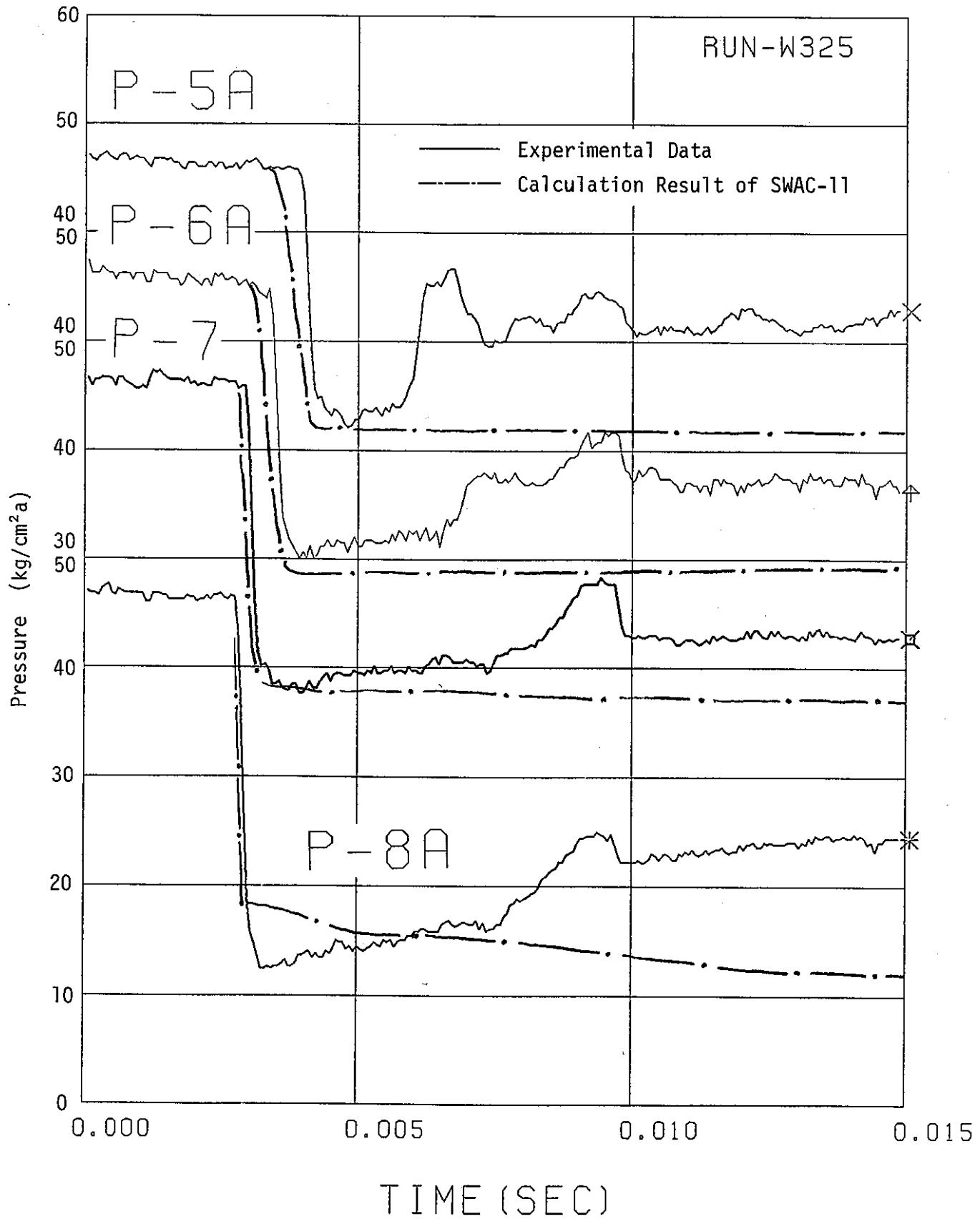


Fig. 4.8(1) Comparison of Pressure Transient in W325

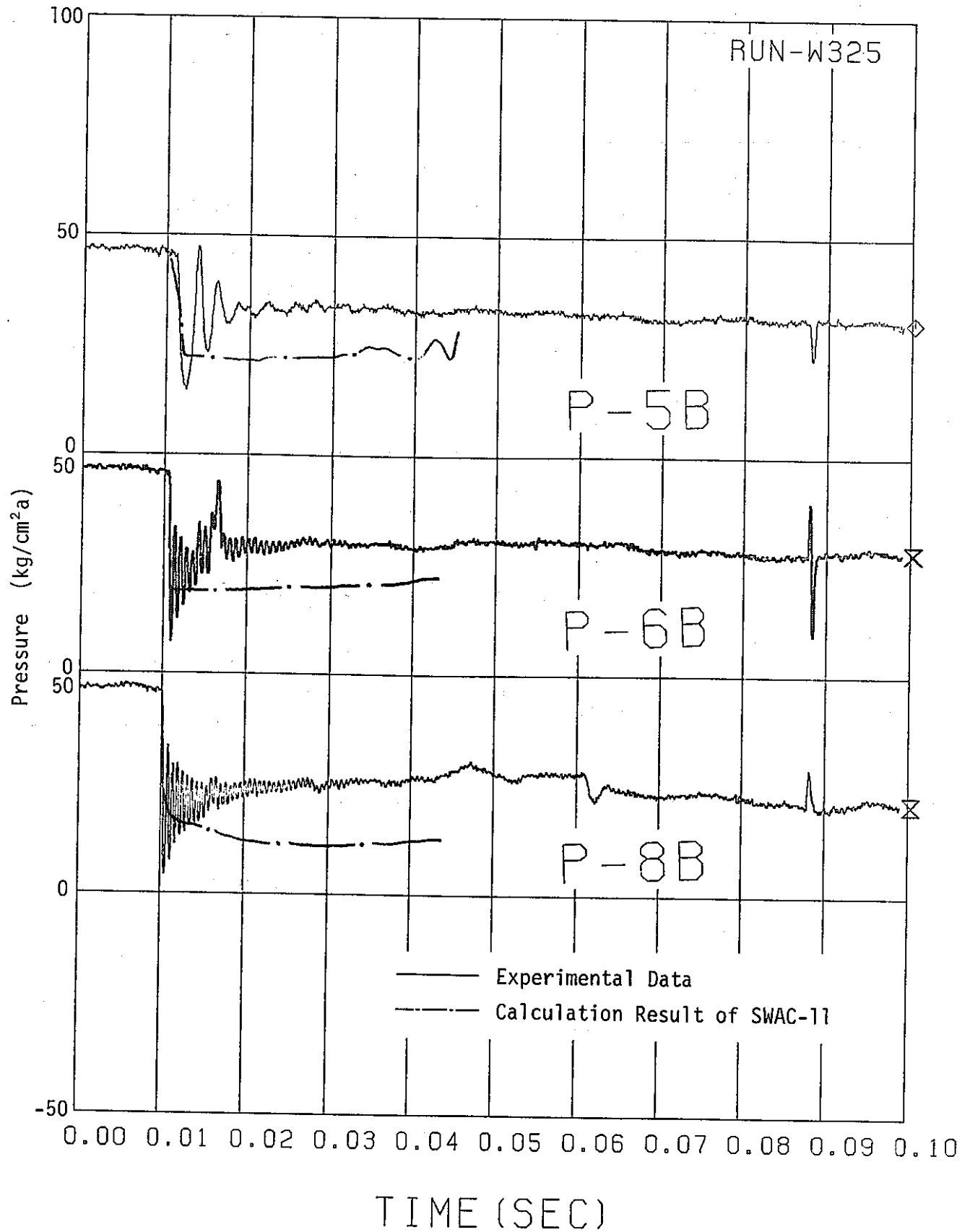


Fig. 4.8(2) Comparison of Pressure Transient in W325

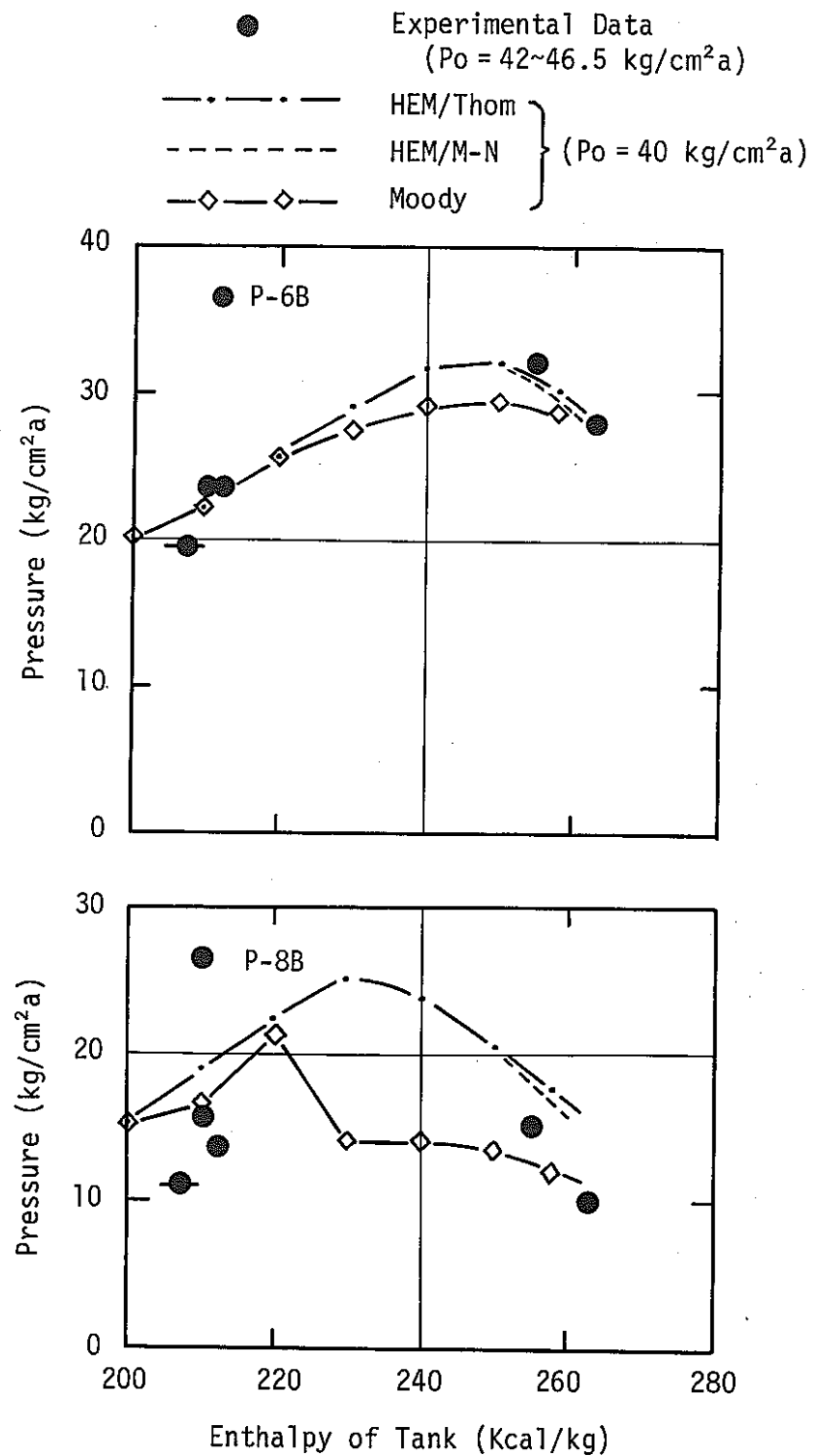


Fig. 4.9 Comparison of Steady Pressure

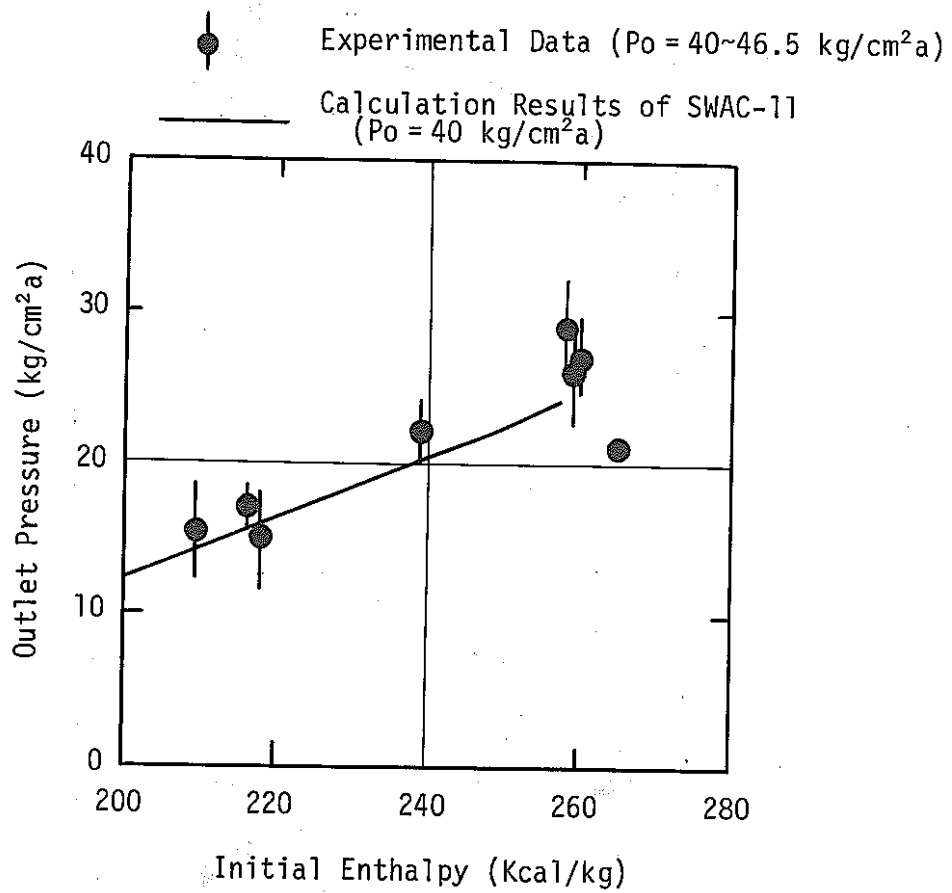


Fig. 4.10 Outlet Pressure immediately after Rupture Disk Burst

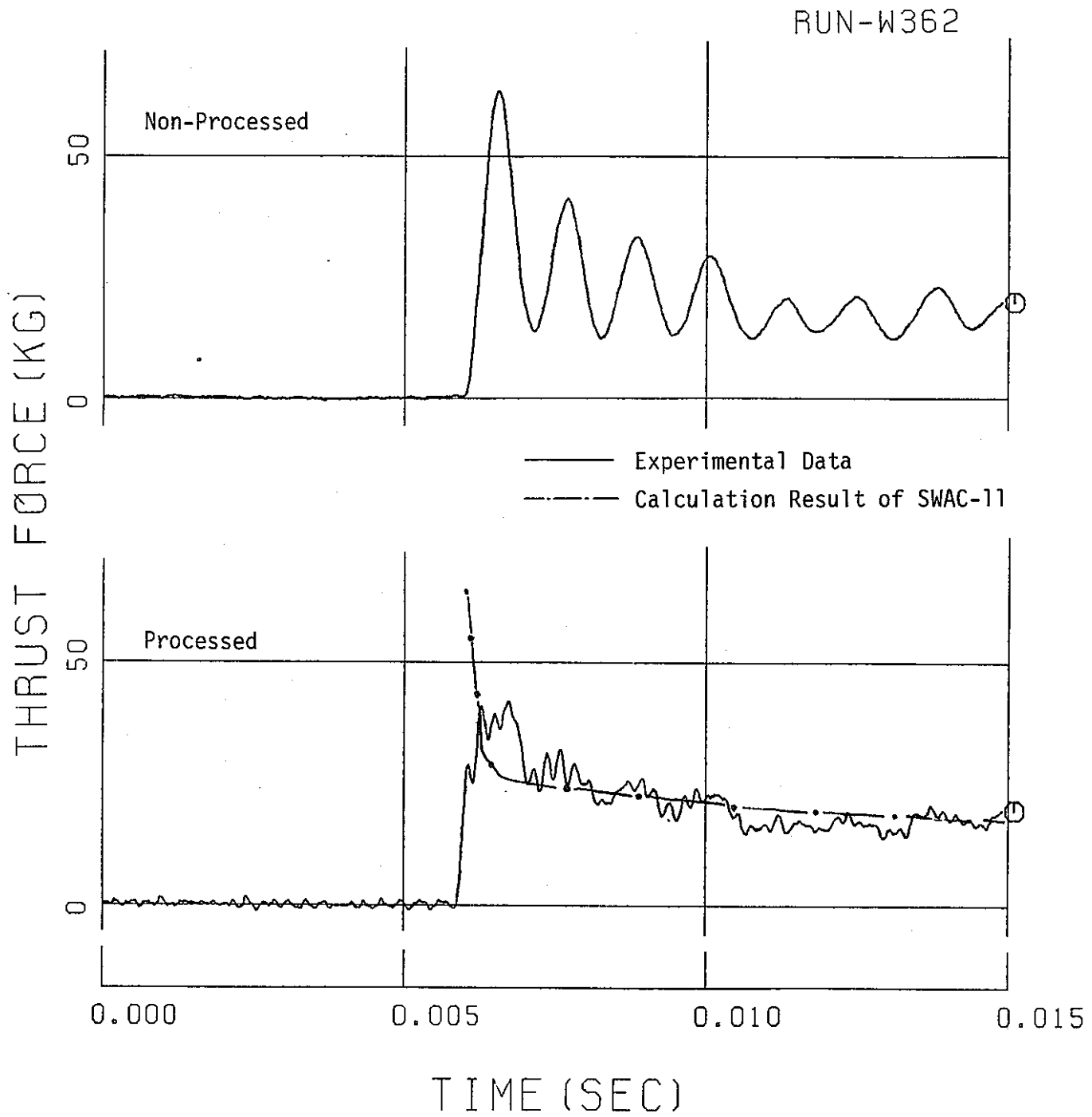


Fig. 4.11(1) Comparison of Initial Thrust Force Transient in W362

RUN-W362

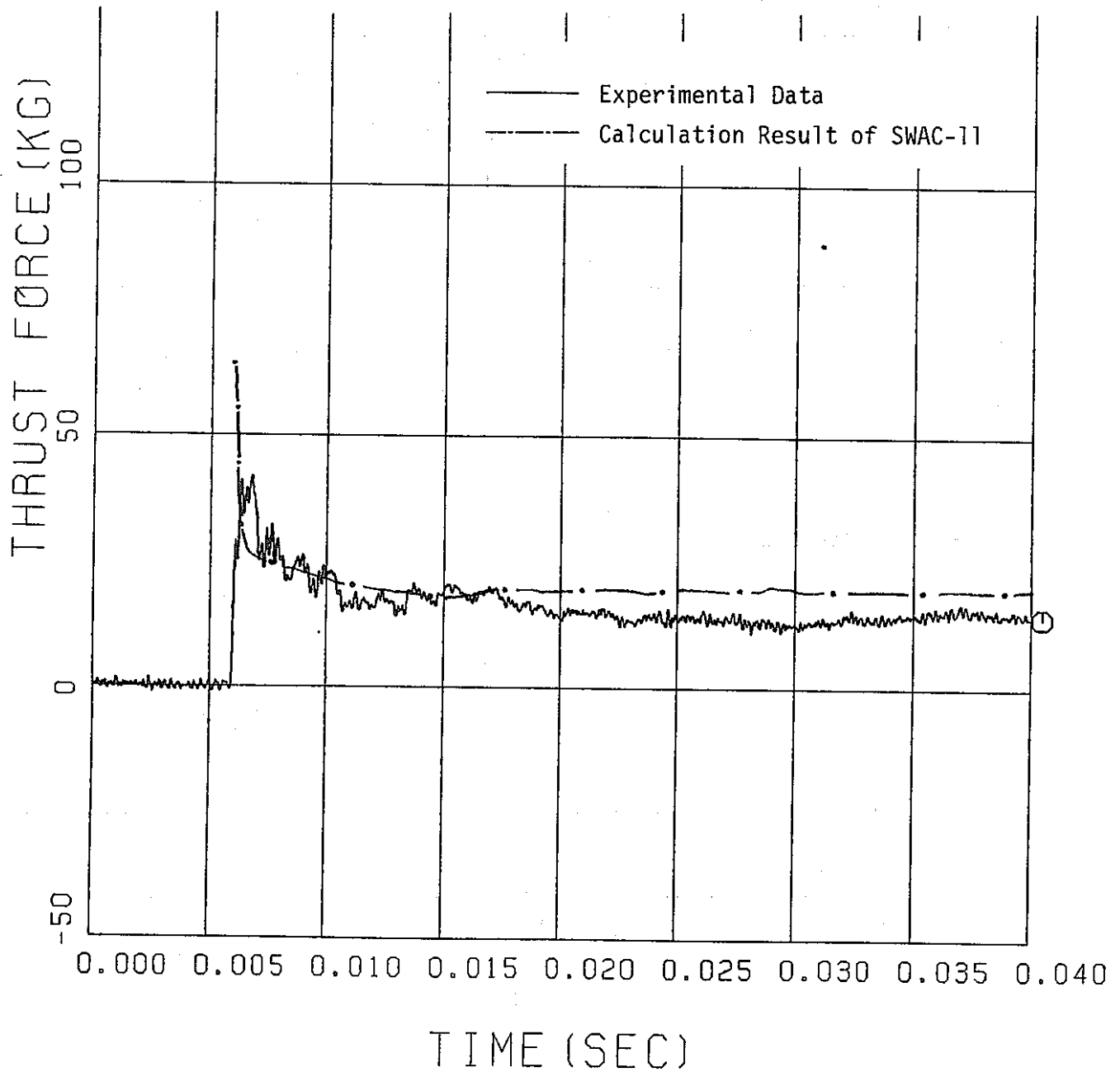


Fig. 4.11(2) Comparison of Initial Thrust Force Transient in W362

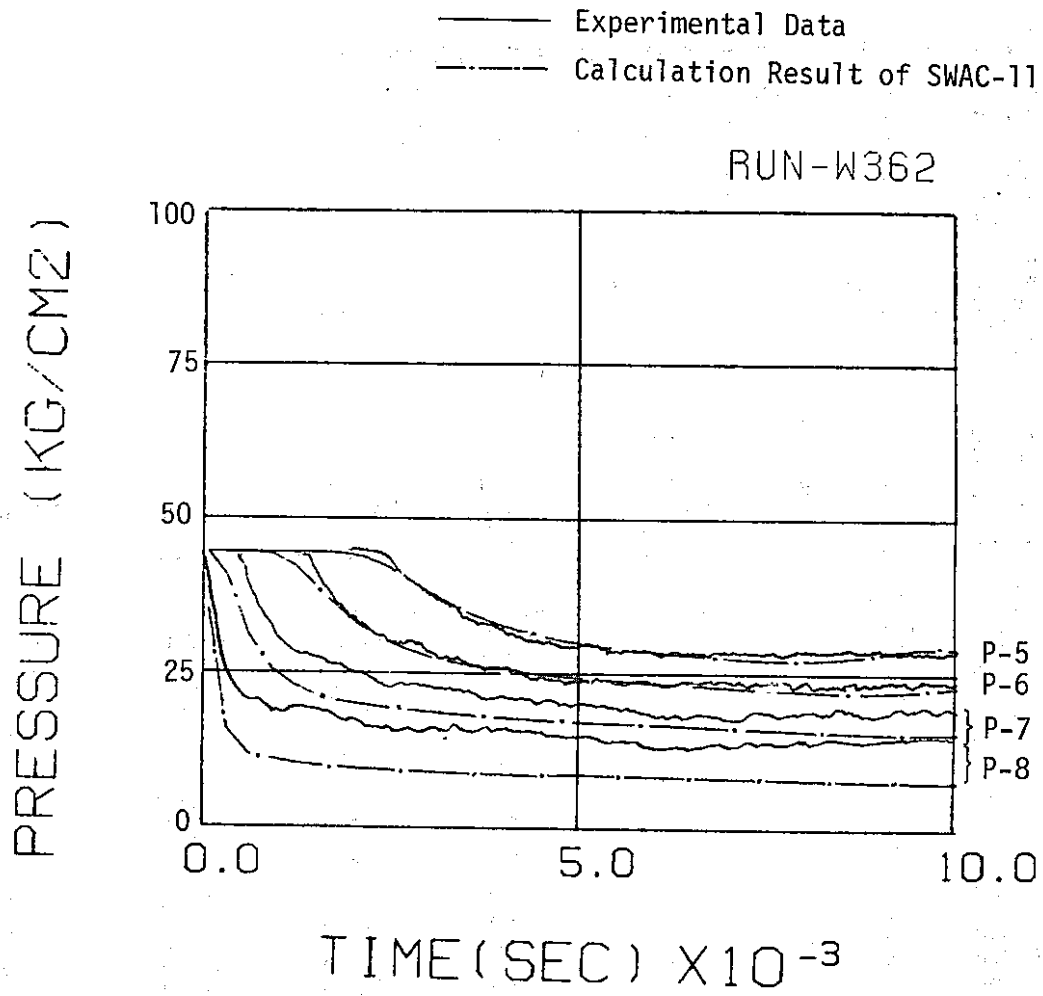


Fig. 4.12 Comparison of Pressure Transient in W362

Appendix 1 SWAC-11のインプットリスト

SWAC - 11 の計算条件 (タイプステップ, 空間分割数, 形状データ等) は, ガス噴出試験と同様である。従って, 詳細は第 1 報を参照されたい。

```

L
00010 ----- SWAC-11 POST-ANALYSIS OF WATER BLOWDOWN TEST -----
00020      1      1      1
00030      6      1      10000
00040     11     5      5      20      200      20      200
00050     16     5      1      10      100      20      200
00060     40     1      1
00070     51     1      1
00080     55     1      50
00090
00100      2      1      500.E-3
00110
00120      SWAC-11 DATA (UATSB2)
00130      1      6      155      0      1      1      1      28
00140     33     1      5
00150     37     3      1      0      0
00170     80     6      1      1      2      0      0      1
00180
00190      1      1      7.422
00200      5      1      5.0E-5
00210      7      1      1.571
00220     11     3      1.0
00230     14     5      50.E-6      50.E-6      50.E-6      50.E-6      50.E-6
00240     24     2      1.0
00250     31     4      81.
00260     44     1      1.0
00270     45     1      0.5
00290     111    4      40.E-3      1.82E-3      31.12E-3      1.15
00300     151    5      0.0      0.09      0.493      0.668      1.041
00310     156    5      1.353      1.743      1.943      2.243      2.510
00320     161    5      2.956      3.233      3.453      3.693      3.743
00330     166    5      4.041      4.240      4.472      4.829      4.942
00340     171    5      5.462      5.962      6.647      7.192      7.273
00350     176    3      7.312      7.398      7.422
00360     201    5      81.
00370     206    5      81.
00380     211    5      81.
00390     216    5      81.
00400     221    5      81.
00410     226    5      81.
00420     251    5      313.0      313.0      313.0      313.0      313.0
00430     256    5      313.0      313.0      313.0      313.0      313.0
00440     261    5      313.0      313.0      313.0      313.0      313.0
00450     266    5      313.0      313.0      313.0      313.0      313.0
00460     271    5      313.0      313.0      313.0      313.0      313.0
00470     276    5      313.0      313.0      313.0      313.0      313.0
00480     351    5      21.2E-3      21.2E-3      21.2E-3      21.2E-3      21.2E-3
00490     356    5      21.2E-3      21.2E-3      21.2E-3      21.2E-3      21.2E-3
00500     361    5      21.2E-3      21.2E-3      21.2E-3      21.2E-3      21.2E-3
00510     366    5      21.2E-3      10.9E-3      10.9E-3      10.9E-3      10.9E-3
00520     371    5      10.9E-3      10.9E-3      10.9E-3      10.9E-3      10.9E-3
00530     376    5      10.9E-3      10.9E-3      10.9E-3      10.9E-3      10.9E-3
00540     401    5      34.0E-3      34.0E-3      34.0E-3      34.0E-3      34.0E-3
00550     406    5      34.0E-3      34.0E-3      34.0E-3      34.0E-3      34.0E-3
00560     411    5      34.0E-3      34.0E-3      34.0E-3      34.0E-3      34.0E-3
00570     416    5      34.0E-3      17.3E-3      17.3E-3      17.3E-3      17.3E-3
00580     421    5      17.3E-3      17.3E-3      17.3E-3      17.3E-3      17.3E-3
00590     426    5      17.3E-3      17.3E-3      17.3E-3      17.3E-3      17.3E-3
00600     451    5      0.0
00610     456    5      22.07      0.0      0.1      0.0      0.0
00620     461    5      0.98      0.0      0.1      0.1      0.0
00630     466    5      0.0      0.0      22.07      0.1      0.0
00640     471    5      0.0      0.0      0.1      0.0      0.1
00650     476    3      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
00660
END OF DATA SET
    
```

Appendix 2 平均水噴出率の検討

試験中に破断口から流出する総水噴出量は、Fig. A. 2-1に示したように、水加熱器内での減量(W_L)とバルブ下流に試験前に存在していた水の量(下流の容積を V 、比重量を γ_i とすると $V\gamma_i$ で表わされる)の和である。

ところで、 W_L は液面計によって計測されている。

一方、バルブを閉める時の各状態量をFig. A. 2-2に示した。図中の斜線部は、その時の配管内平均比重量を $\bar{\gamma}$ とする $V\bar{\gamma}$ である。

従って、バルブが開いていた時間に破断口から流出した水量は、

$$(W_L + V\gamma_i - V\bar{\gamma}) \text{ で表わされる。}$$

$V = 575(\text{cm}^3)$ なので、本試験でブローダウン時間が短い時には($V\gamma_i - V\bar{\gamma}$)は無視し得ない量である。しかし、ブローダウン時間が長く、 W_L が10 kg程度の時は、相対的に小さくなるし、 γ_i と $\bar{\gamma}$ はそれほど差がないので、全体は W_L で近似できる。

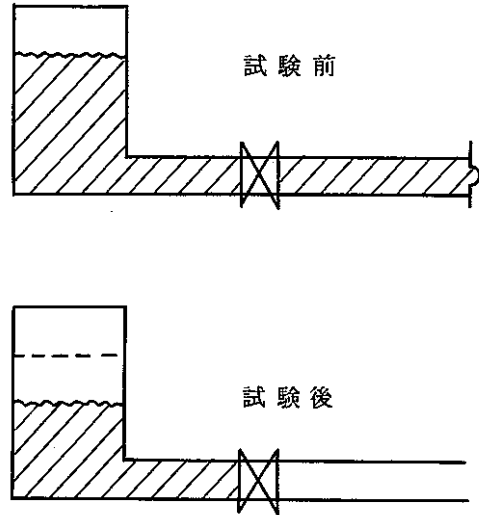


Fig. A. 2-1 試験前後の状態

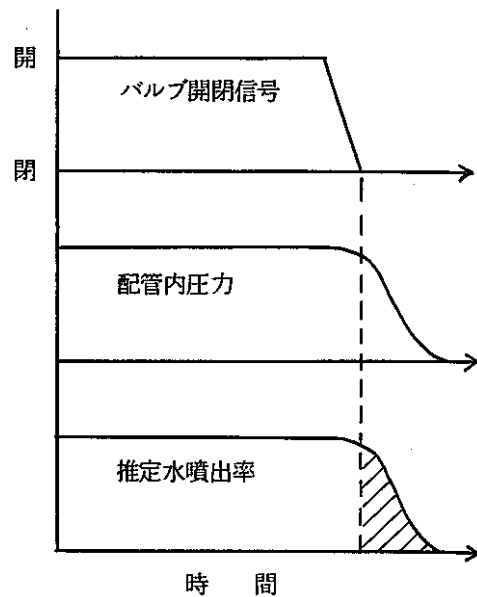


Fig. A. 2-2 各状態量の時間変化

Appendix 3 真空中に膨張する際の状態量の変化

開放系での熱力学第1法則は、次式で表わされる。

$$\delta Q + \delta m_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2g} \right) = \delta W + \delta m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2g} \right) + d \left(U + \frac{mV^2}{2g} \right) \dots\dots\dots (A 3.1)$$

ここで、
 δQ : 入熱 δW : 外への仕事
 δm : 系を出入する質量 h : 系を出入するエンタルピー
 V : 速度 U : 系の内部エネルギー
 添字 i : 流入, e : 流出

ここで真空中に膨張し、系は断熱されているとすると、

$$\delta Q = 0 \quad , \quad \delta W = 0 \quad , \quad \delta m_e = 0 \quad \dots\dots\dots (A 3.2)$$

また、運動エネルギーは無視すると、

$$\delta m_i h_i = dU$$

両辺を積分すると（最終状態の内部エネルギーを U_2 , 比内部エネルギーを u_2 とすると）

$$m_i h_i = U_2 = m_i u_2 \quad \dots\dots\dots (A 3.3)$$

つまり、 $h_i = u_2$ となり、系内の内部エネルギーは流入するエンタルピーに等しい。

破断直前のエンタルピー、内部エネルギー、圧力、比容積を h, u, p, v とすると

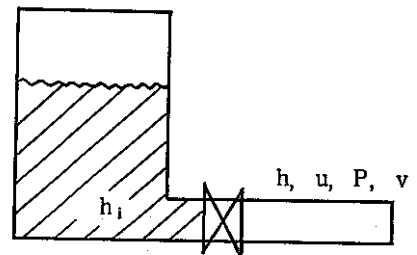
$$\begin{aligned} h &= u + APv \\ &= h_0 + AP(v' + x(v'' - v')) \quad \dots\dots (A 3.4) \end{aligned}$$

ここで、 A は仕事の熱当量、 x はクォリティ。

$$\text{また、} h = h' + x(h'' - h') \quad \dots\dots (A 3.5)$$

であり、(A 3.4)(A 3.5) 式より

$$x = \frac{h_0 - h' + APv'}{h'' - h' - AP(v'' - v')} \quad \dots\dots (A 3.6)$$



が求まり、(A 3.5) からエンタルピーも算出される。(h', h'', v', v'' は、圧力 P での液相、気相のエンタルピー、比容積である。)

計算結果を下表に示す。

試験No.	条件	P = 40 ata 仮定	P = 50 ata 仮定
	W 3 4 1	h	3 0 8
W 3 4 2	x	0 . 0 8 5	0 . 1 2 4
W 3 5 1	h	3 6 7	3 6 9
	x	0 . 2 3 7	0 . 2 6 9

Appendix 4 Run-W212 試験データ

- | | |
|----------------------|--|
| Fig. A. 4-1 ~A. 4-3 | Thrust Force Transient |
| Fig. A. 4-4 | Pressure Transient |
| Fig. A. 4-5 | Pressure and Temperature
in Water Heater Tank |
| Fig. A. 4-6 ~A. 4-10 | Temperature Transient |

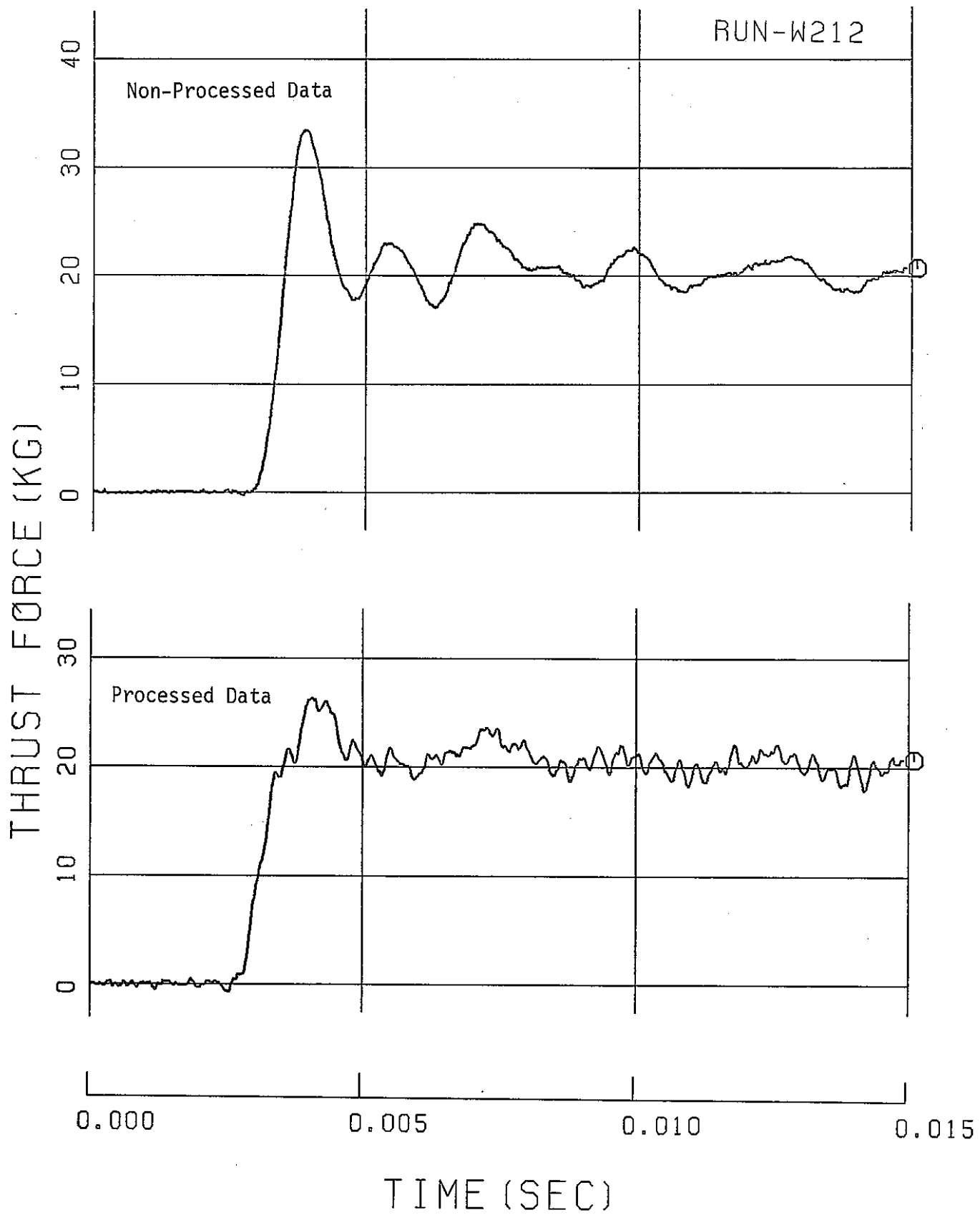


Fig. A.4-1 Thrust Force Transient

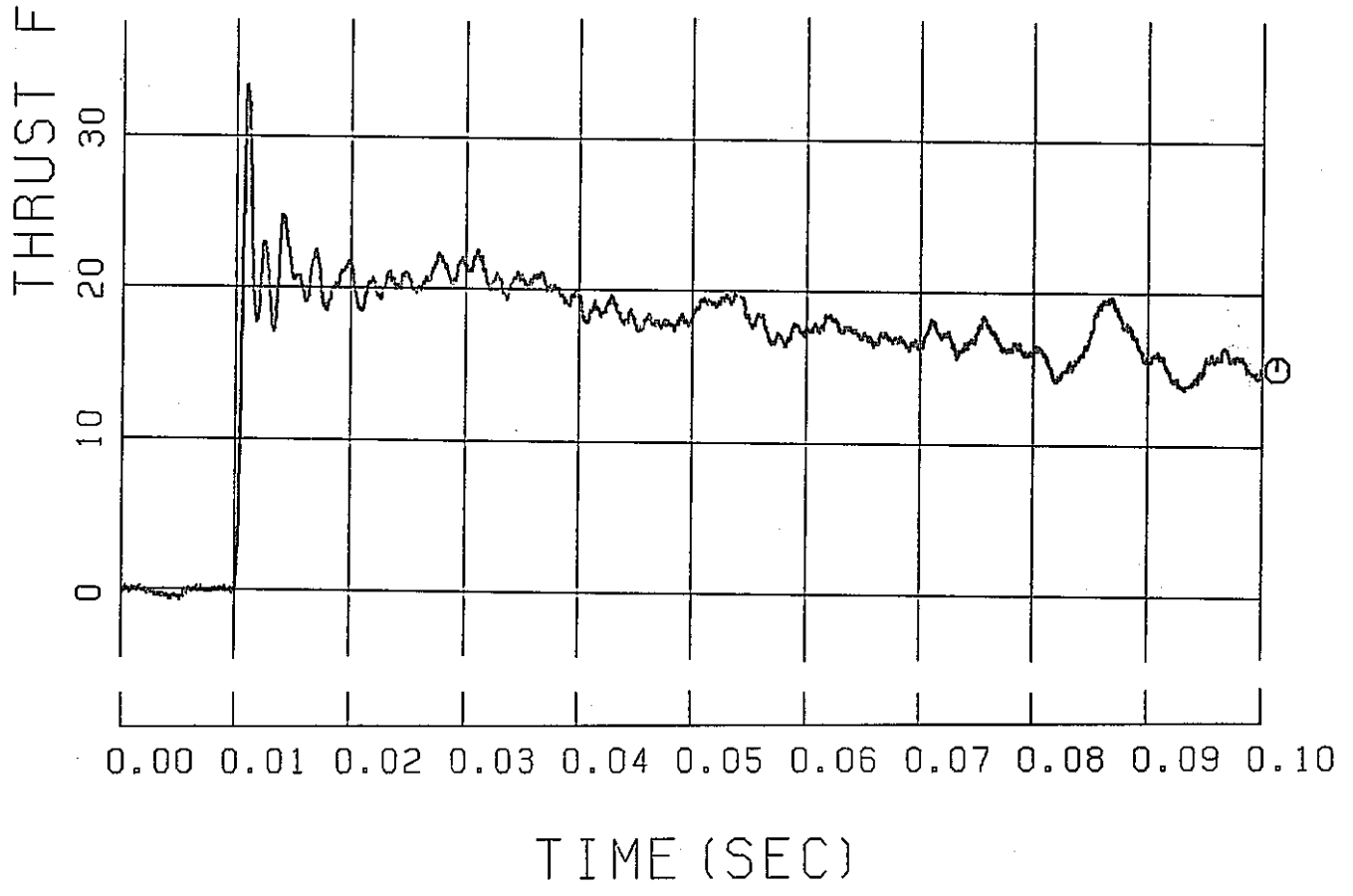
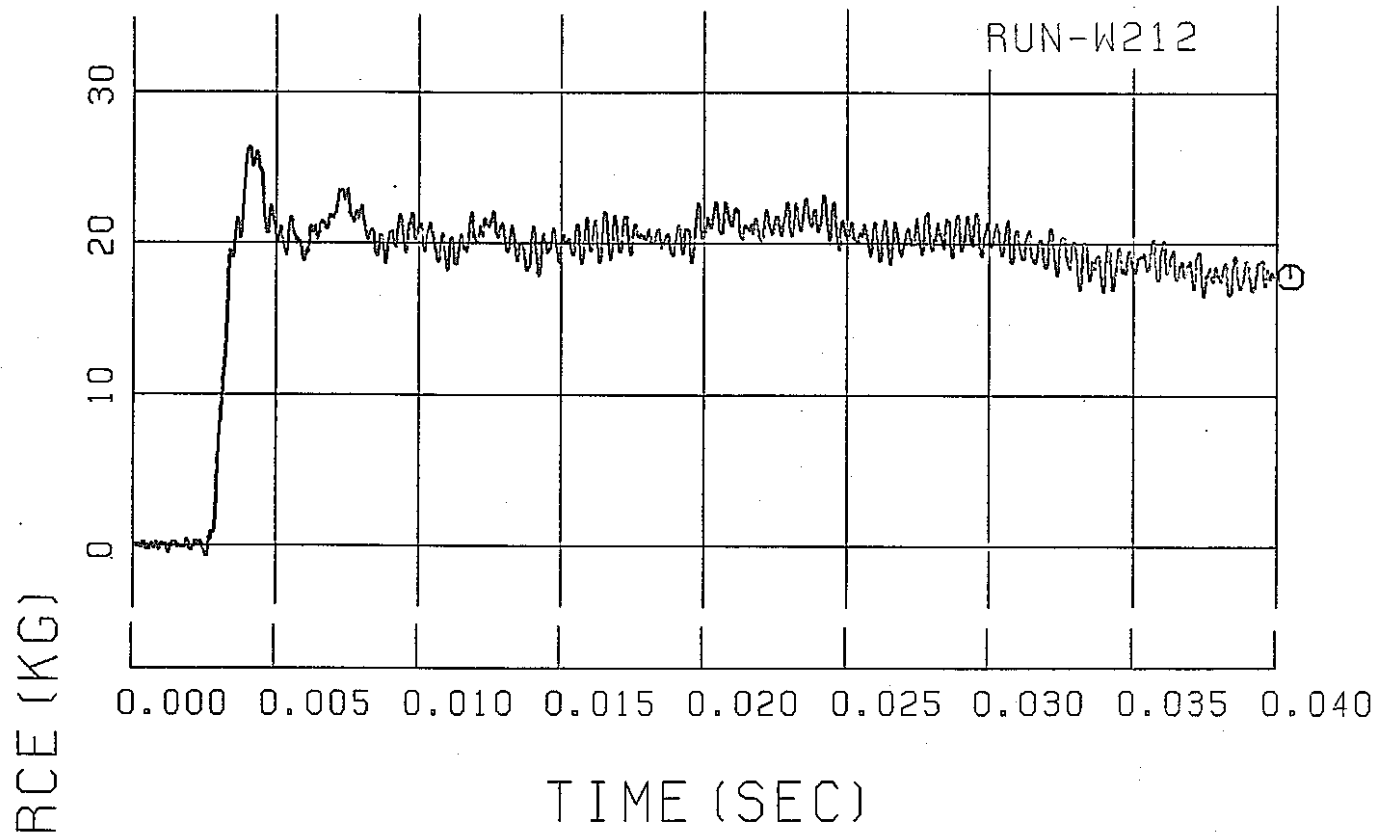


Fig. A.4-2 Thrust Force Transient

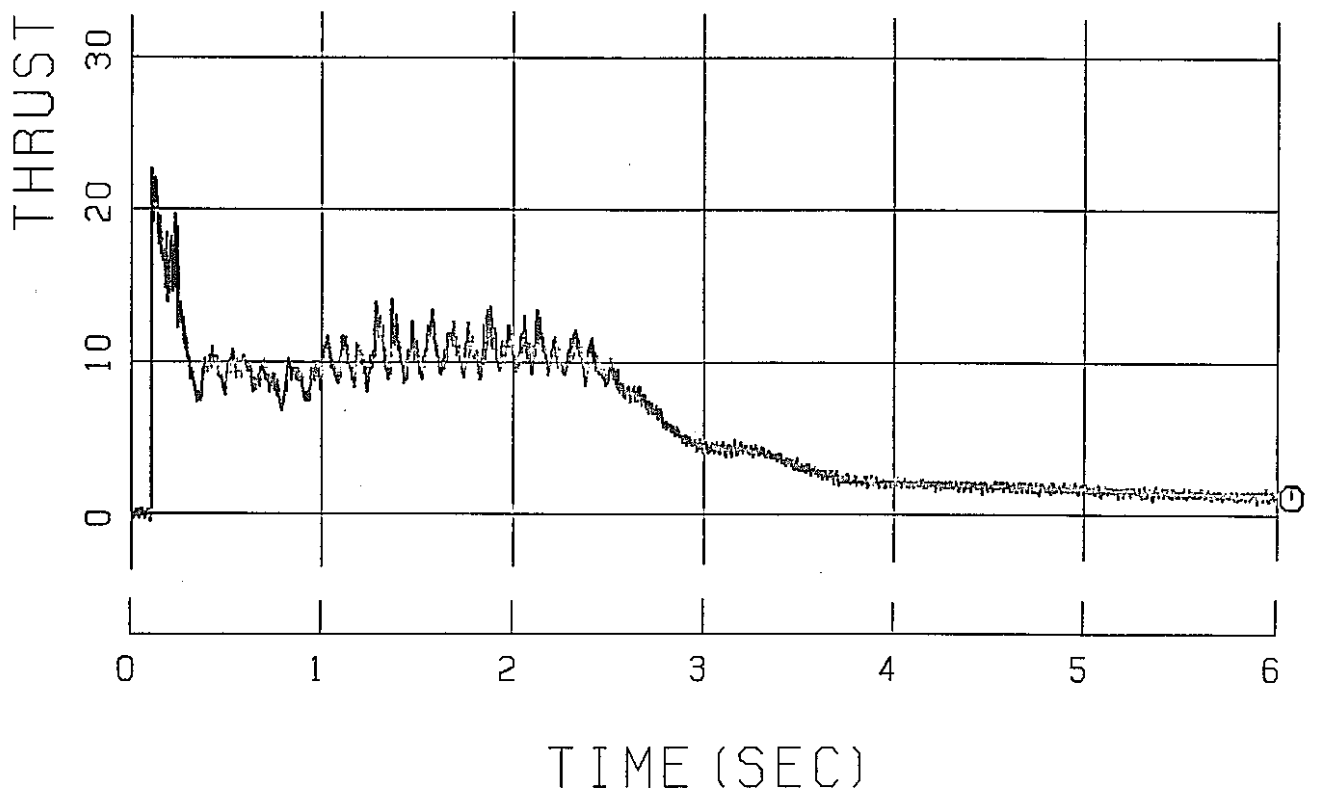
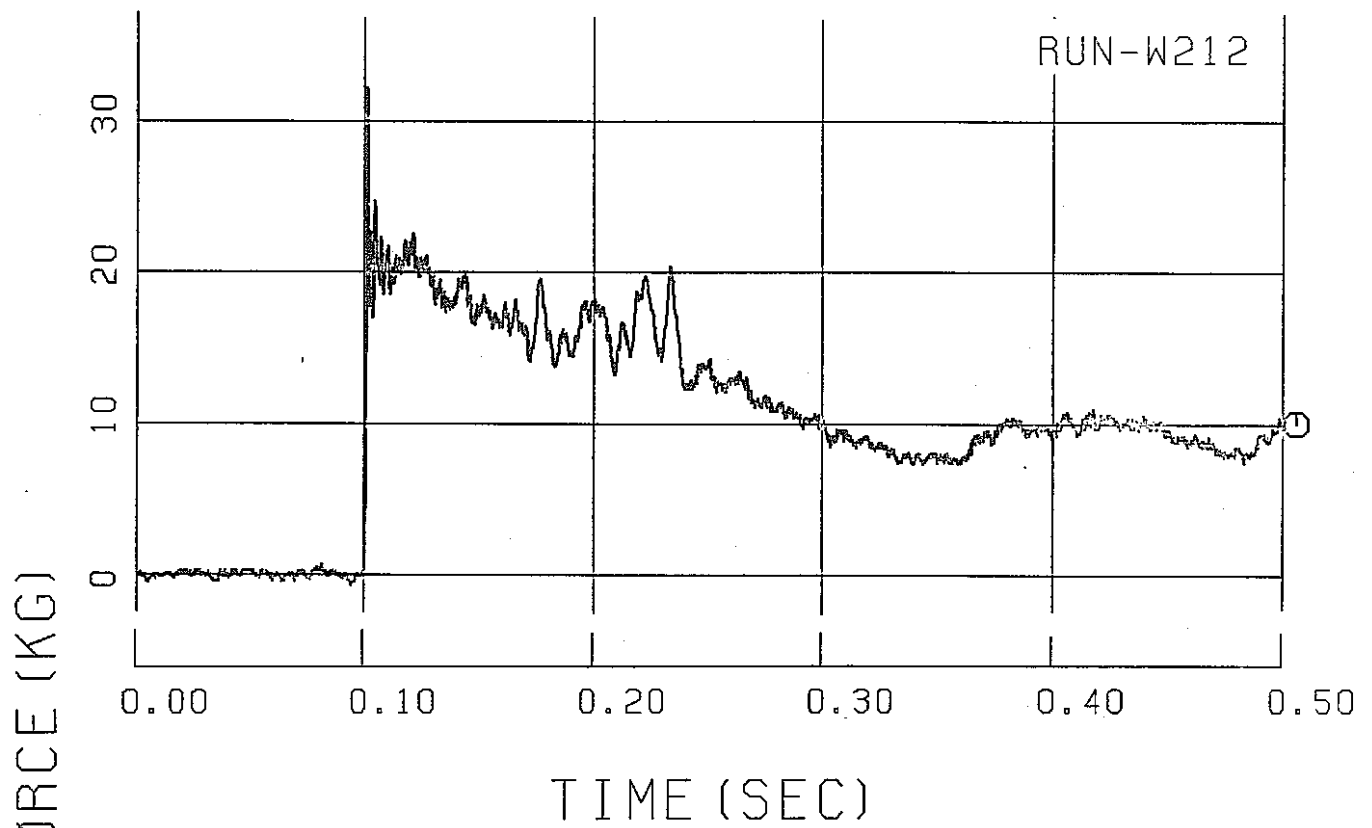


Fig. A.4-3 Thrust Force Transient

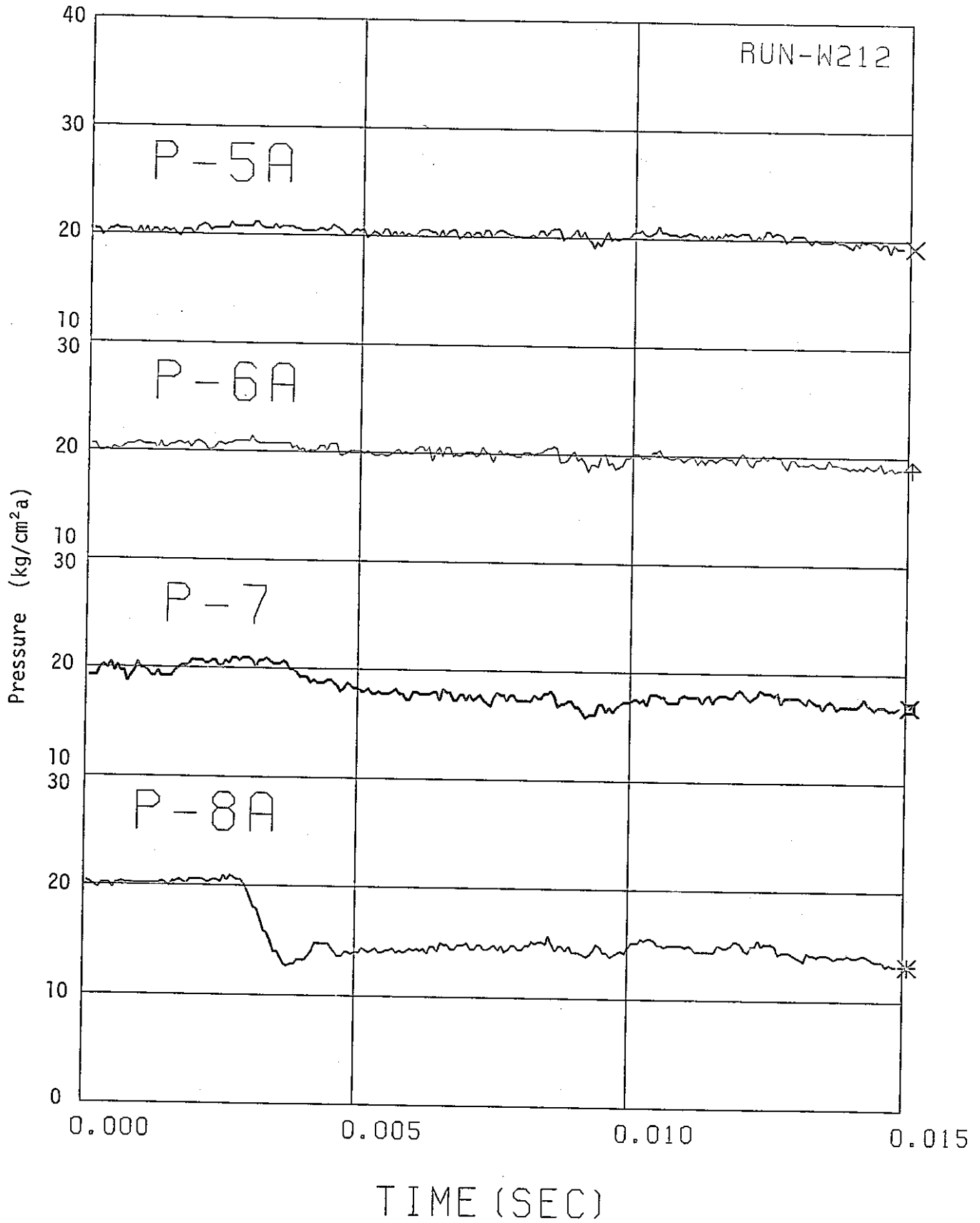


Fig. A.4-4 Pressure Transient

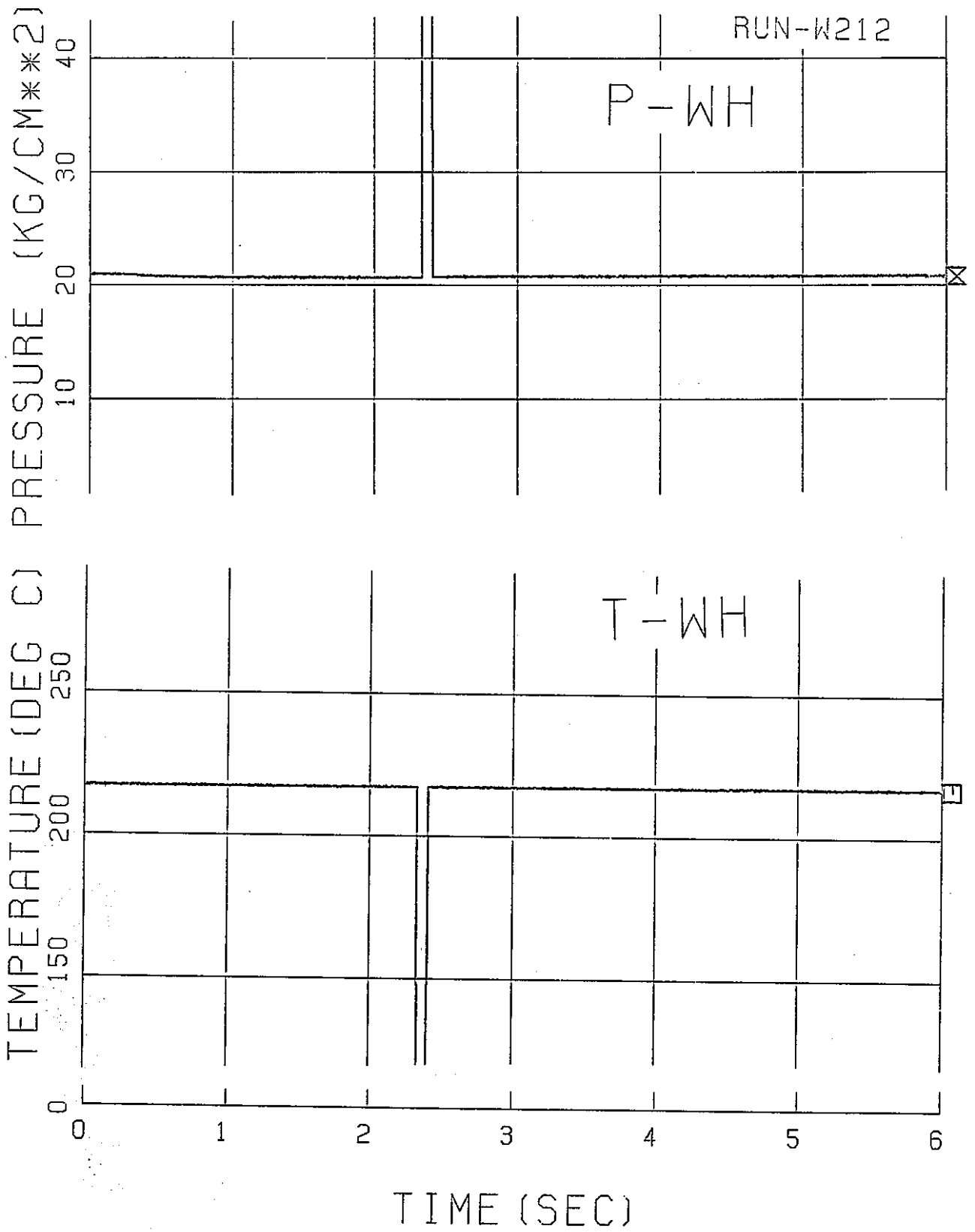


Fig. A.4-5 Pressure and Temperature in Water Heater Tank

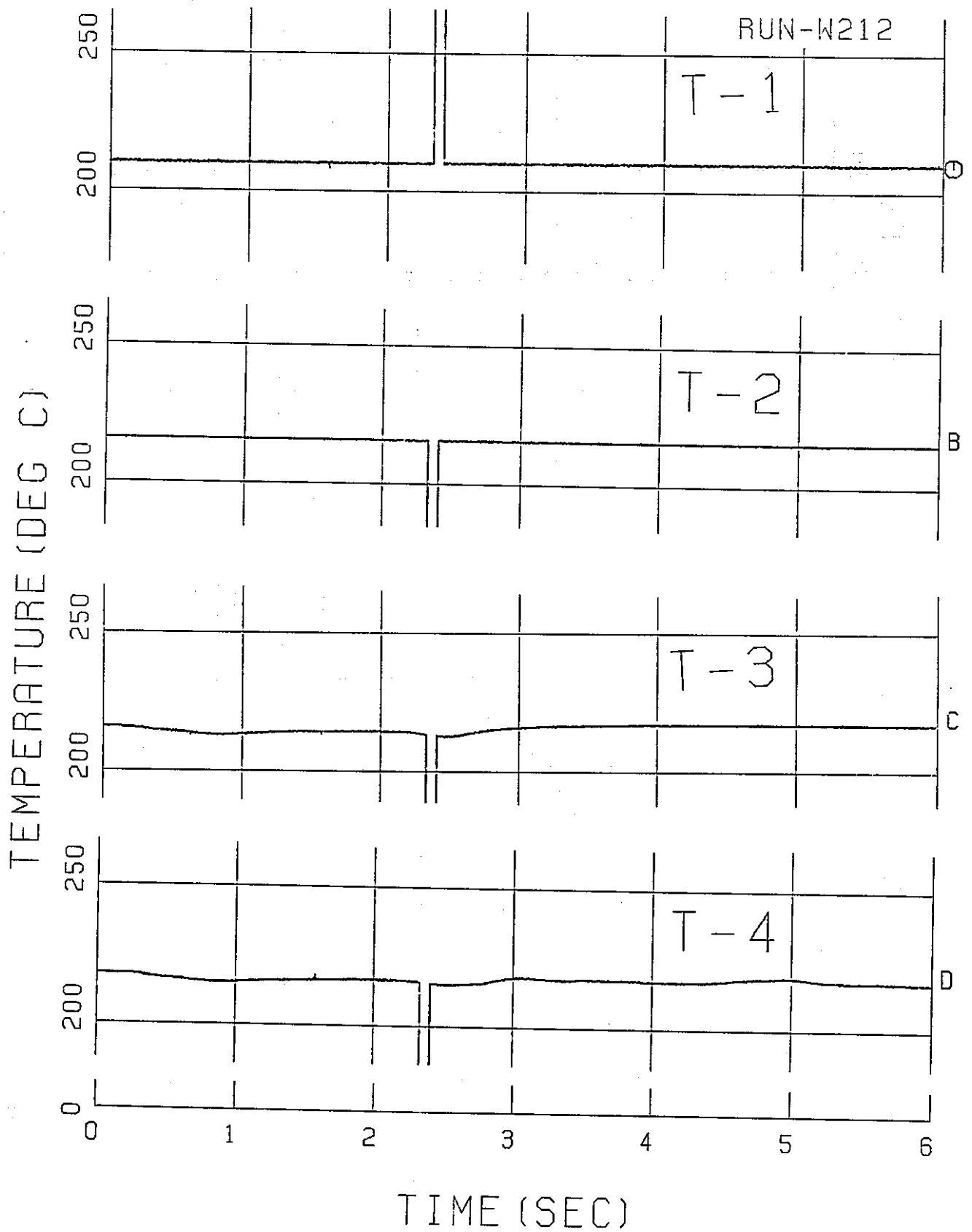


Fig. A.4-6 Temperature Transient

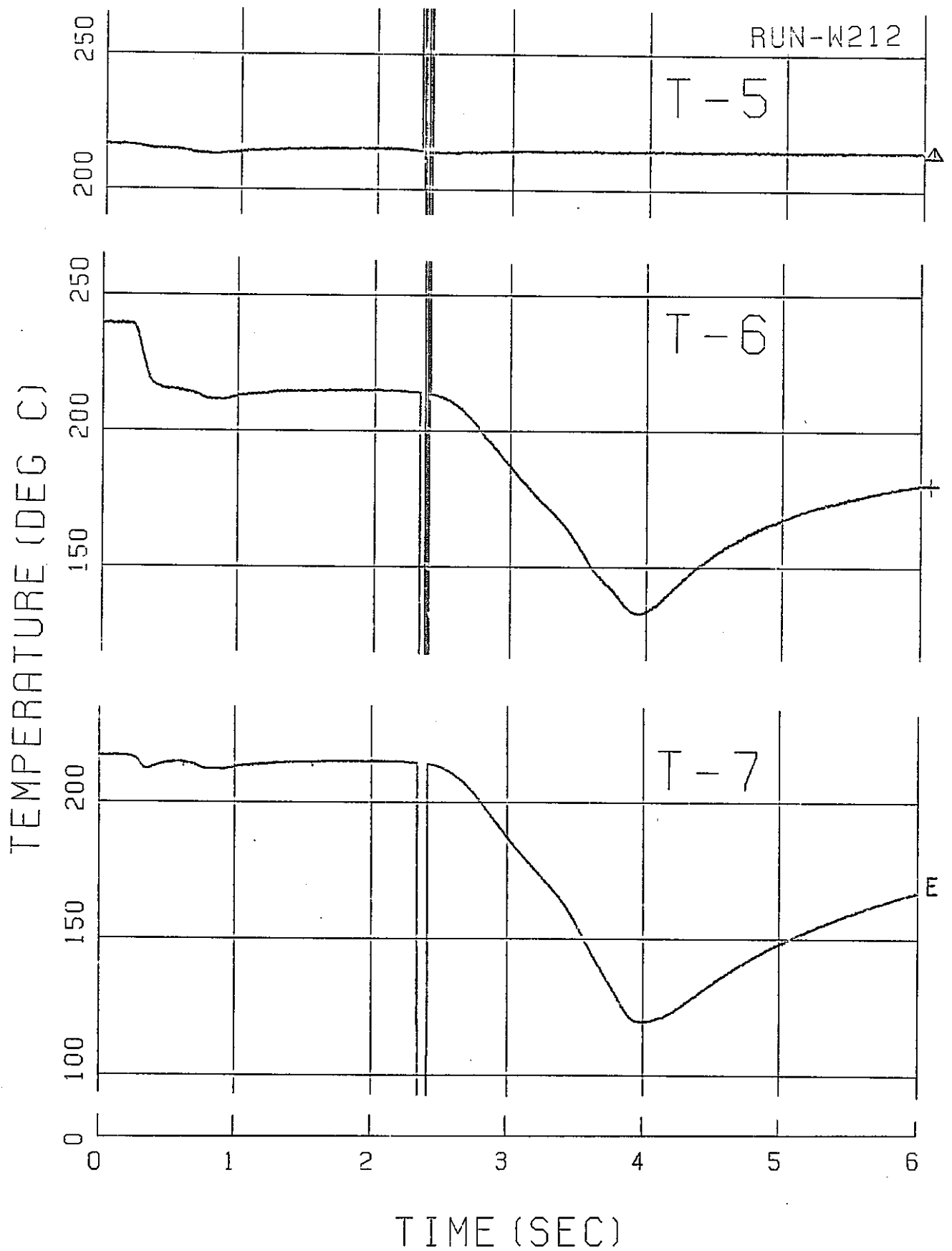


Fig. A.4-7 Temperature Transient

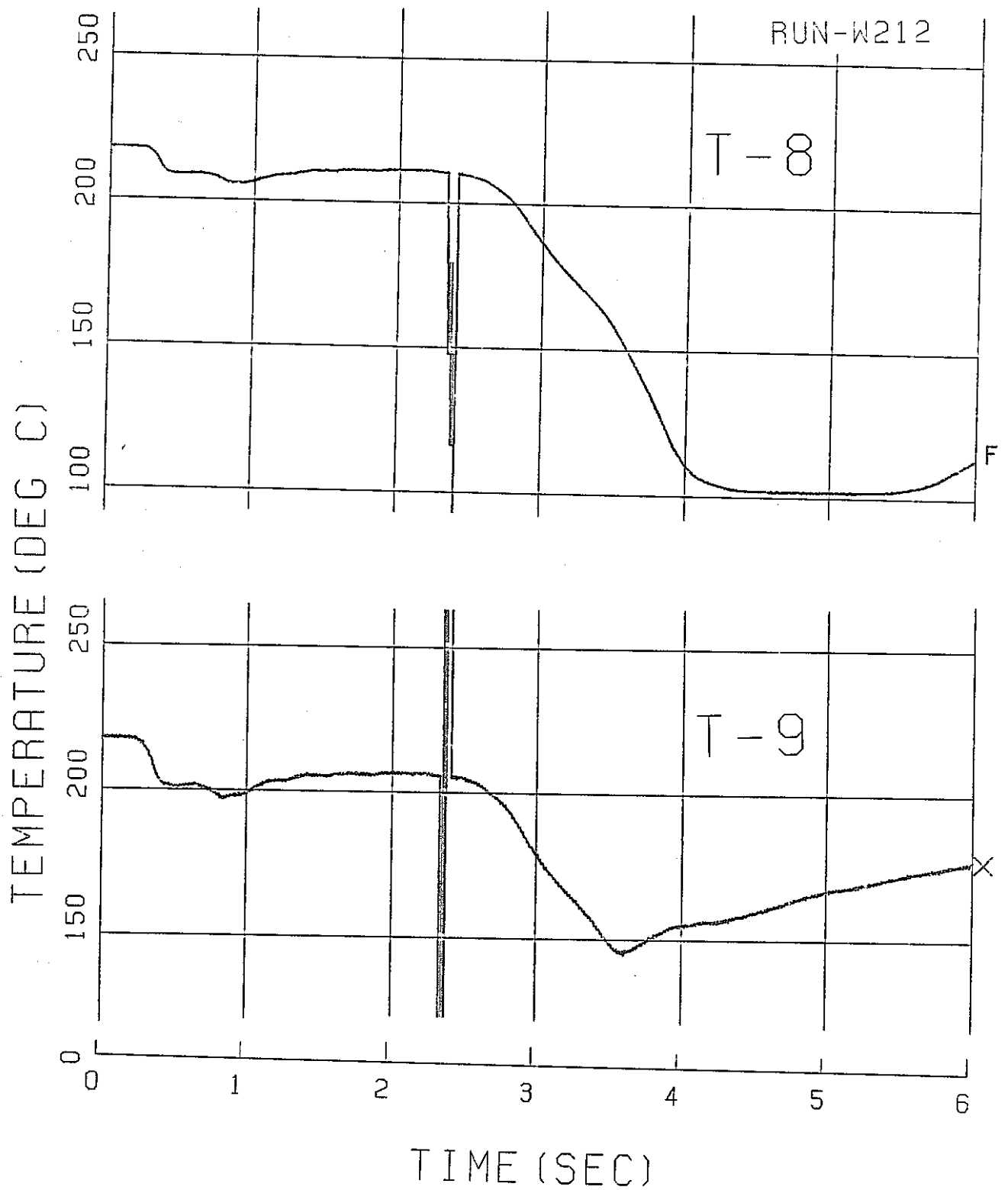


Fig. A.4-8 Temperature Transient

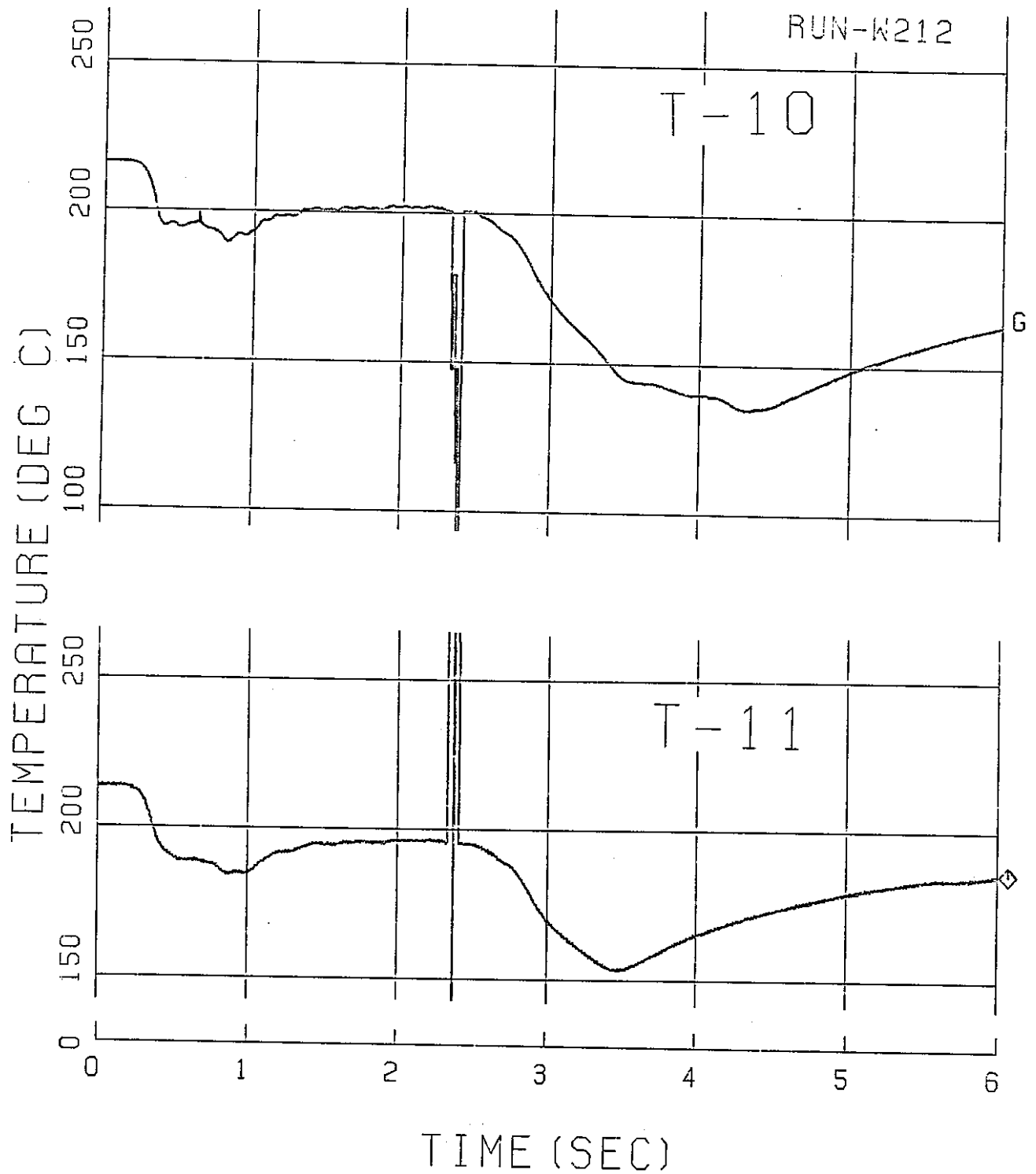


Fig. A.4-9 Temperature Transient

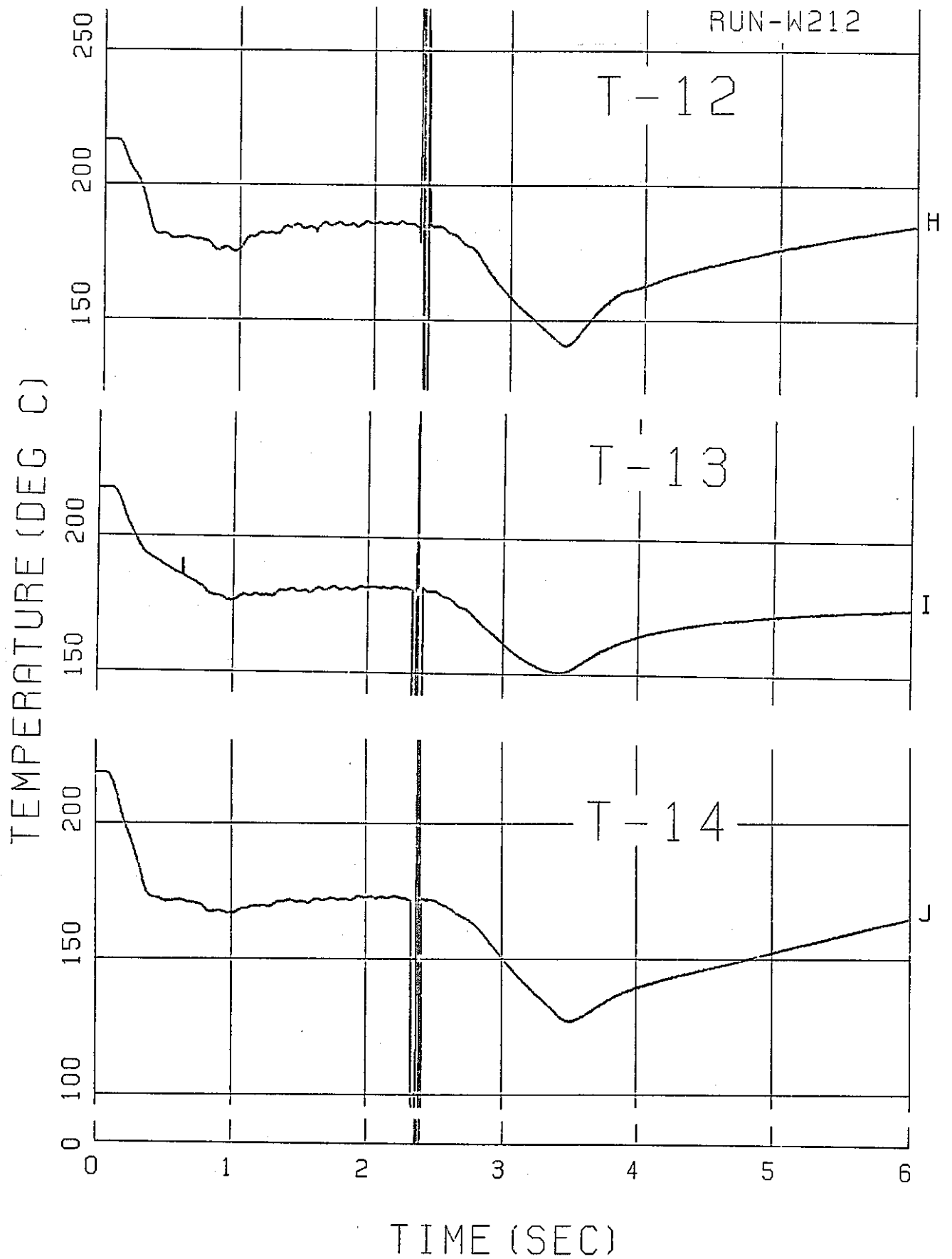


Fig. A.4-10 Temperature Transient

Appendix 5 Run-W221 試験データ

- | | |
|---------------------------|--|
| Fig. A. 5 - 1 ~ A. 5 - 3 | Thrust Force Transient |
| Fig. A. 5 - 4 | Pressure Transient |
| Fig. A. 5 - 5 | Pressure and Temperature
in Water Heater Tank |
| Fig. A. 5 - 6 ~ A. 5 - 10 | Temperature Transient |

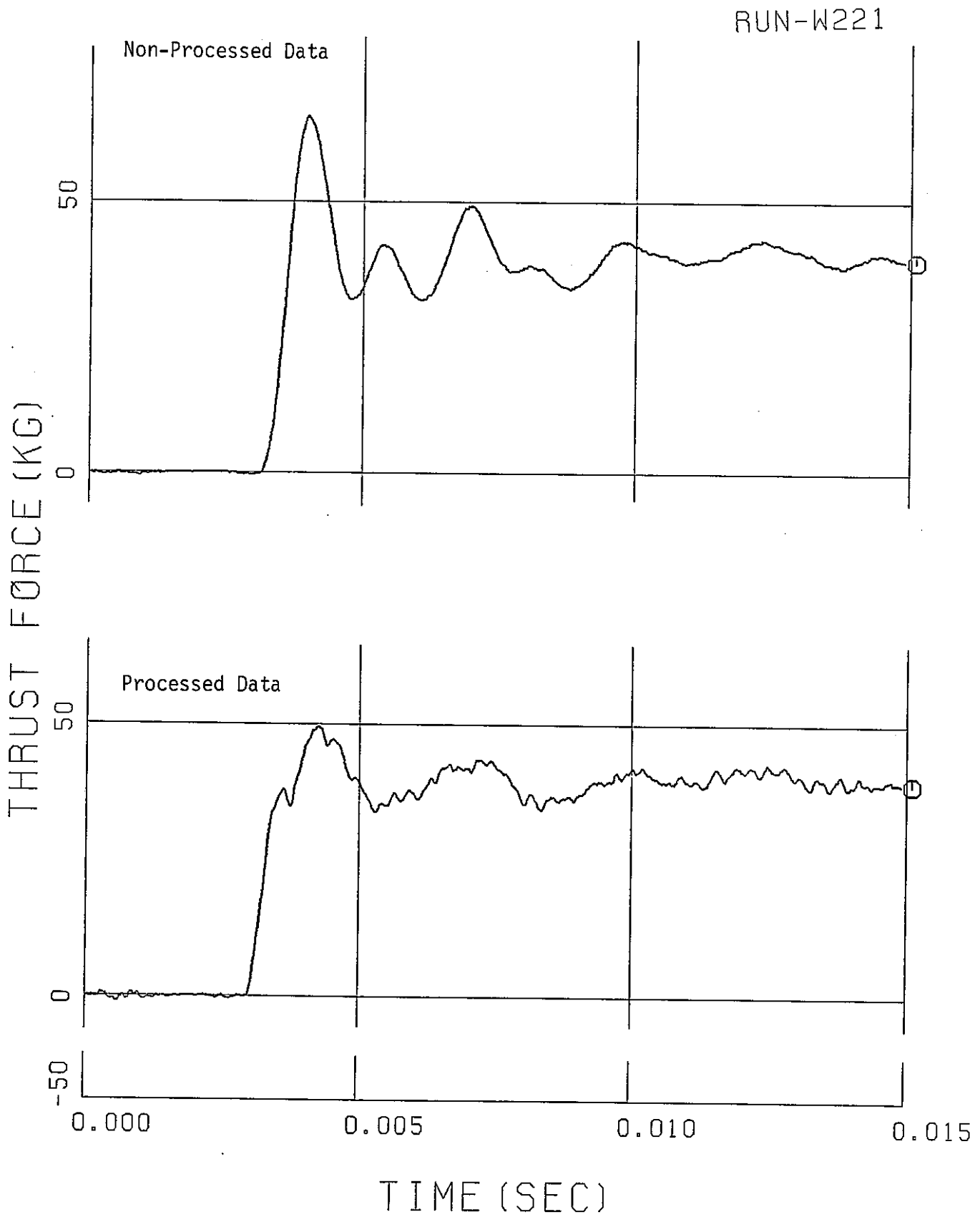


Fig. A.5-1 Thrust Force Transient

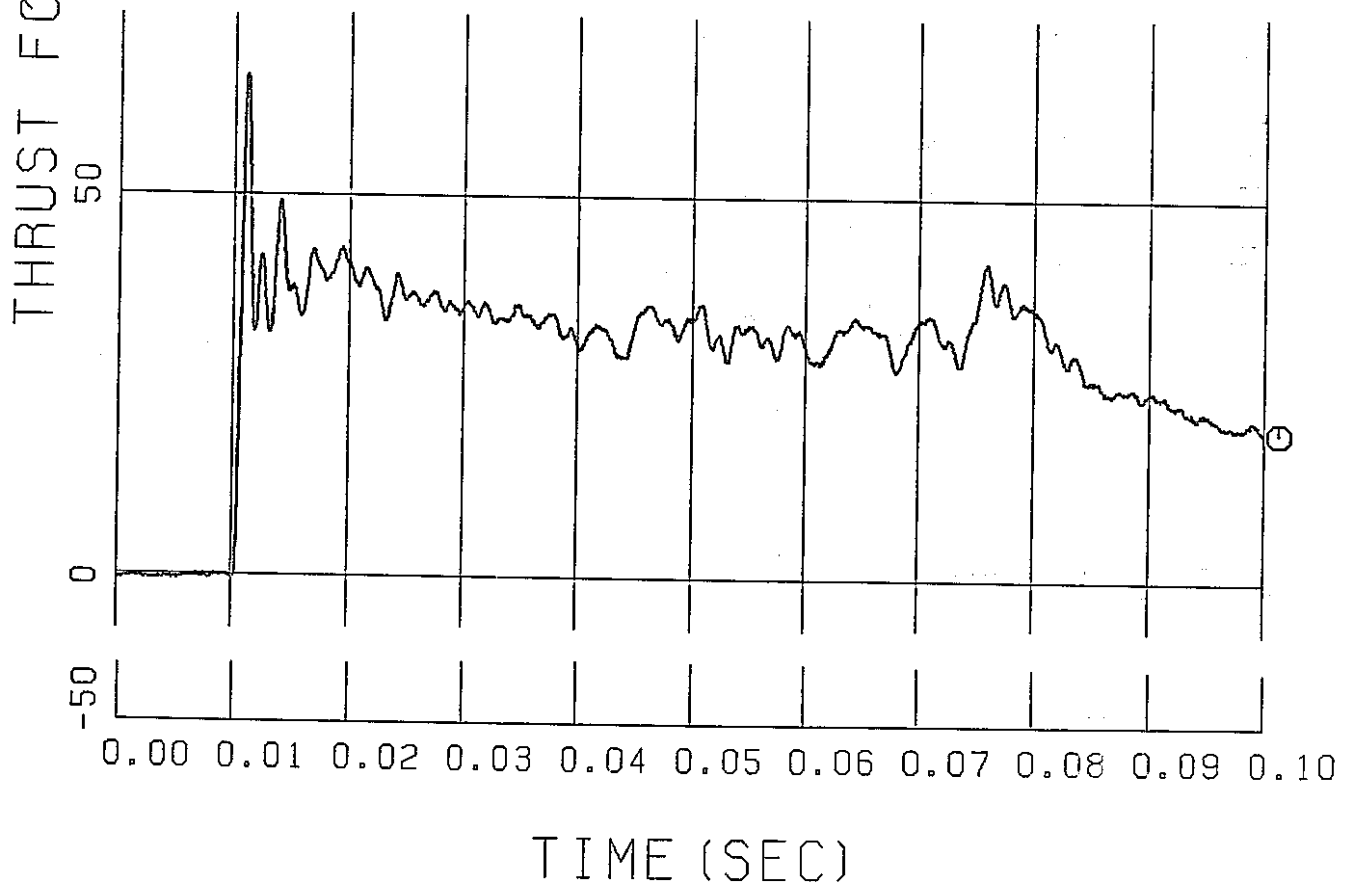
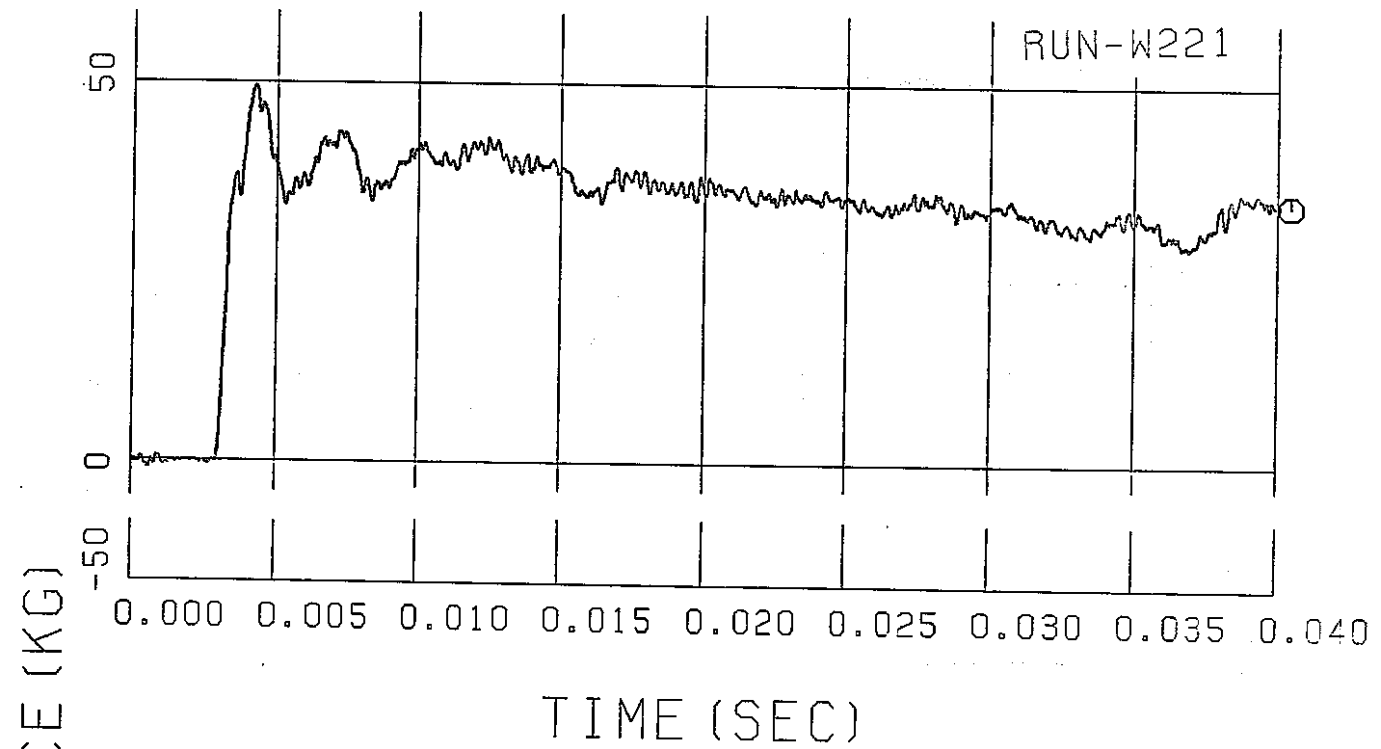


Fig. A.5-2 Thrust Force Transient

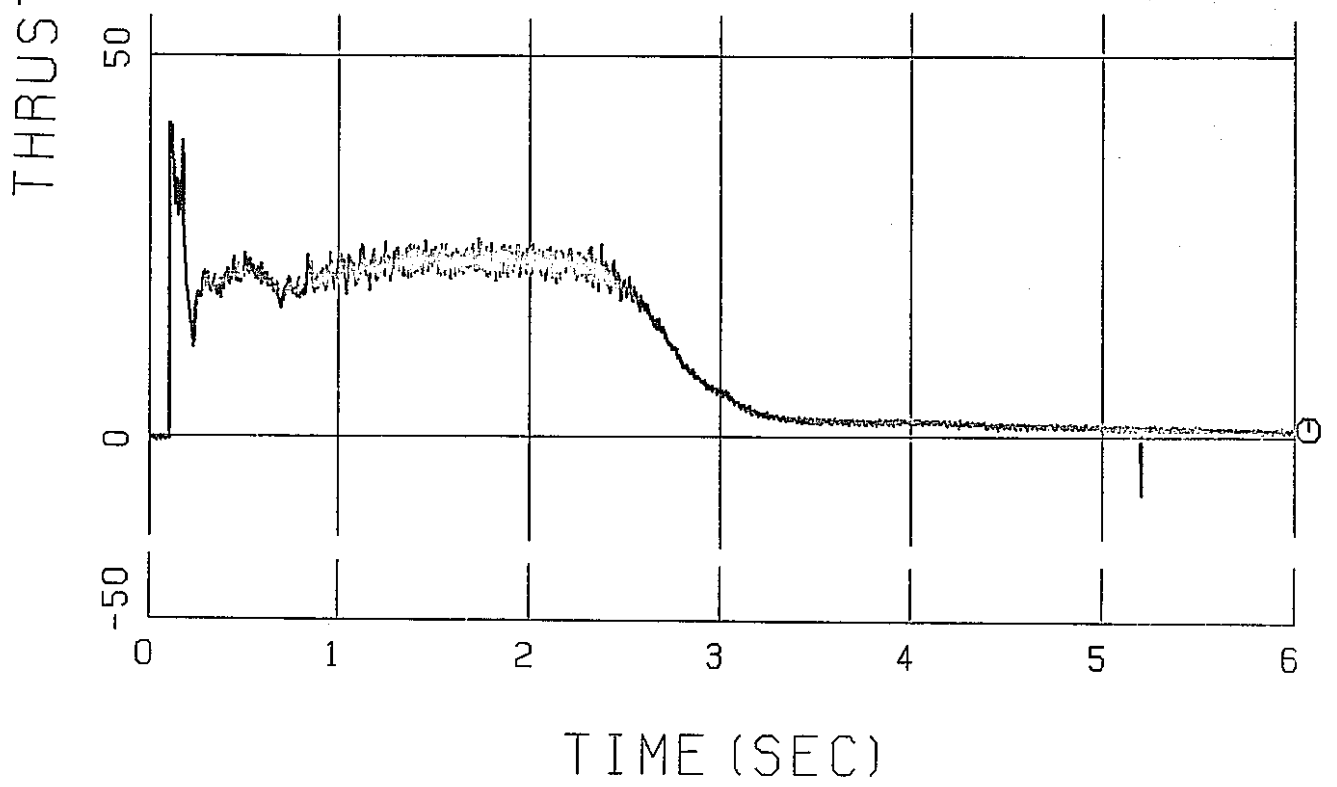
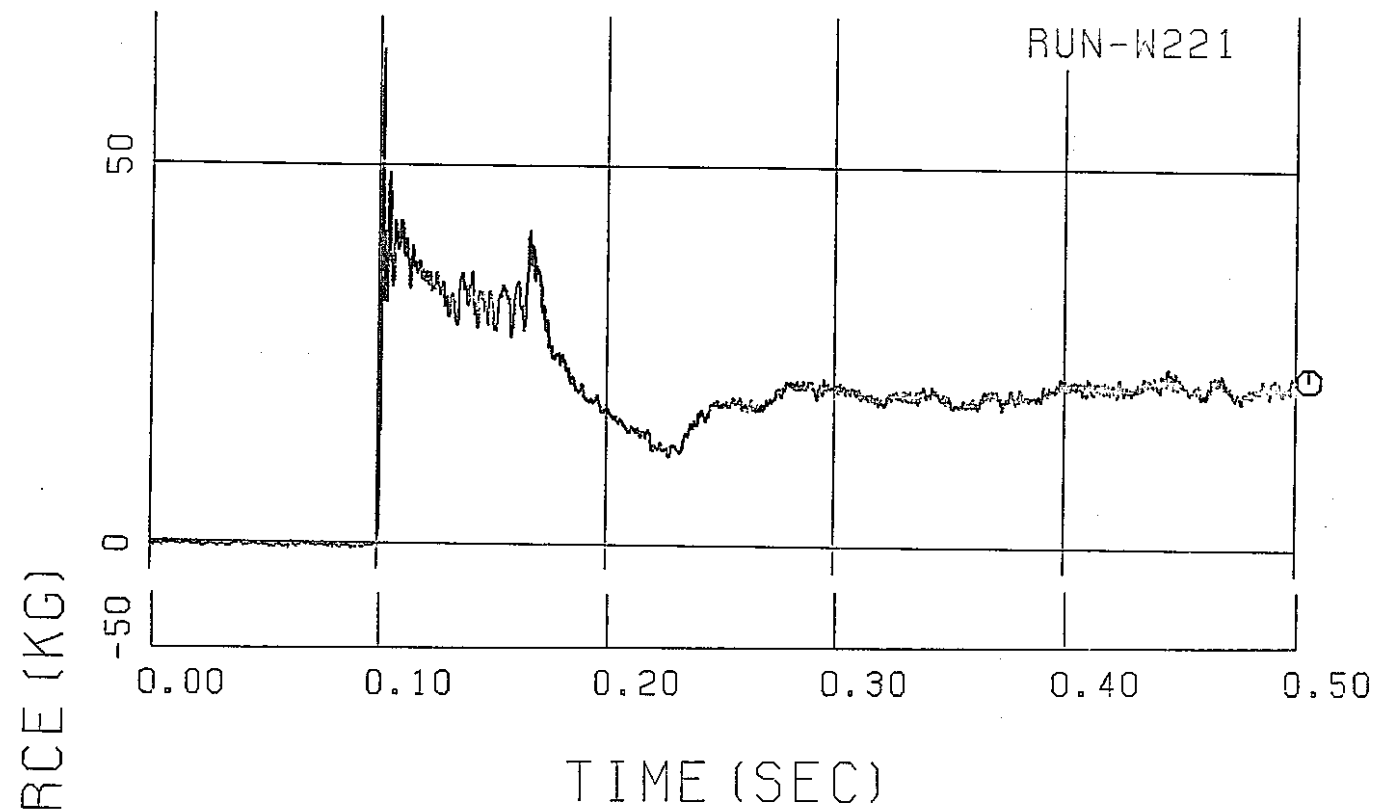


Fig. A.5-3 Thrust Force Transient

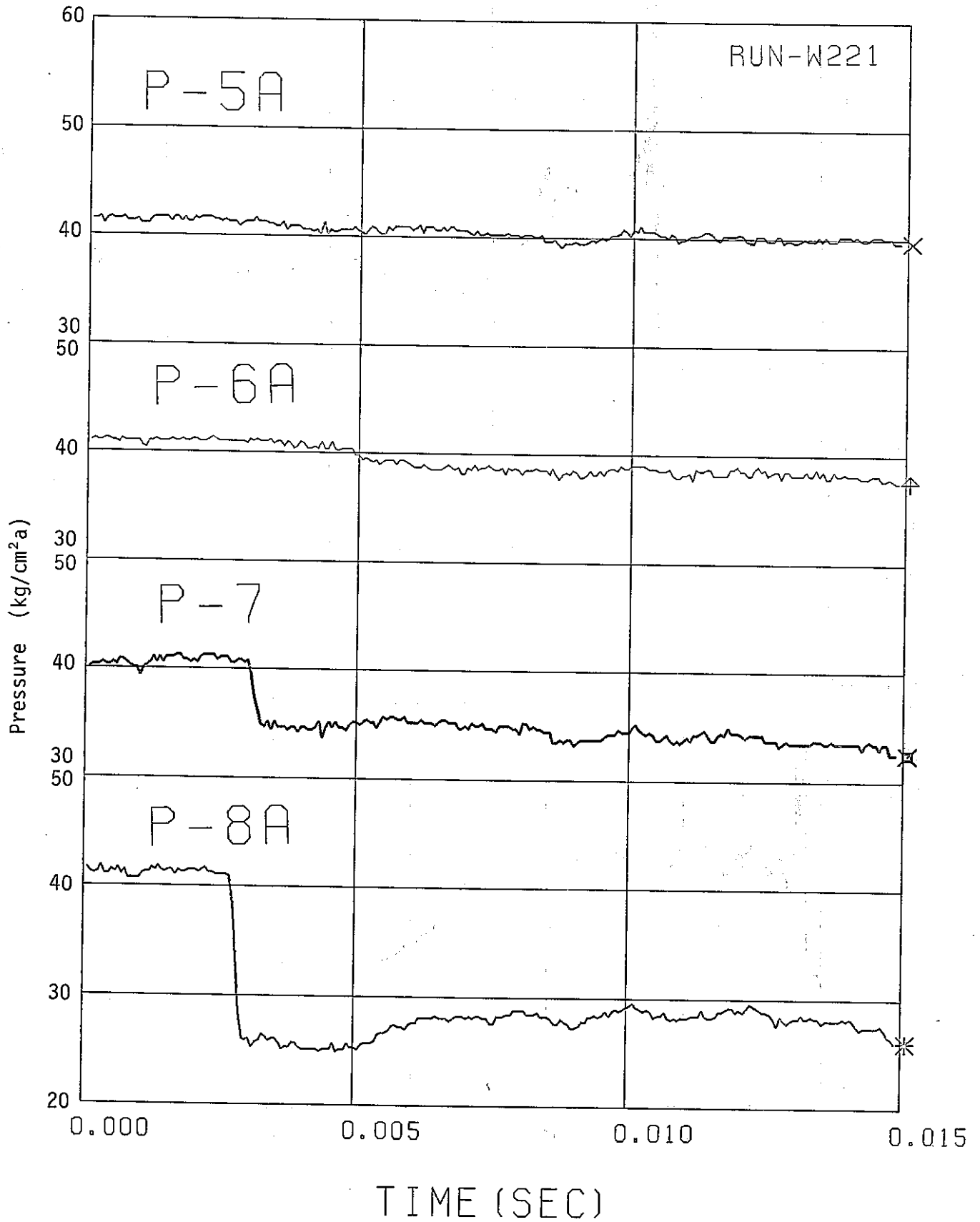


Fig. A.5-4 Pressure Transient

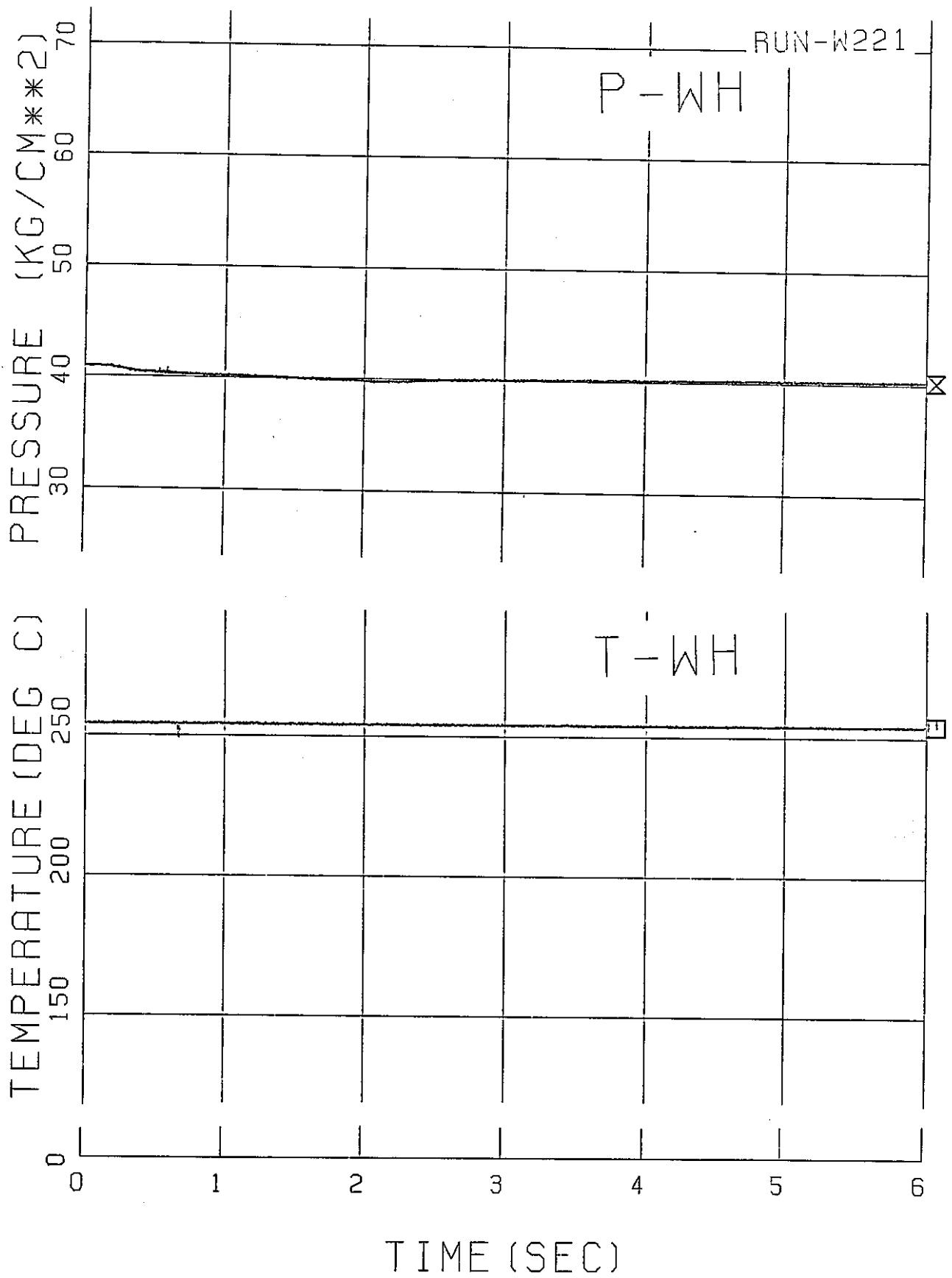


Fig. A.5-5 Pressure and Temperature in Water Heater Tank

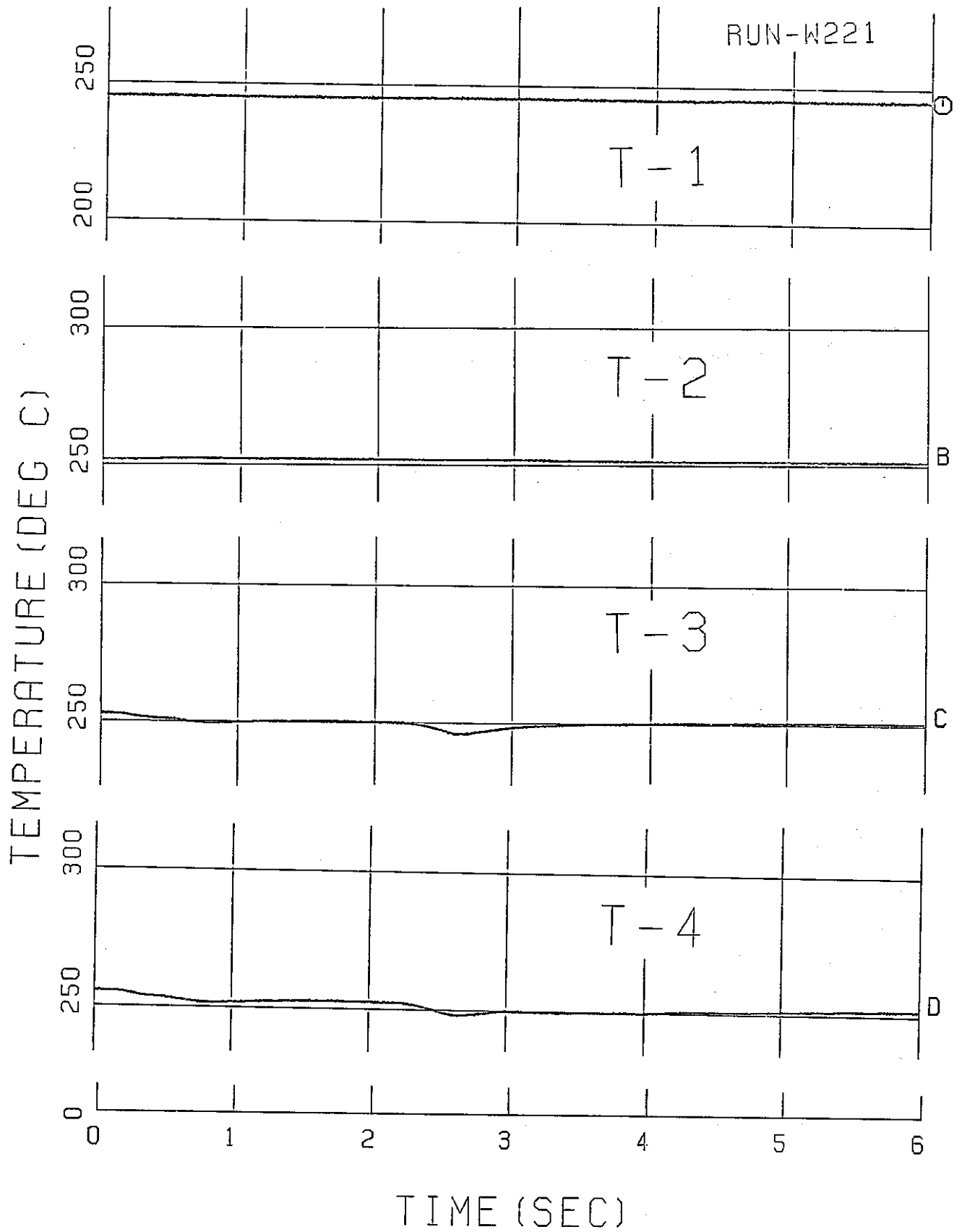


Fig. A.5-6 Temperature Transient

RUN-W221

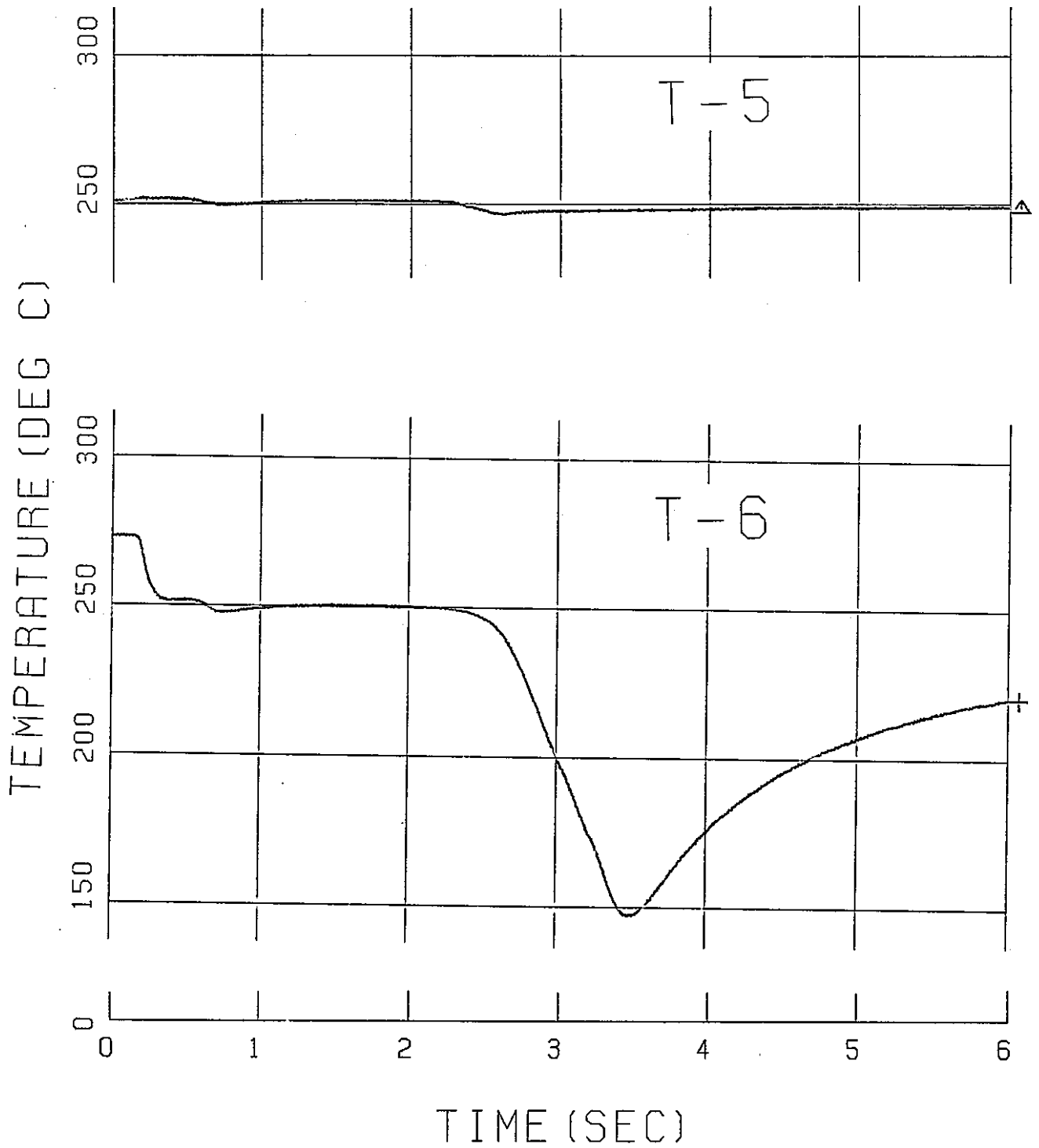


Fig. A.5-7 Temperature Transient

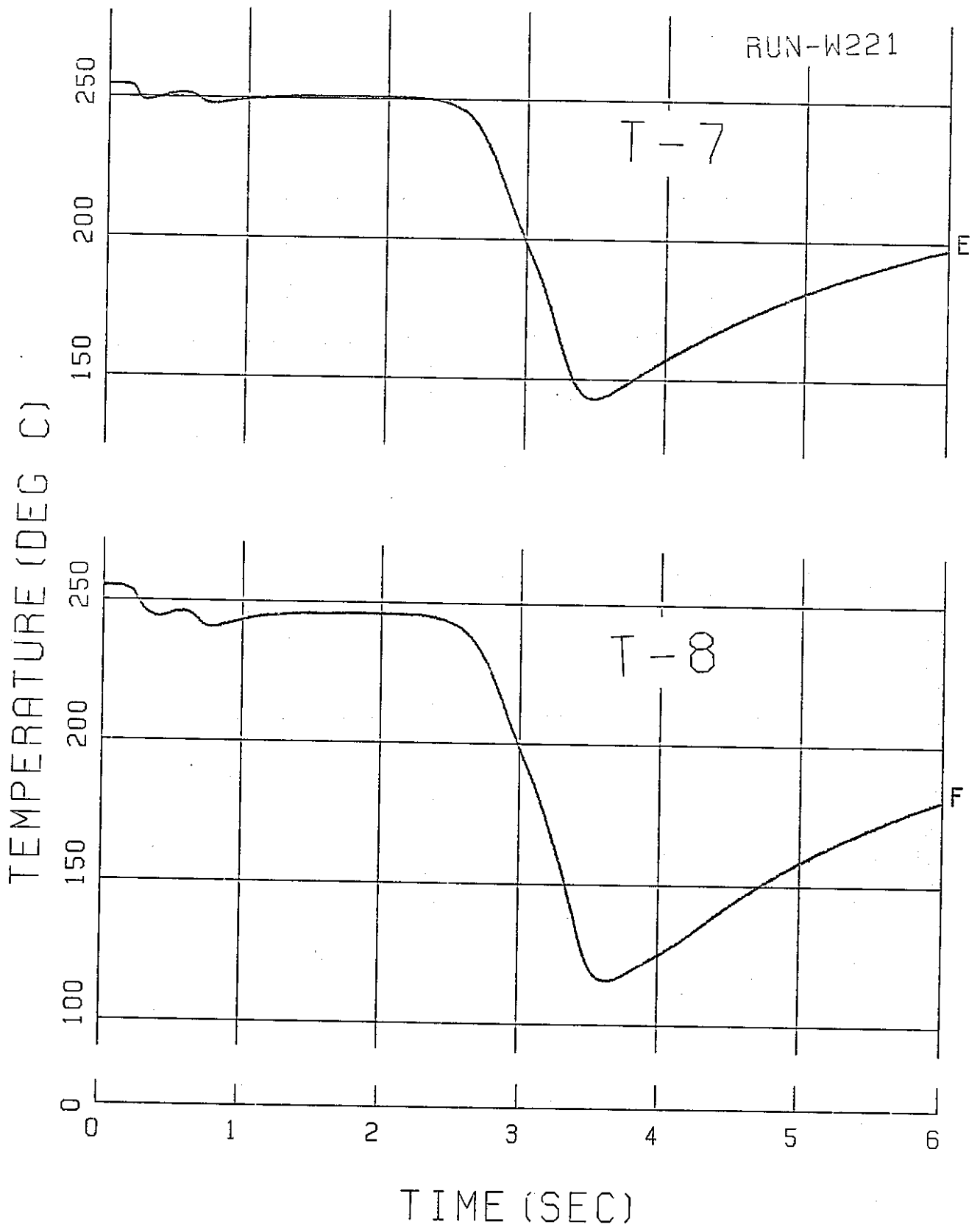


Fig. A.5-8 Temperature Transient

RUN-W221

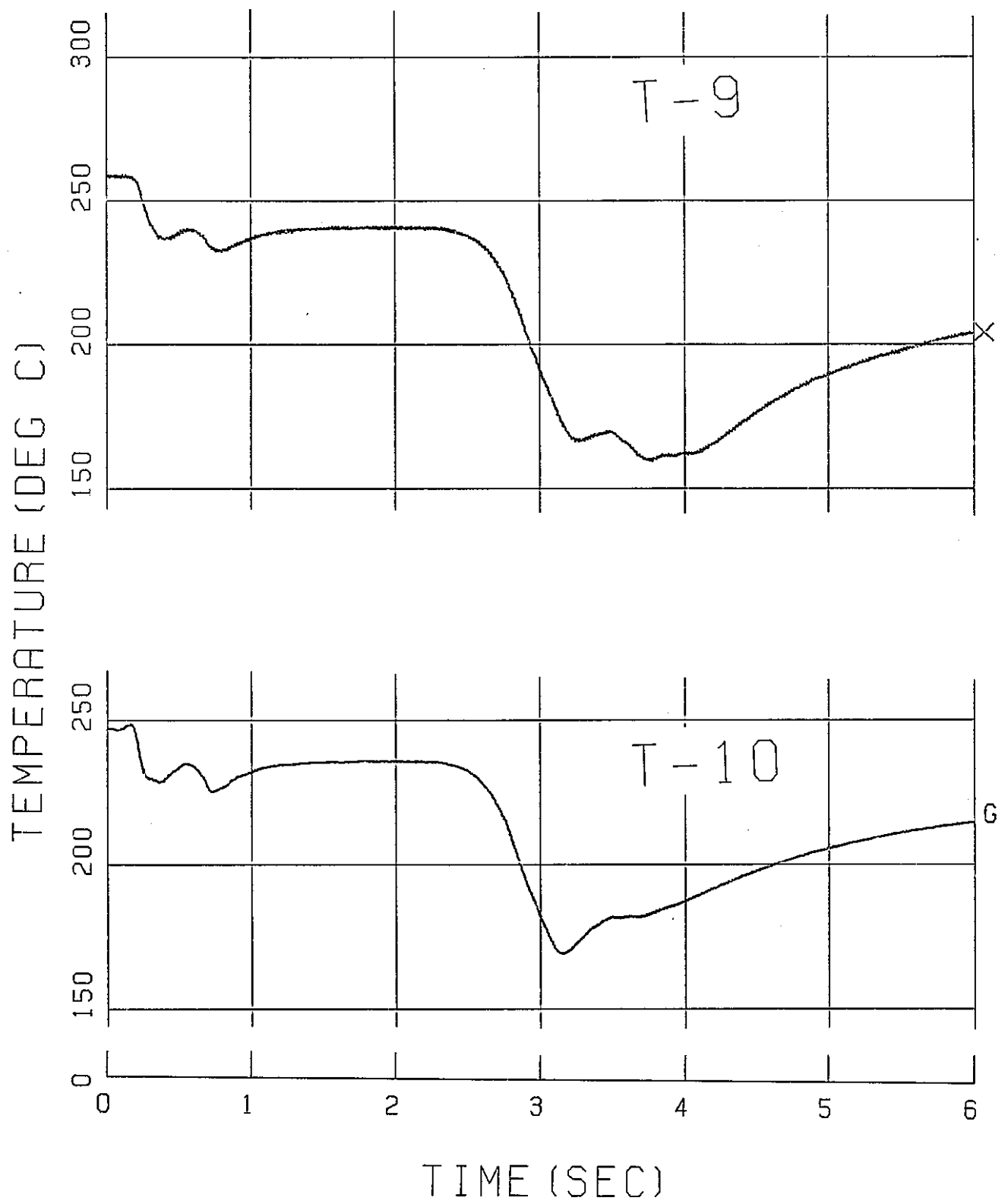


Fig. A.5-9 Temperature Transient

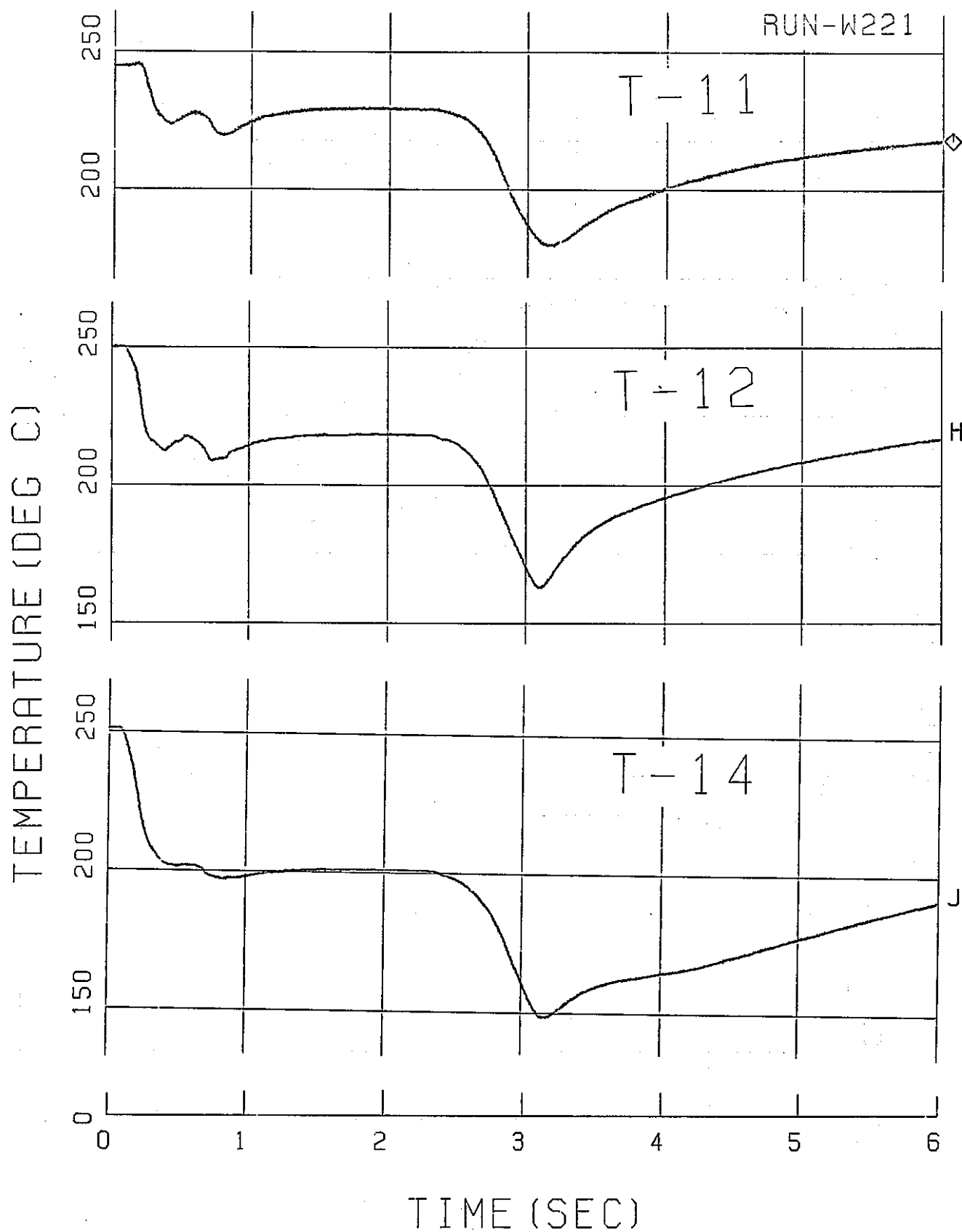


Fig. A.5-10 Temperature Transient

Appendix 6 Run-W231 試験データ

- Fig. A. 6 - 1 ~ A. 6 - 3 Thrust Force Transient
- Fig. A. 6 - 4 Pressure Transient
- Fig. A. 6 - 5 Pressure and Temperature
in Water Heater Tank
- Fig. A. 6 - 6 ~ A. 6 - 11 Temperature Transient

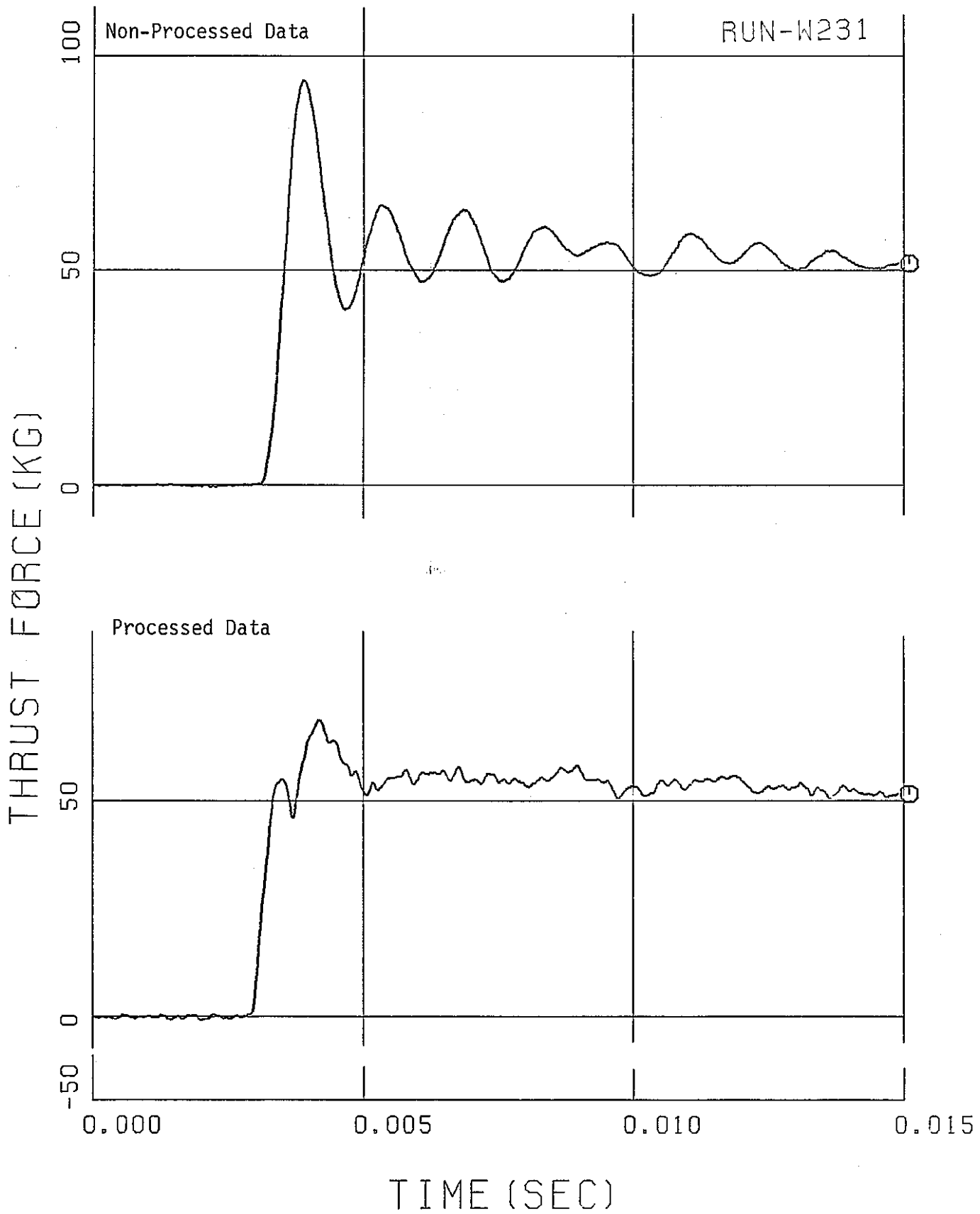


Fig. A.6-1 Thrust Force Transient

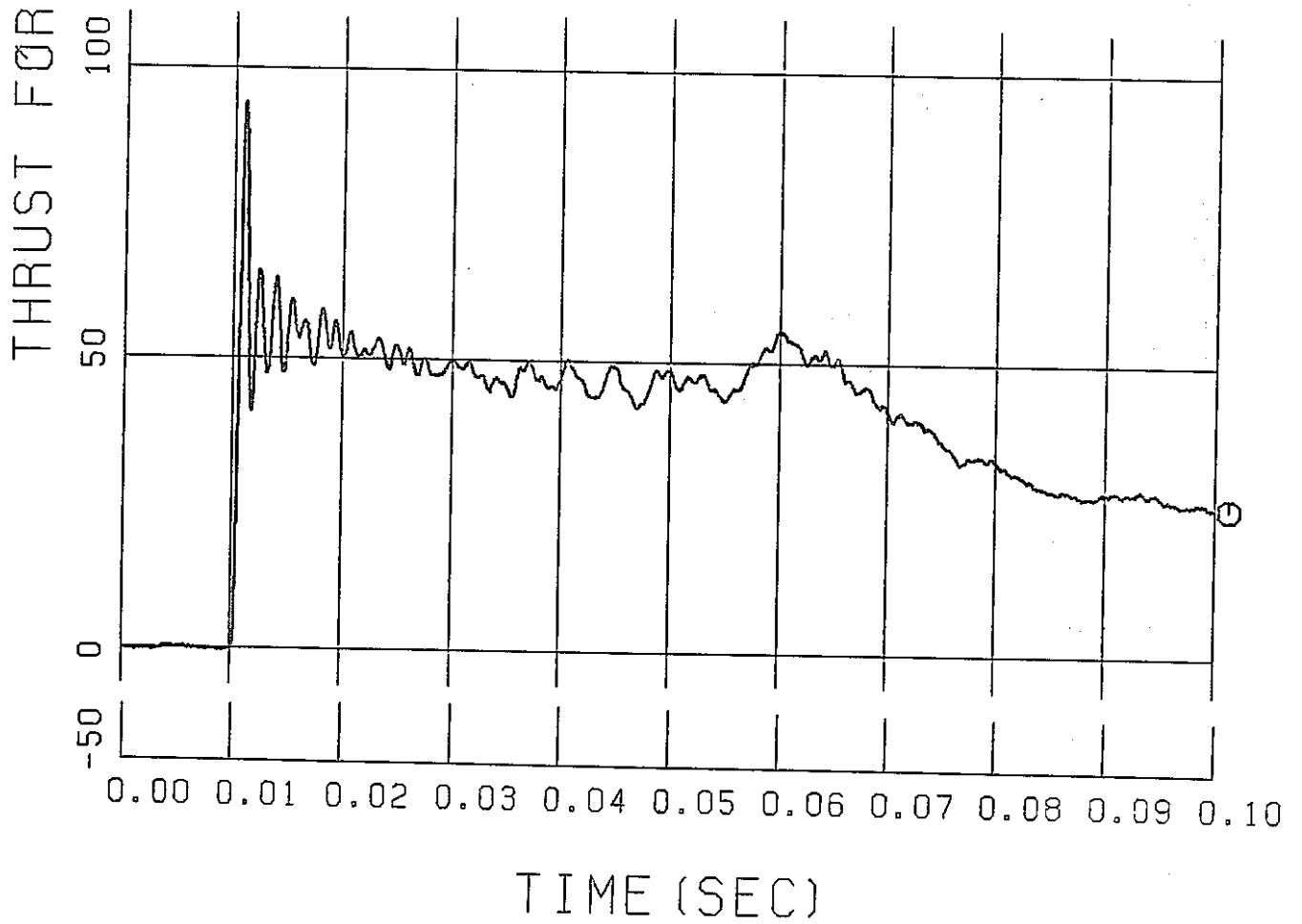
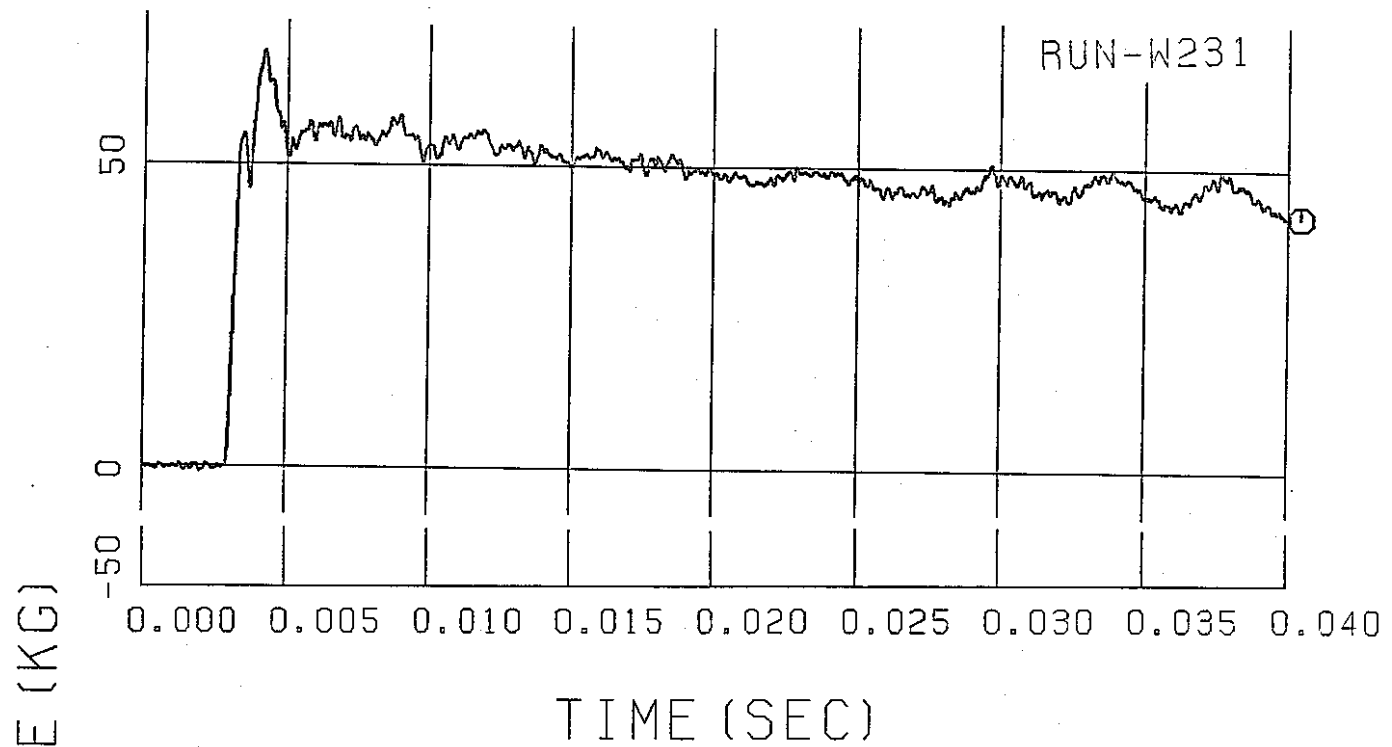


Fig. A.6-2 Thrust Force Transient

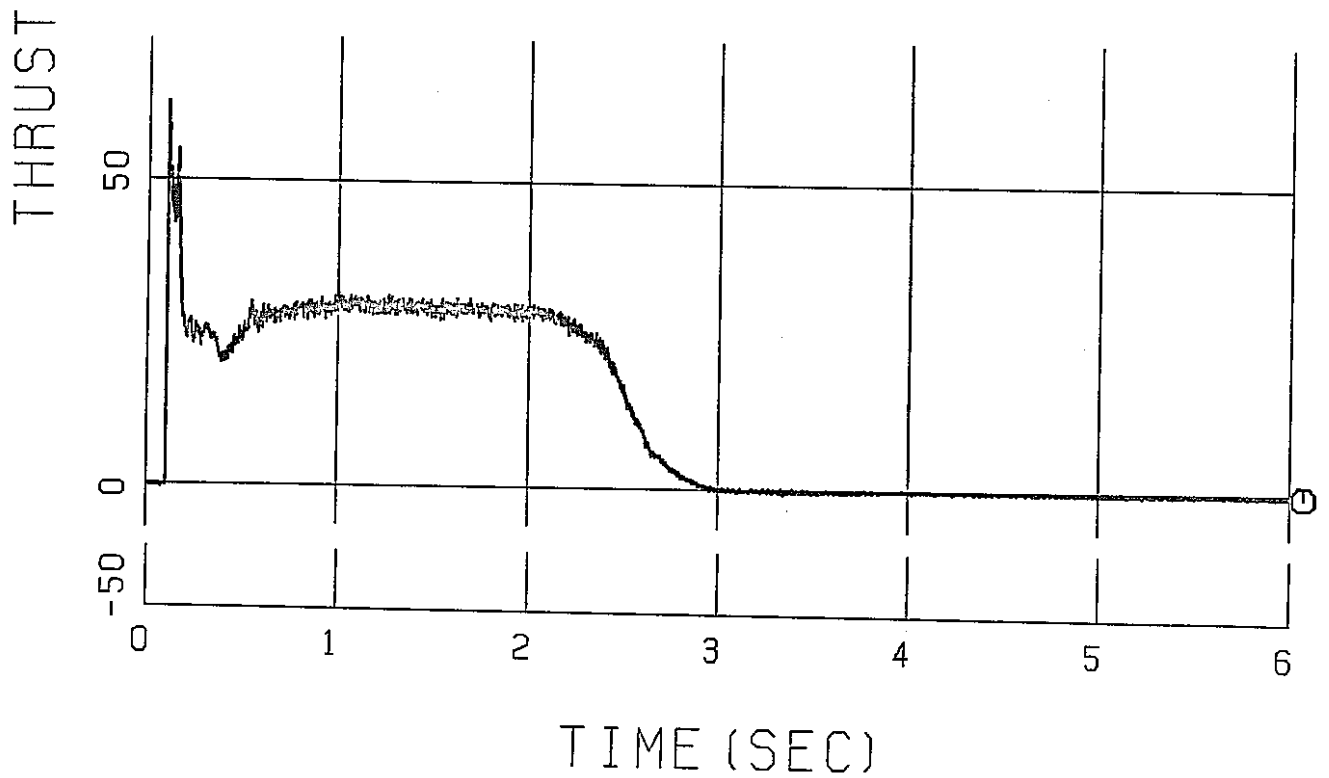
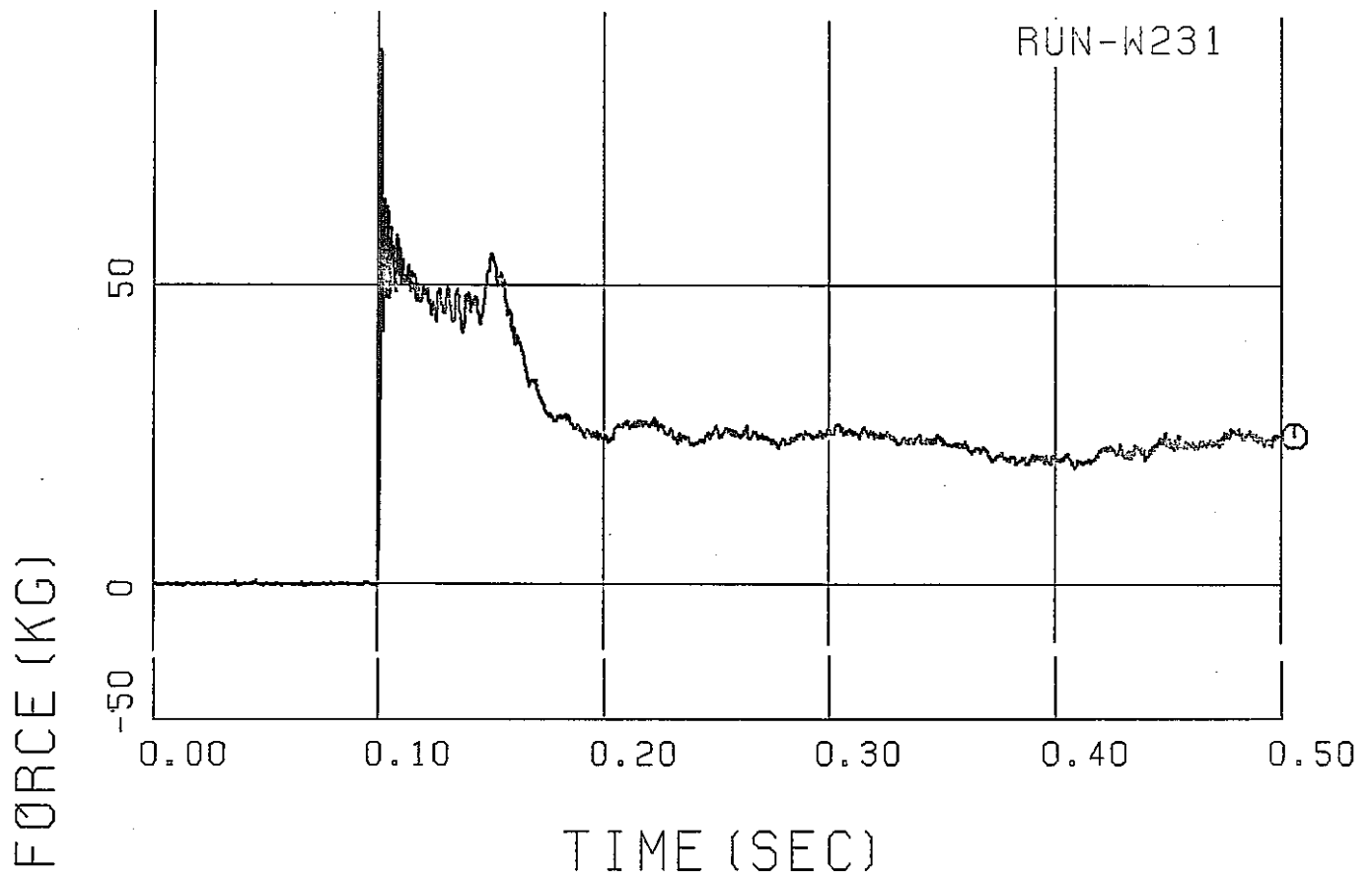


Fig. A.6-3 Thrust Force Transient

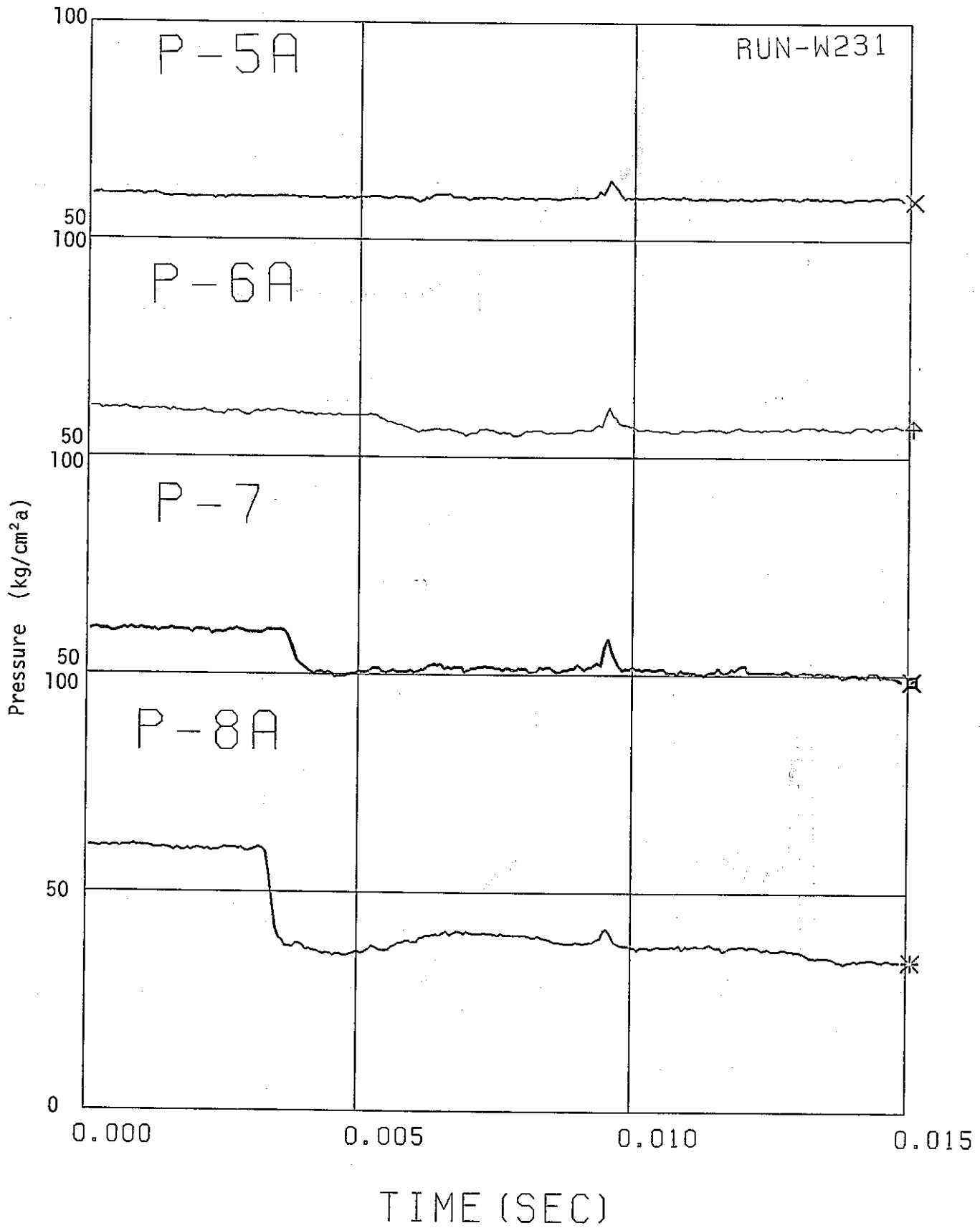


Fig. A.6-4 Pressure Transient

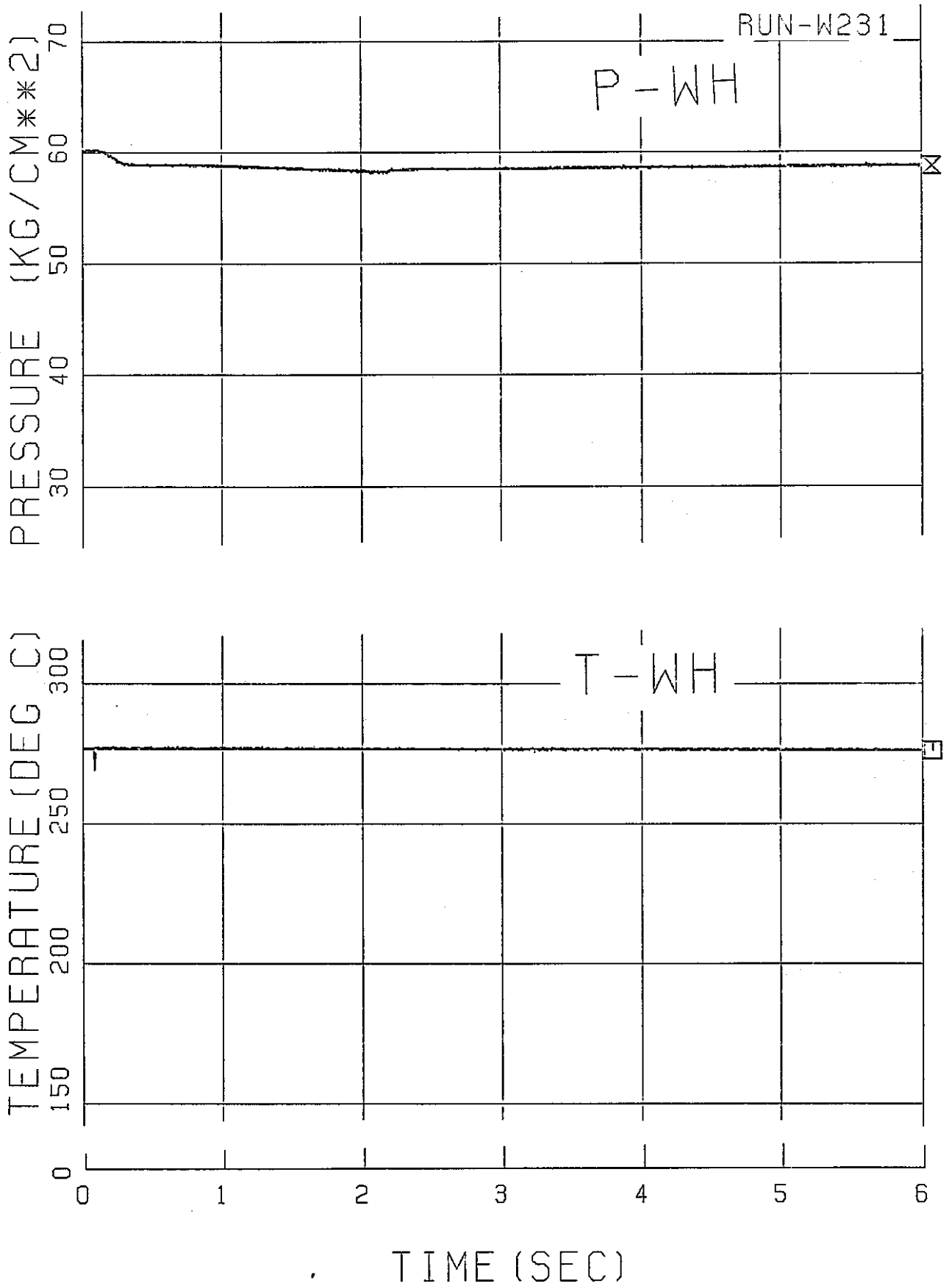


Fig. A.6-5 Pressure and Temperature in Water Heater Tank

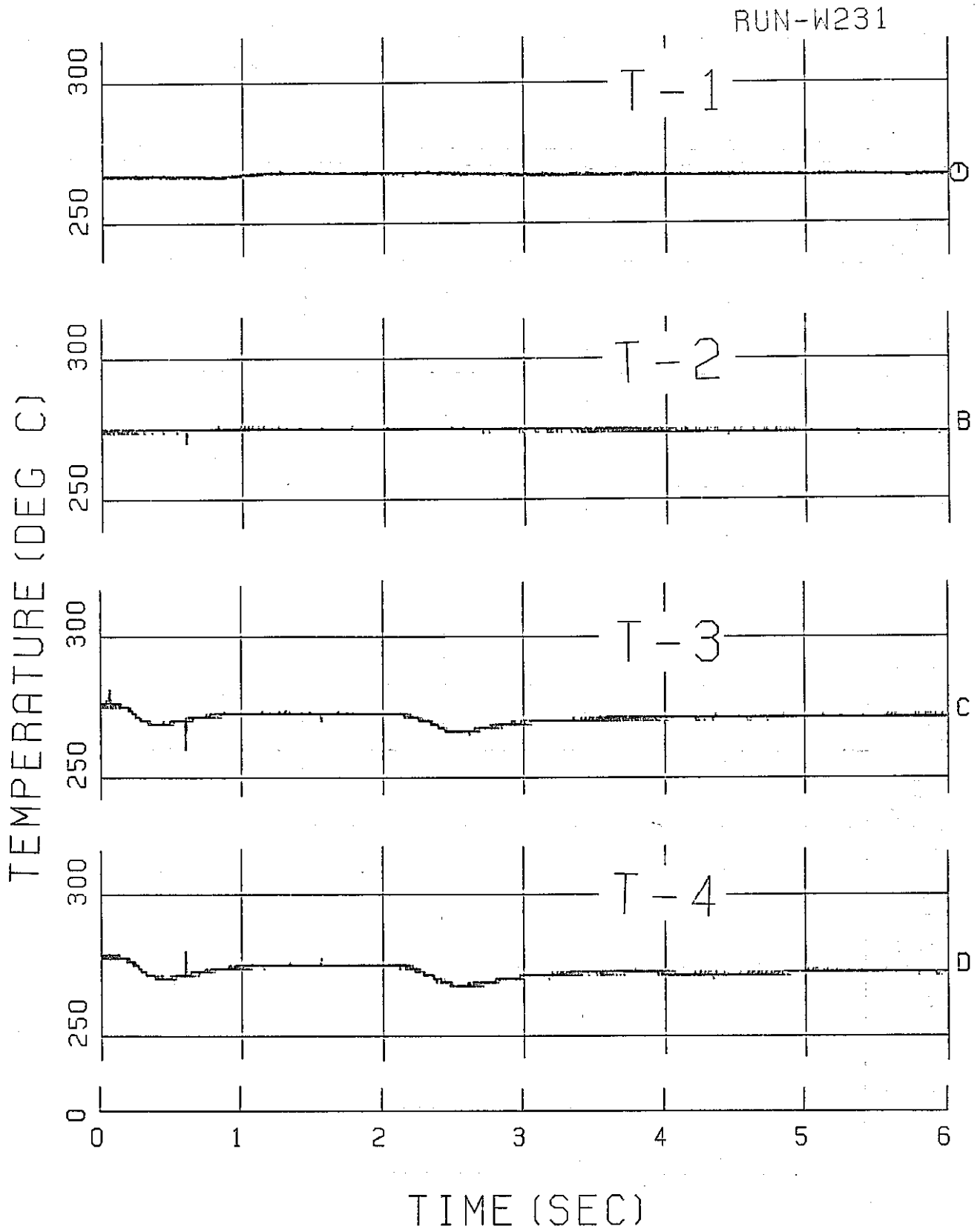


Fig. A.6-6 Temperature Transient

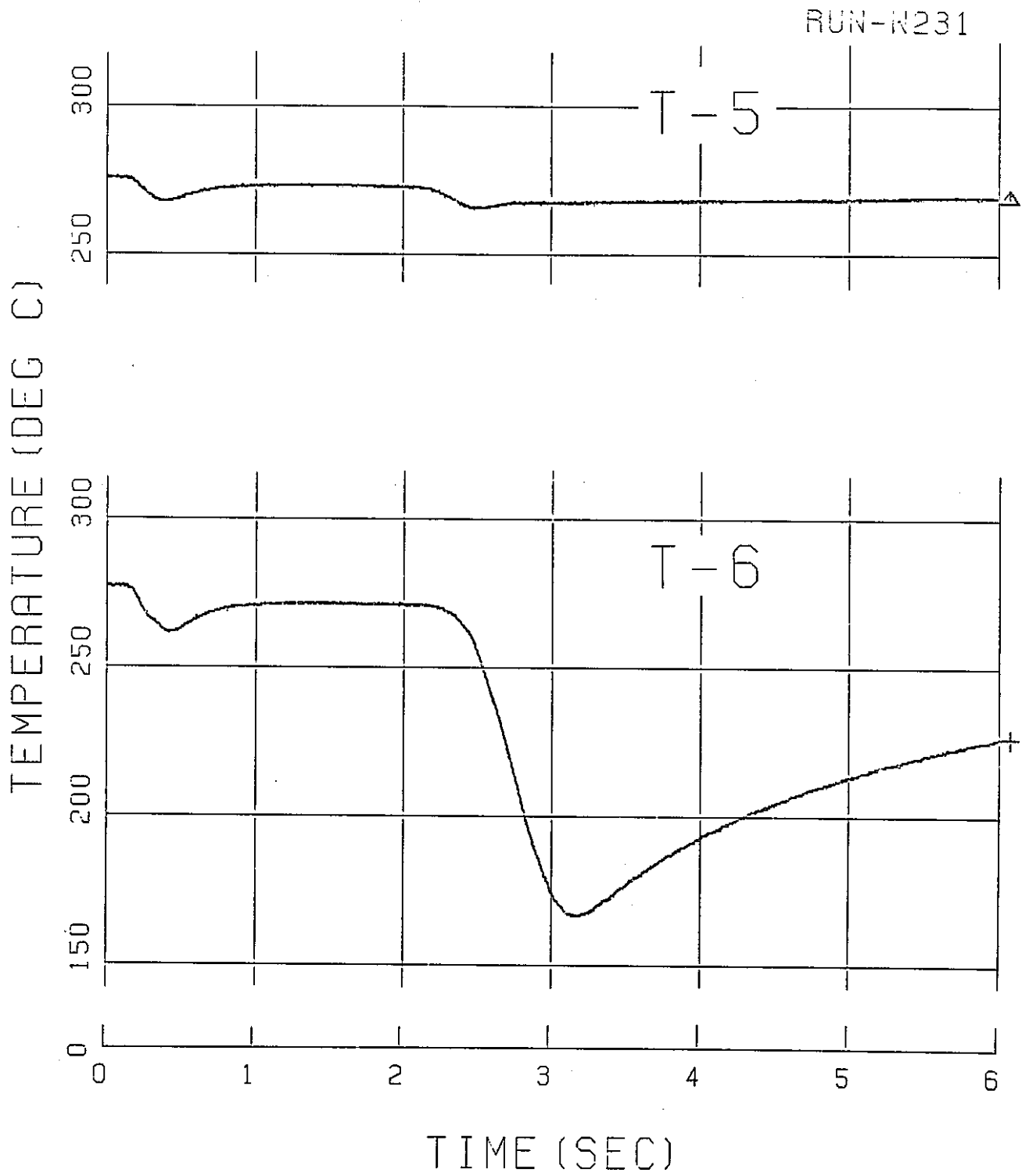


Fig. A.6-7 Temperature Transient

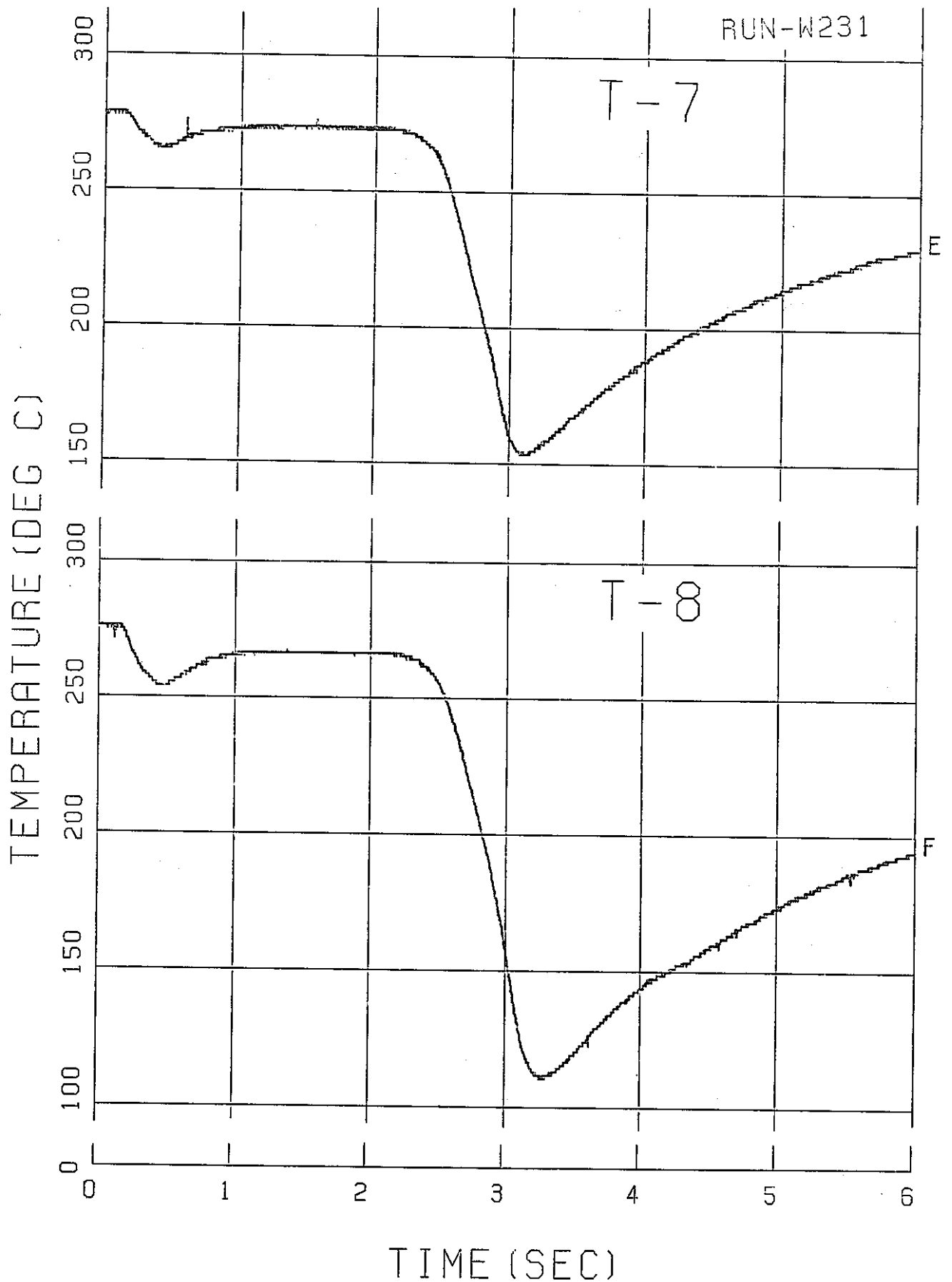


Fig. A.6-8 Temperature Transient

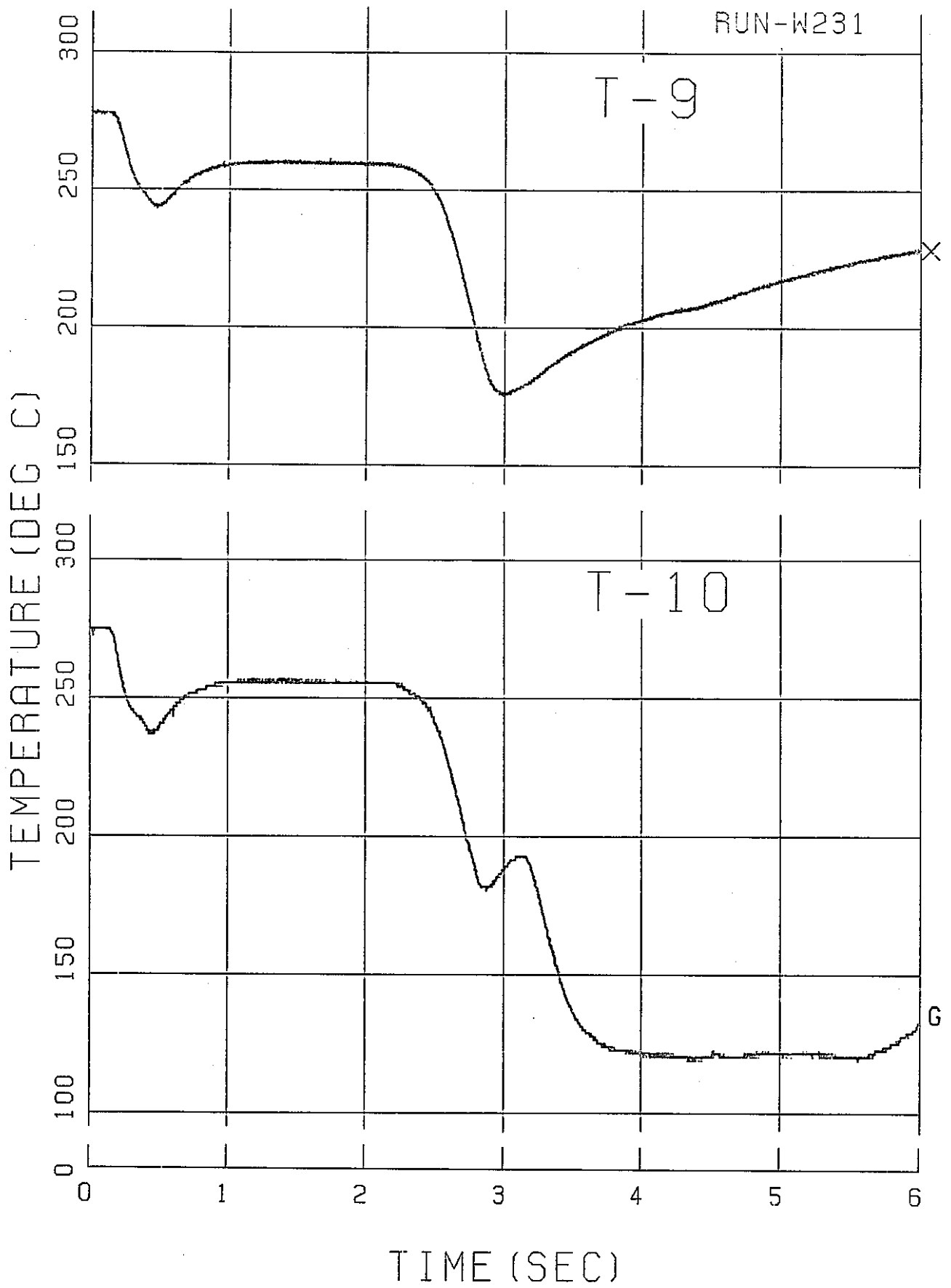


Fig. A.6-9 Temperature Transient

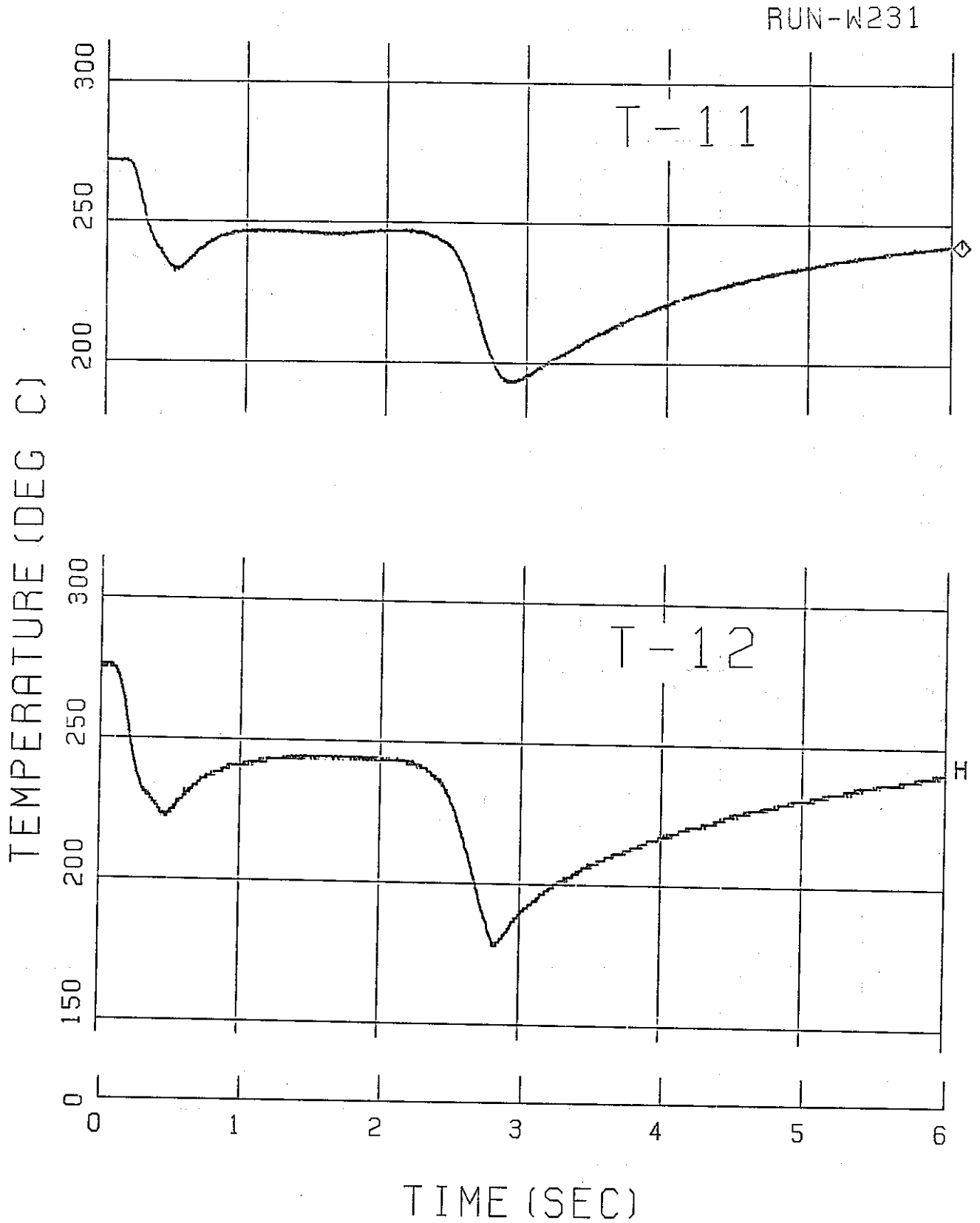


Fig. A.6-10 Temperature Transient

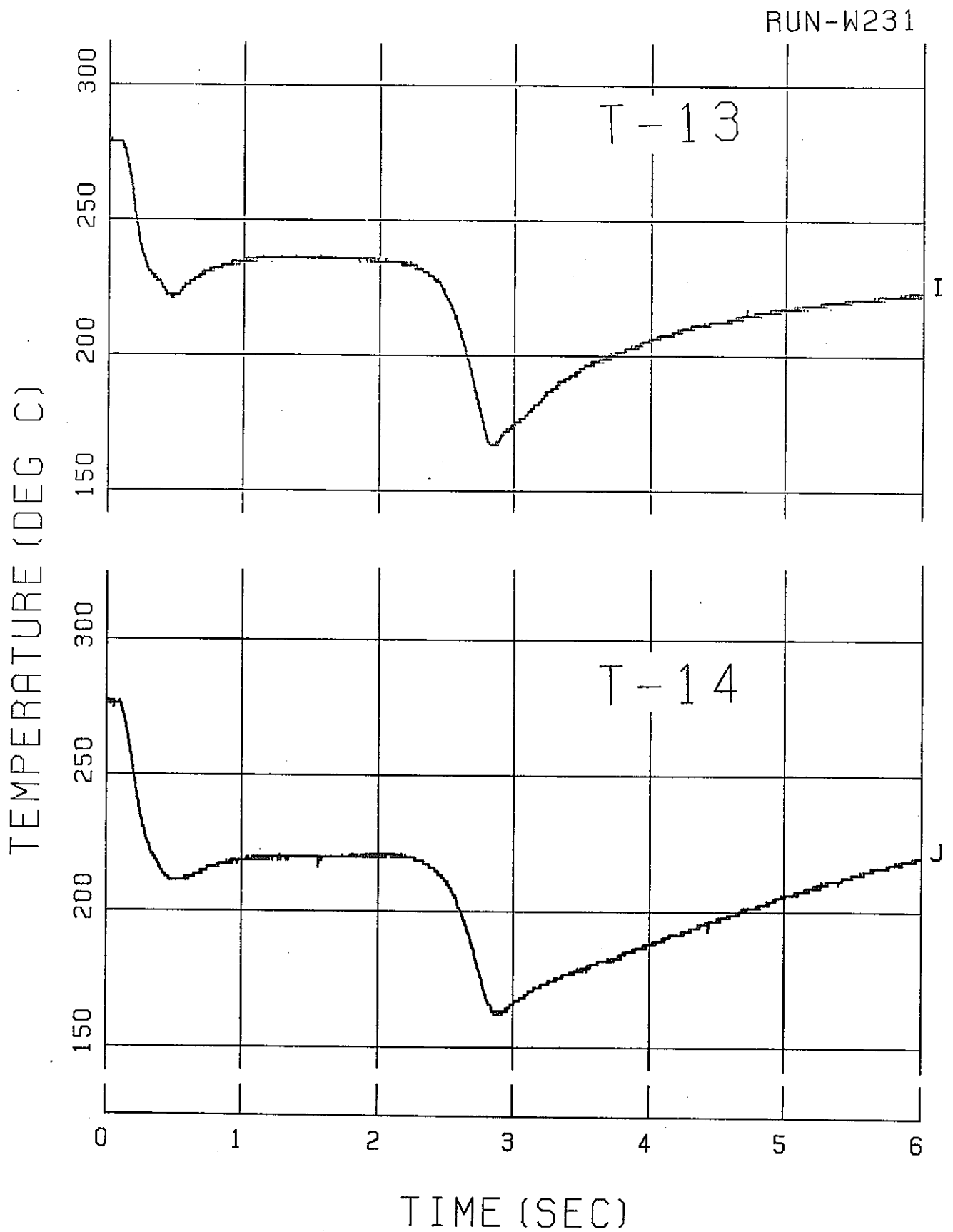


Fig. A.6-11 Temperature Transient

Appendix 7 Run-W244 試験データ

- | | |
|----------------------|--|
| Fig. A. 7-1 ~A. 7-3 | Thrust Force Transient |
| Fig. A. 7-4 ~A. 7-8 | Pressure Transient |
| Fig. A. 7-9 | Pressure and Temperature
in Water Heater Tank |
| Fig. A. 7-10~A. 7-15 | Temperature Transient |

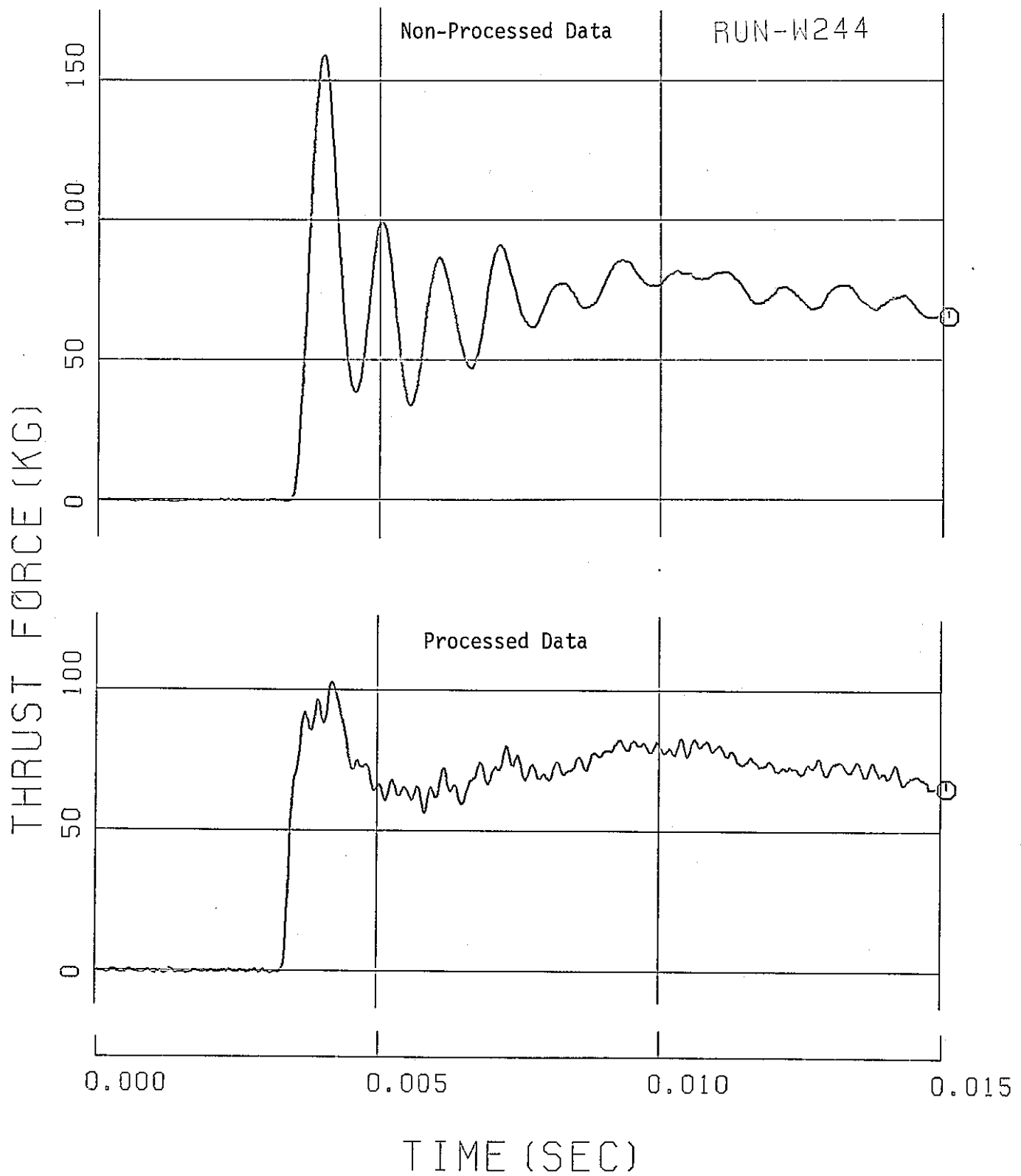


Fig. A.7-1 Thrust Force Transient

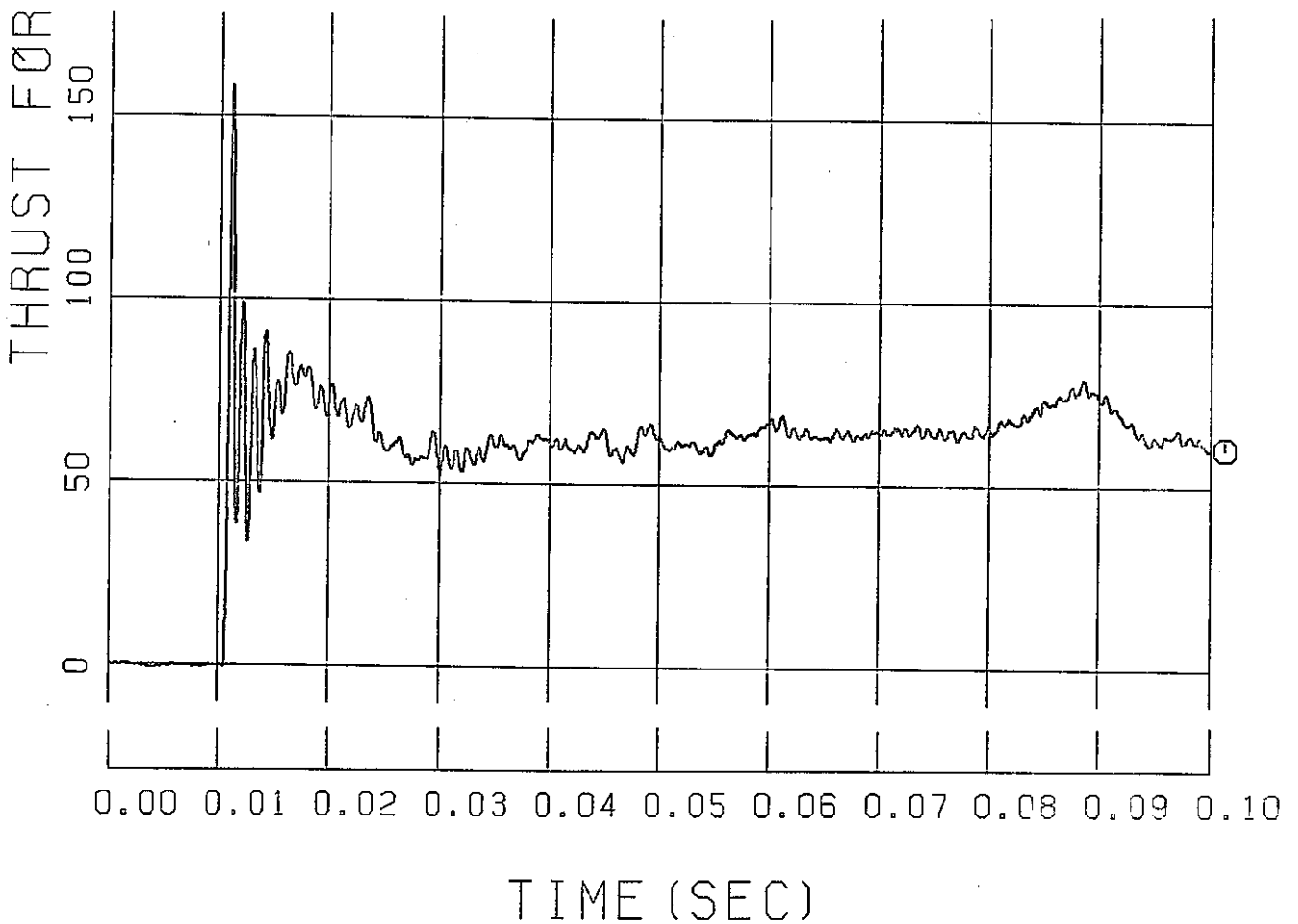
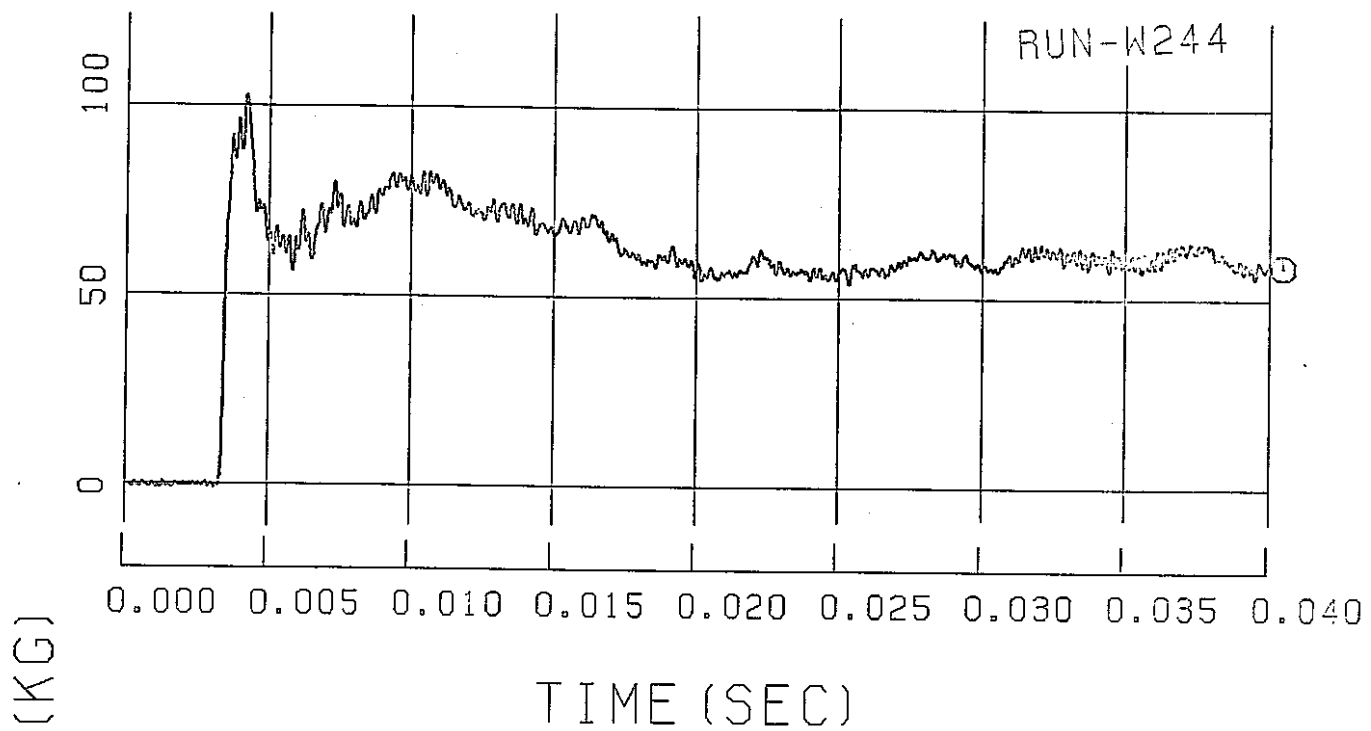


Fig. A.7-2 Thrust Force Transient

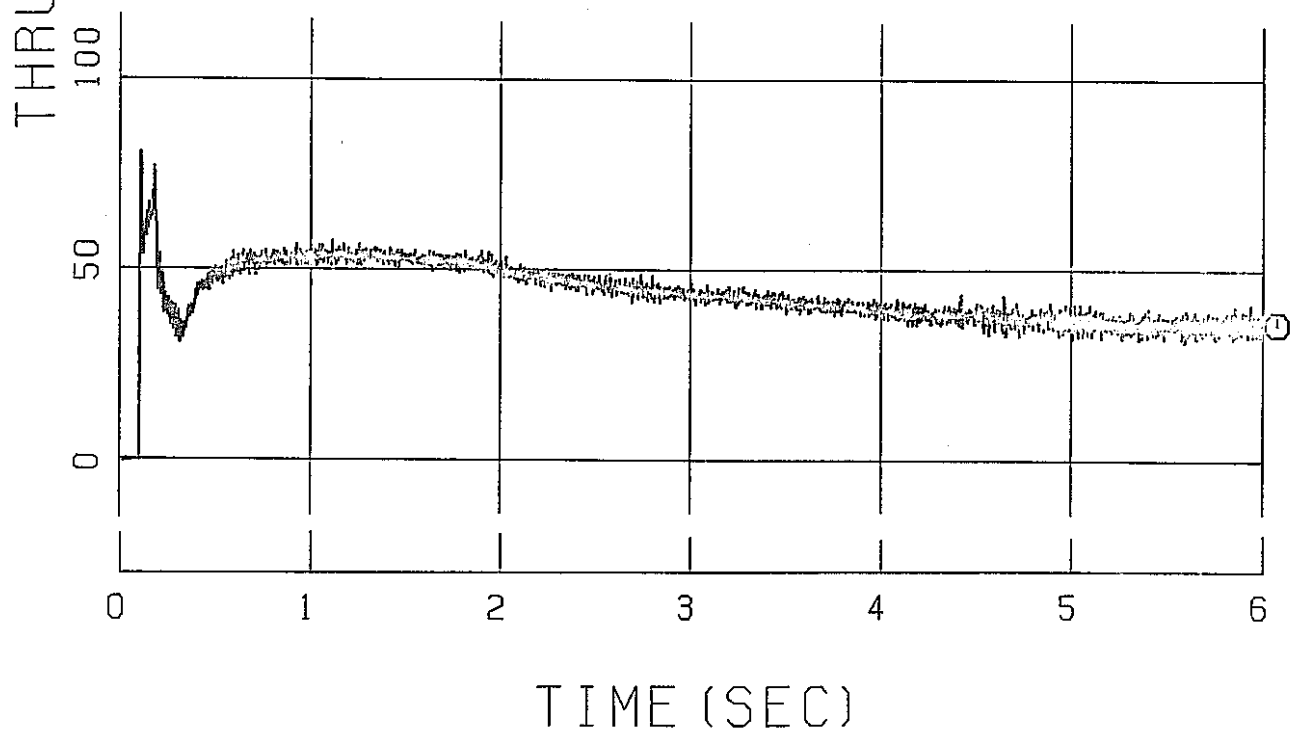
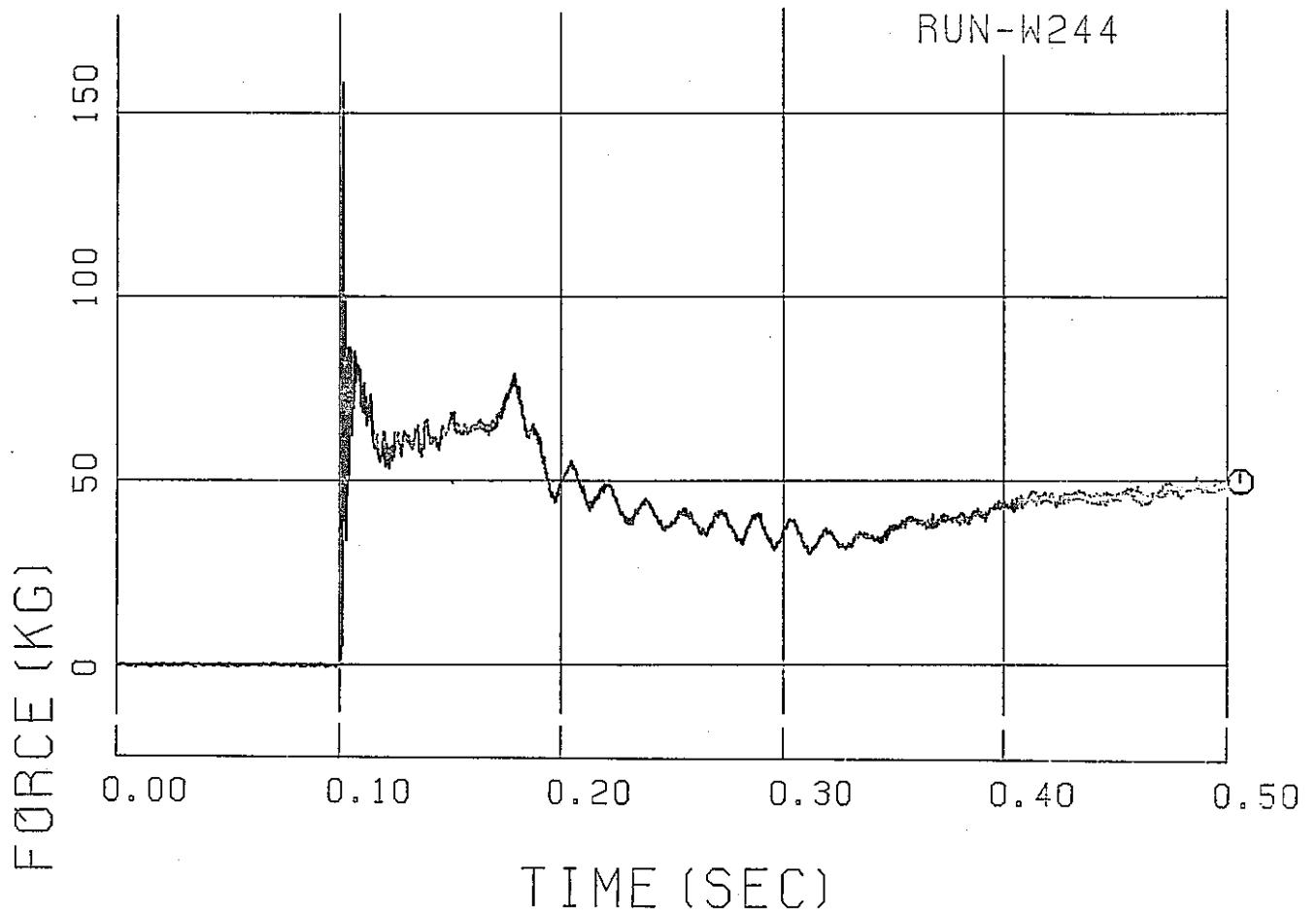


Fig. A.7-3 Thrust Force Transient

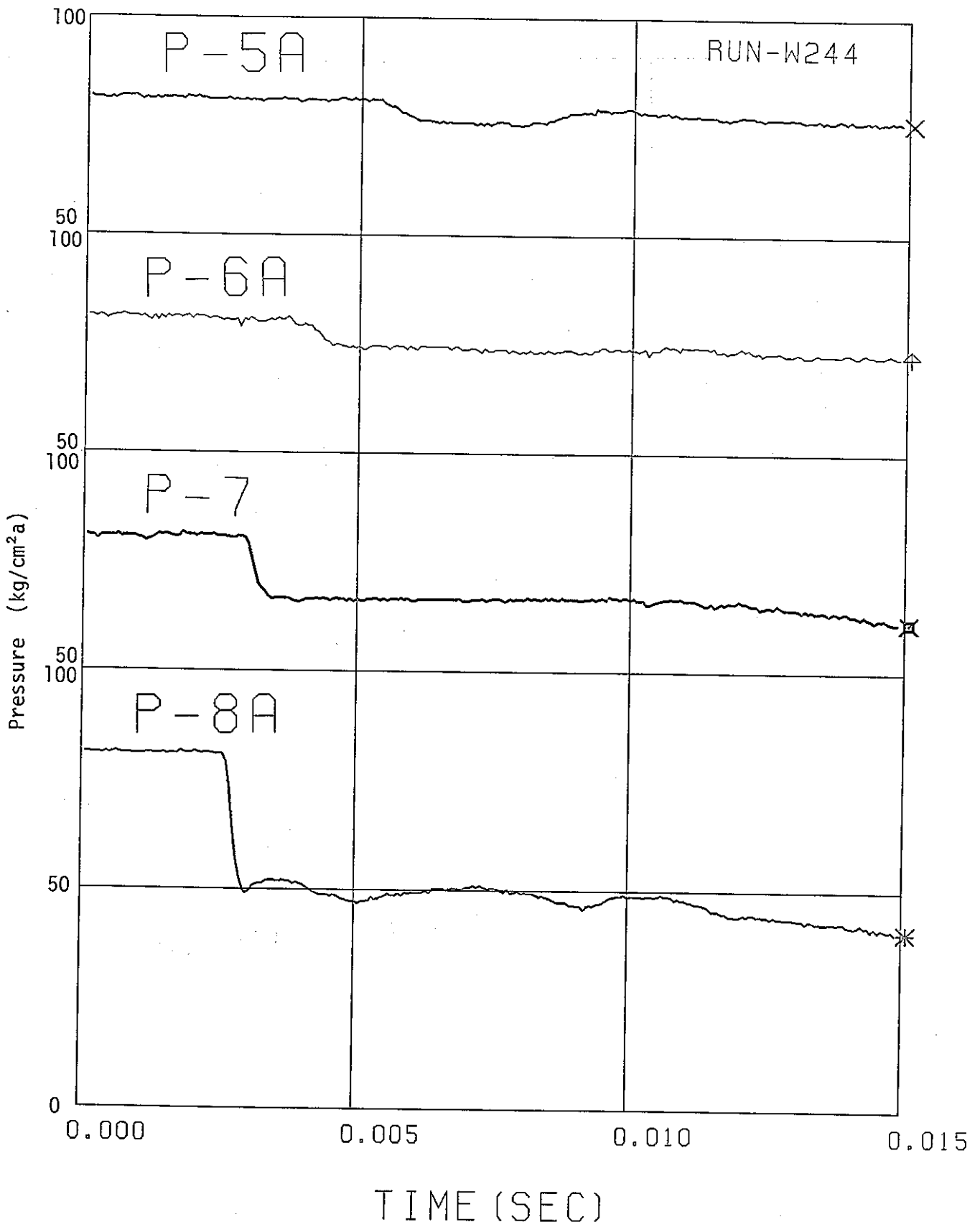


Fig. A.7-4 Pressure Transient

RUN-W244

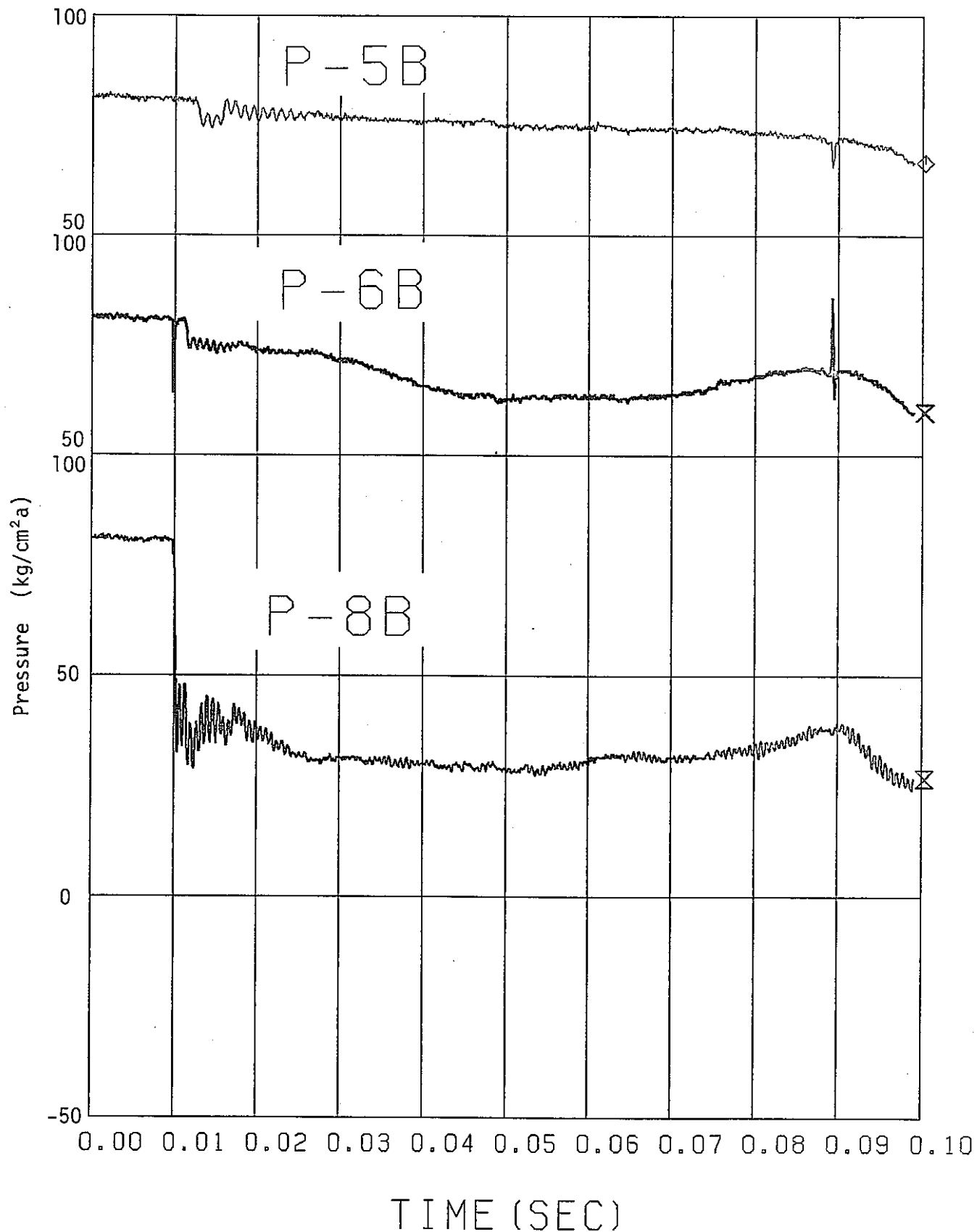


Fig. A.7-5 Pressure Transient

RUN-W244

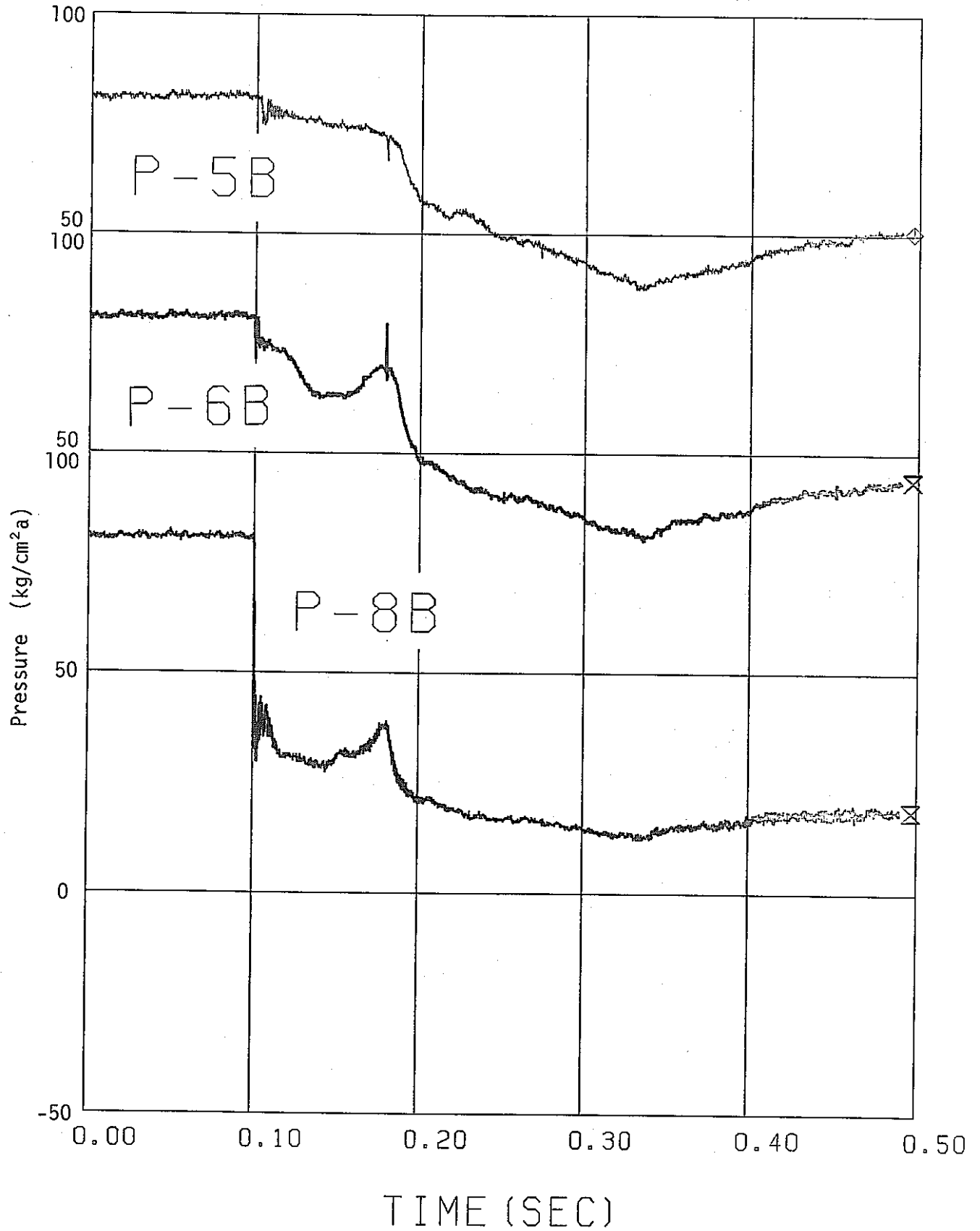


Fig. A.7-6 Pressure Transient

RUN-W244

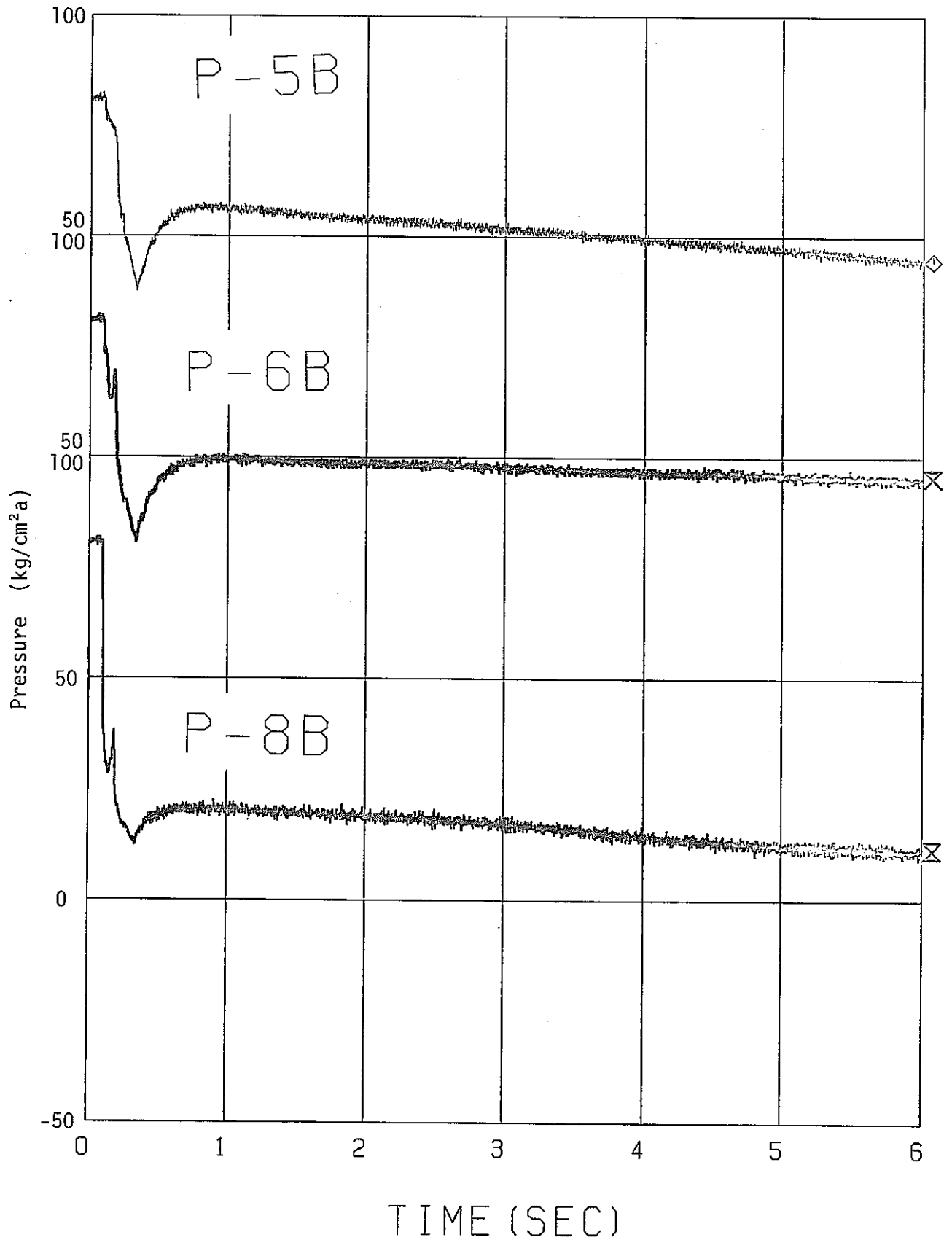


Fig. A.7-7 Pressure Transient

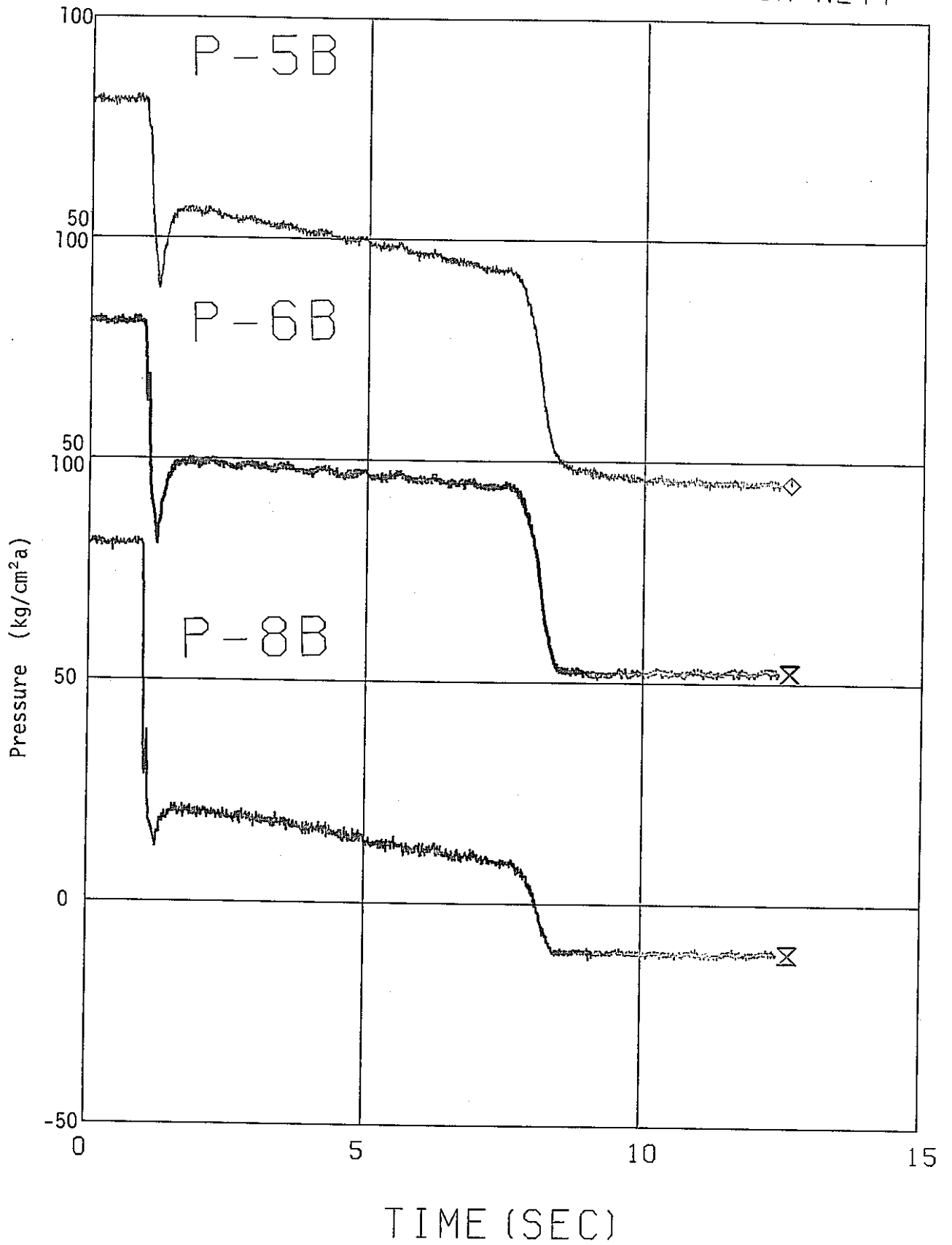


Fig. A.7-8 Pressure Transient

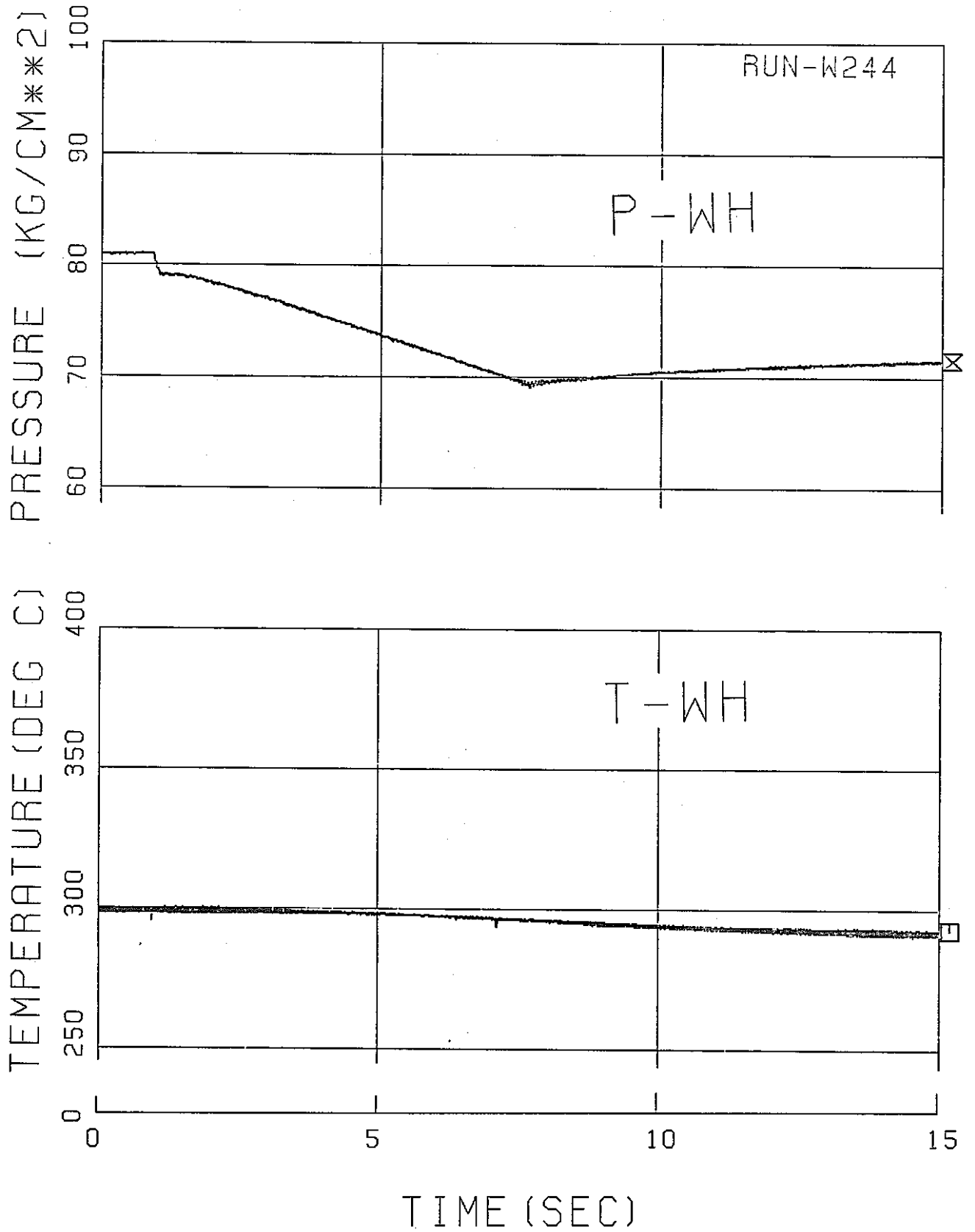


Fig. A.7-9 Pressure and Temperature in Water Heater Tank

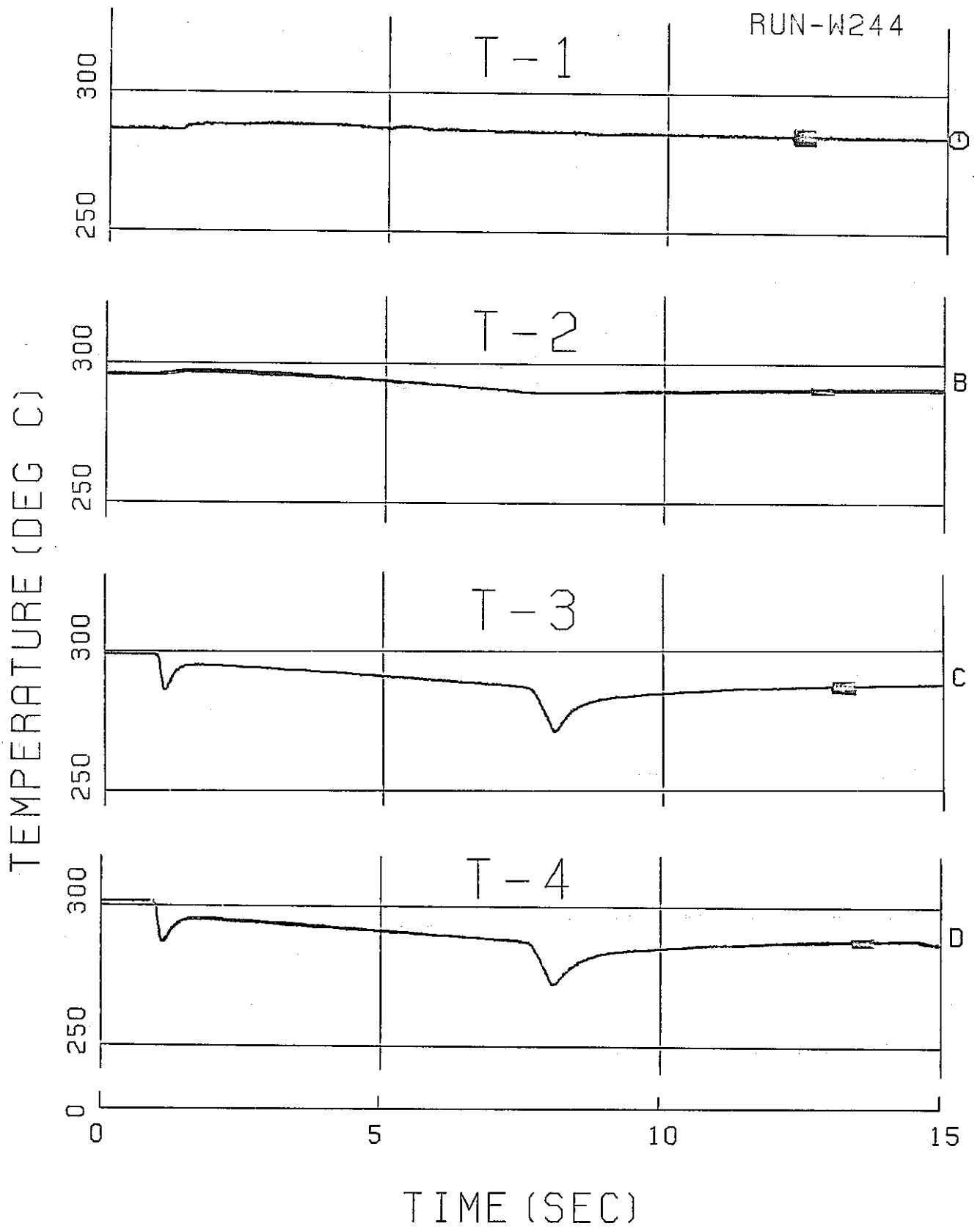


Fig. A.7-10 Temperature Transient

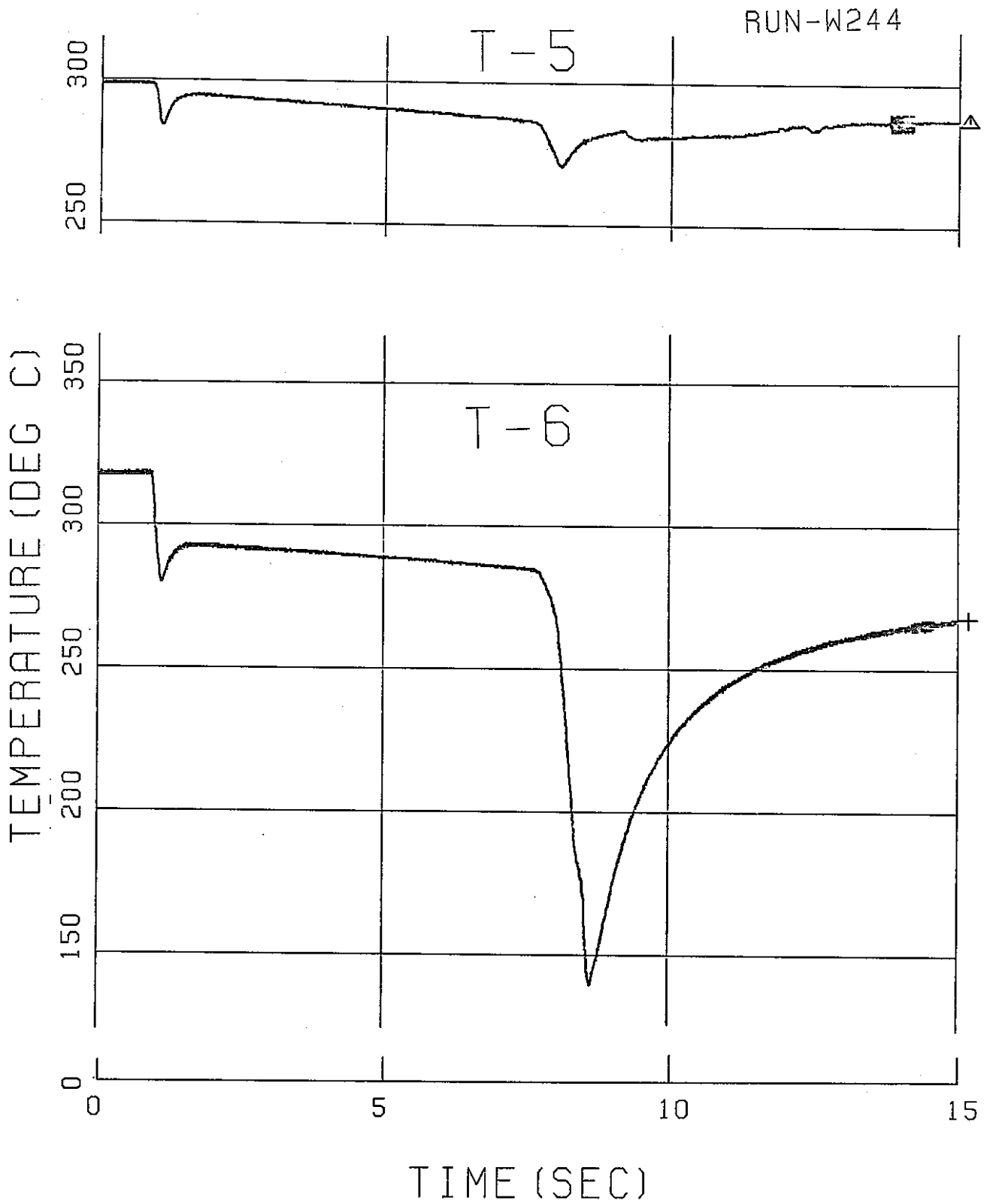


Fig. A.7-11 Temperature Transient

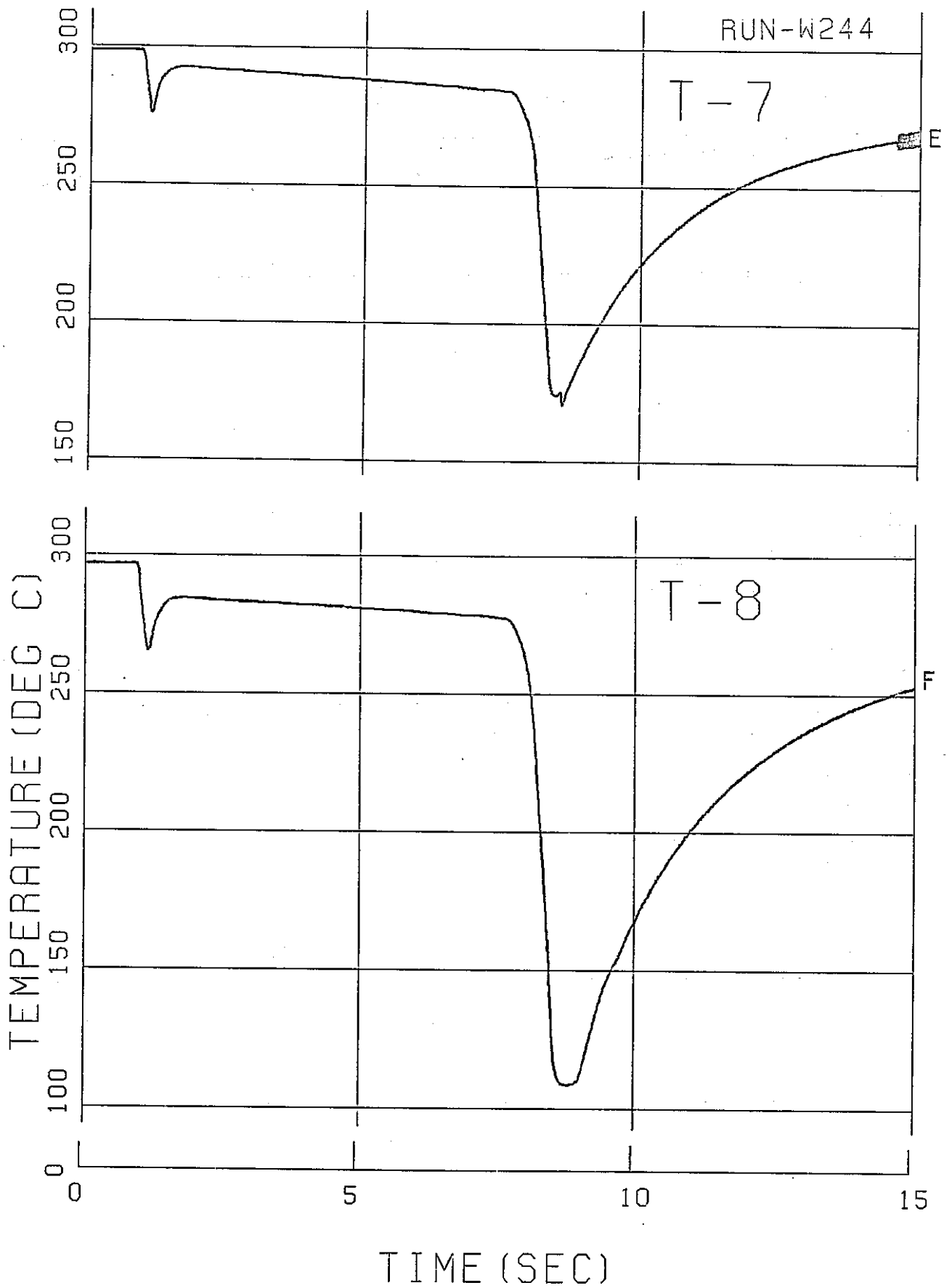


Fig. A.7-12 Temperature Transient

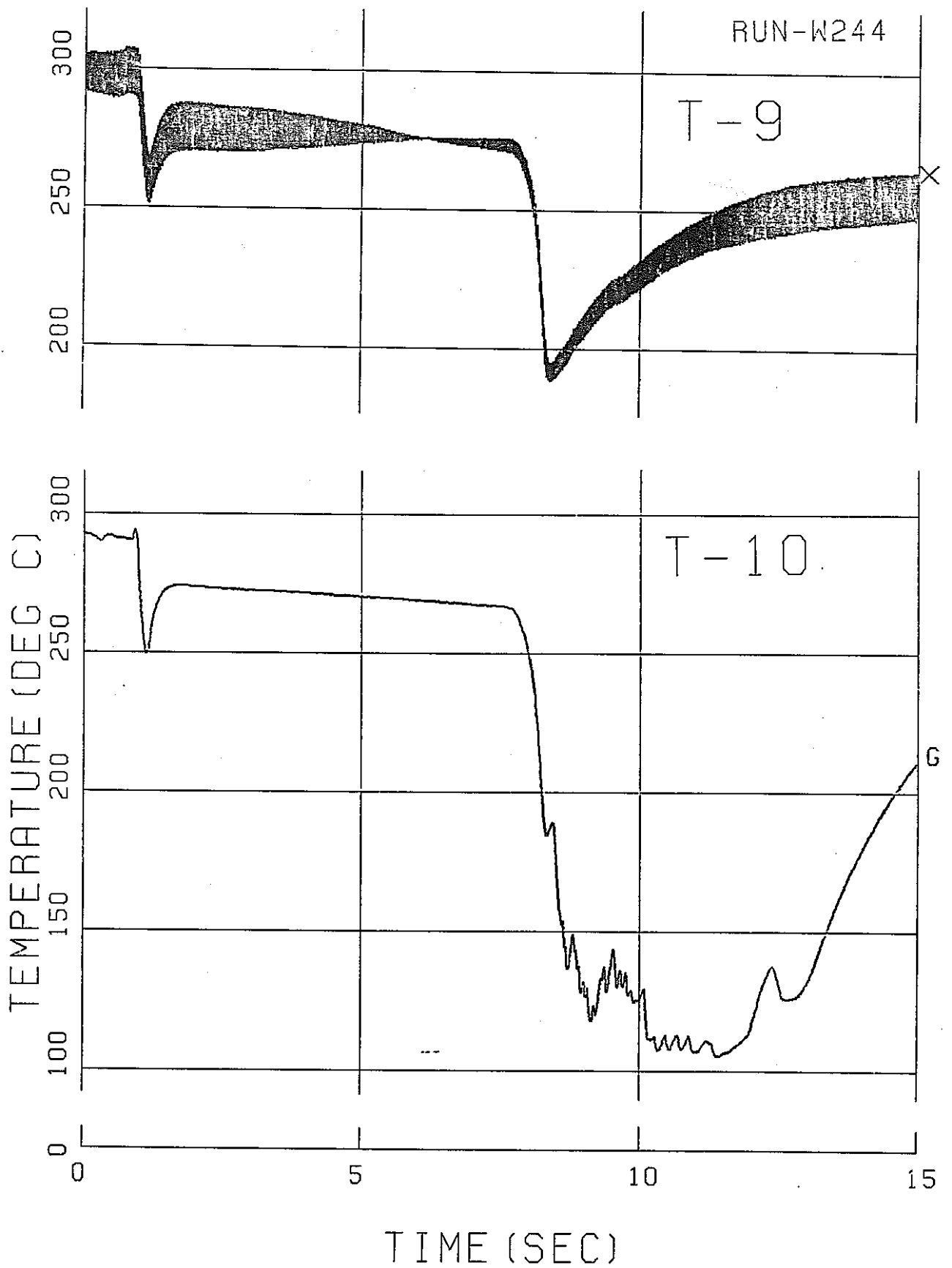


Fig. A.7-13 Temperature Transient

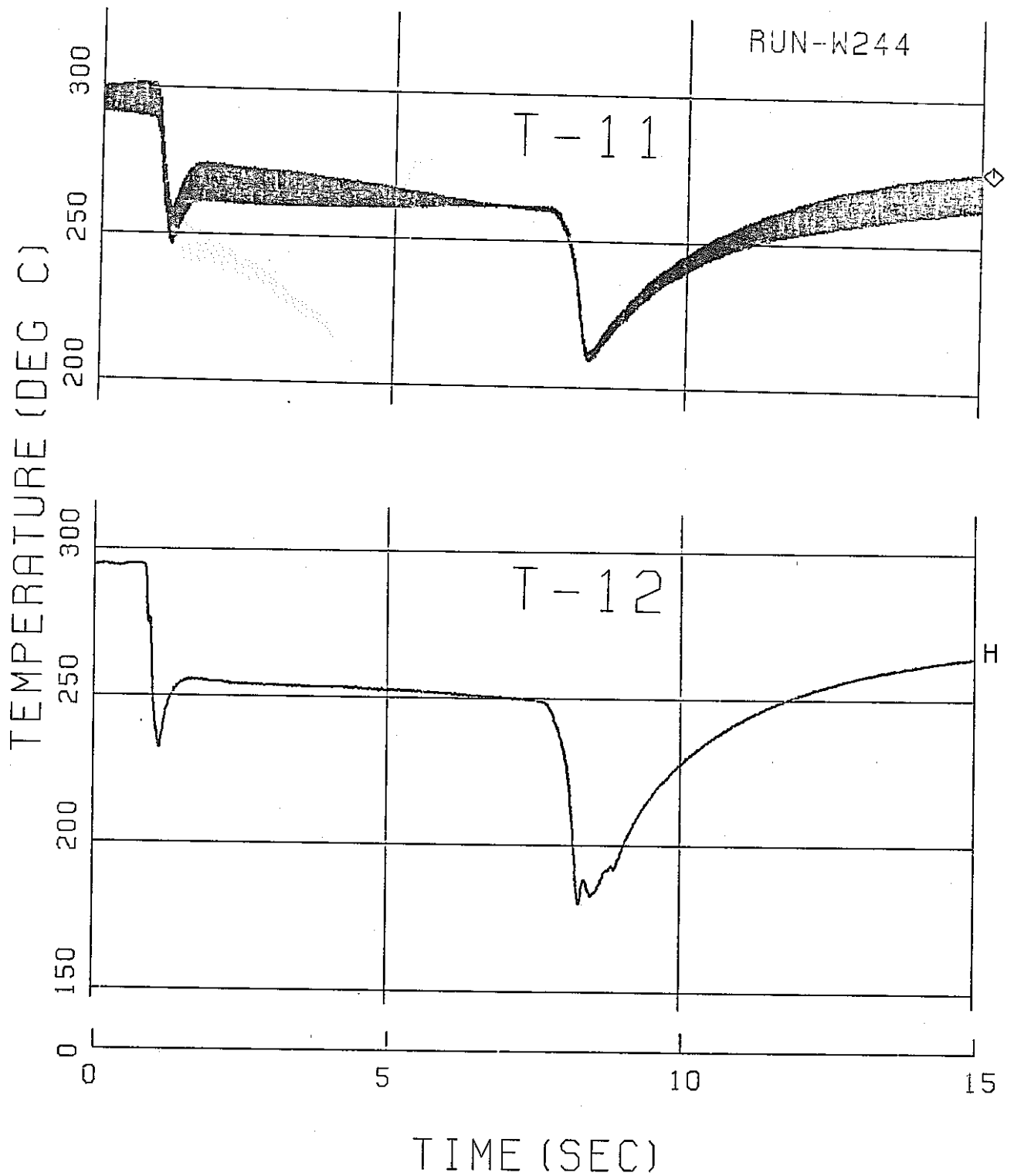


Fig. A.7-14 Temperature Transient

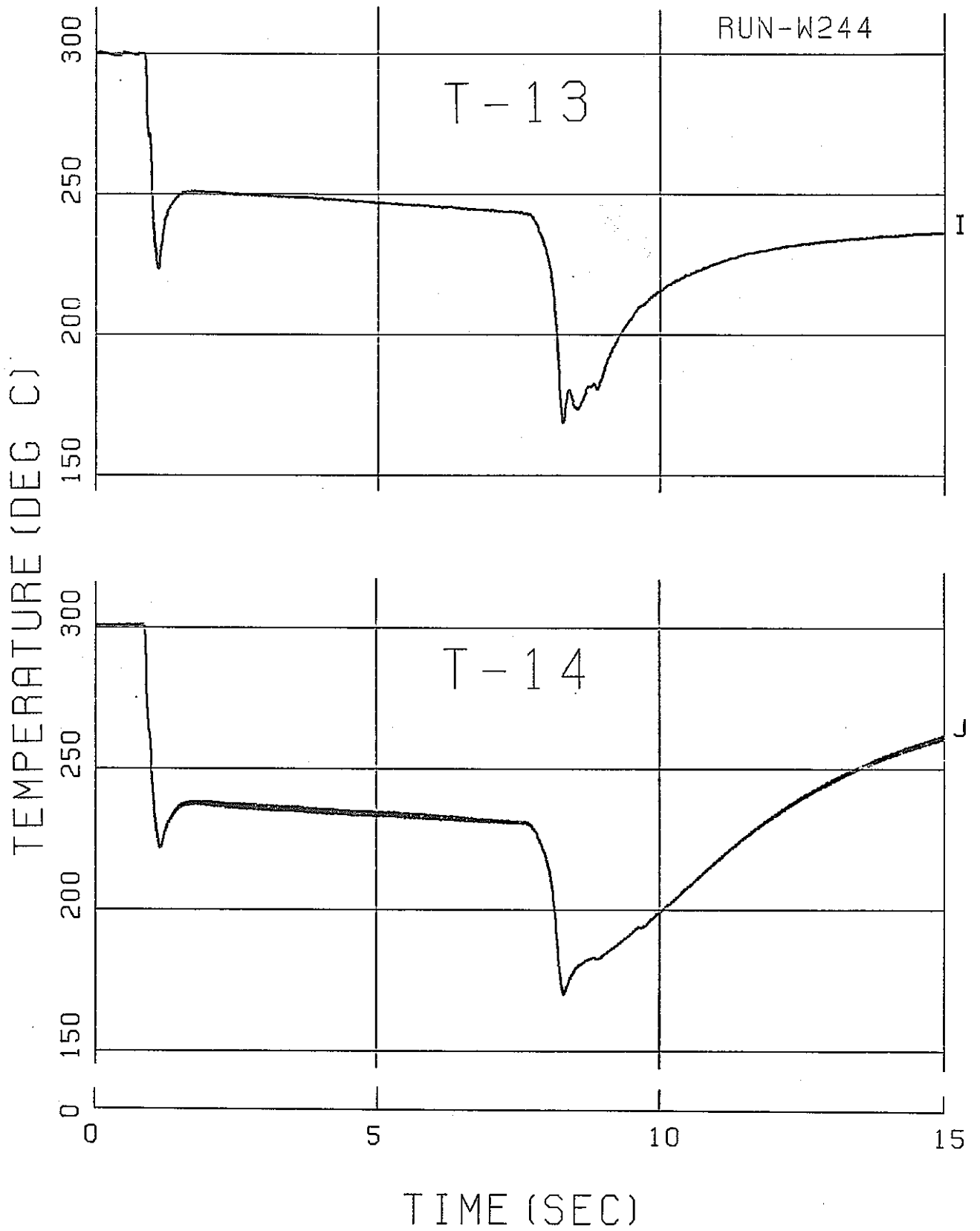


Fig. A.7-15 Temperature Transient

Appendix 8 Run-W252 試験データ

- Fig. A. 8-1 ~A. 8-5 Thrust Force Transient
- Fig. A. 8-6 ~A. 8-10 Pressure Transient
- Fig. A. 8-11 Pressure and Temperature
 in Water Heater Tank
- Fig. A. 8-12~A. 8-17 Temperature Transient

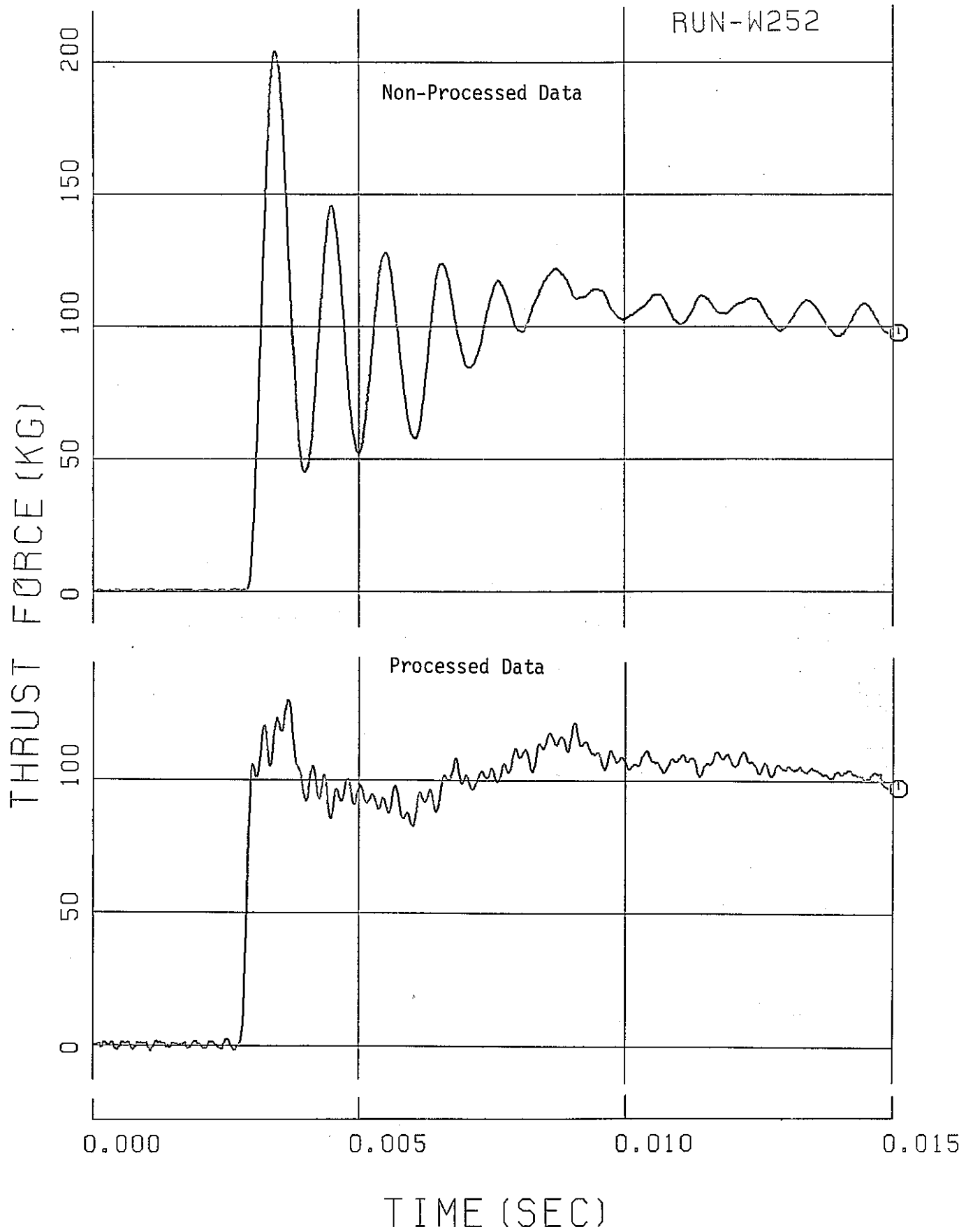


Fig. A.8-1 Thrust Force Transient

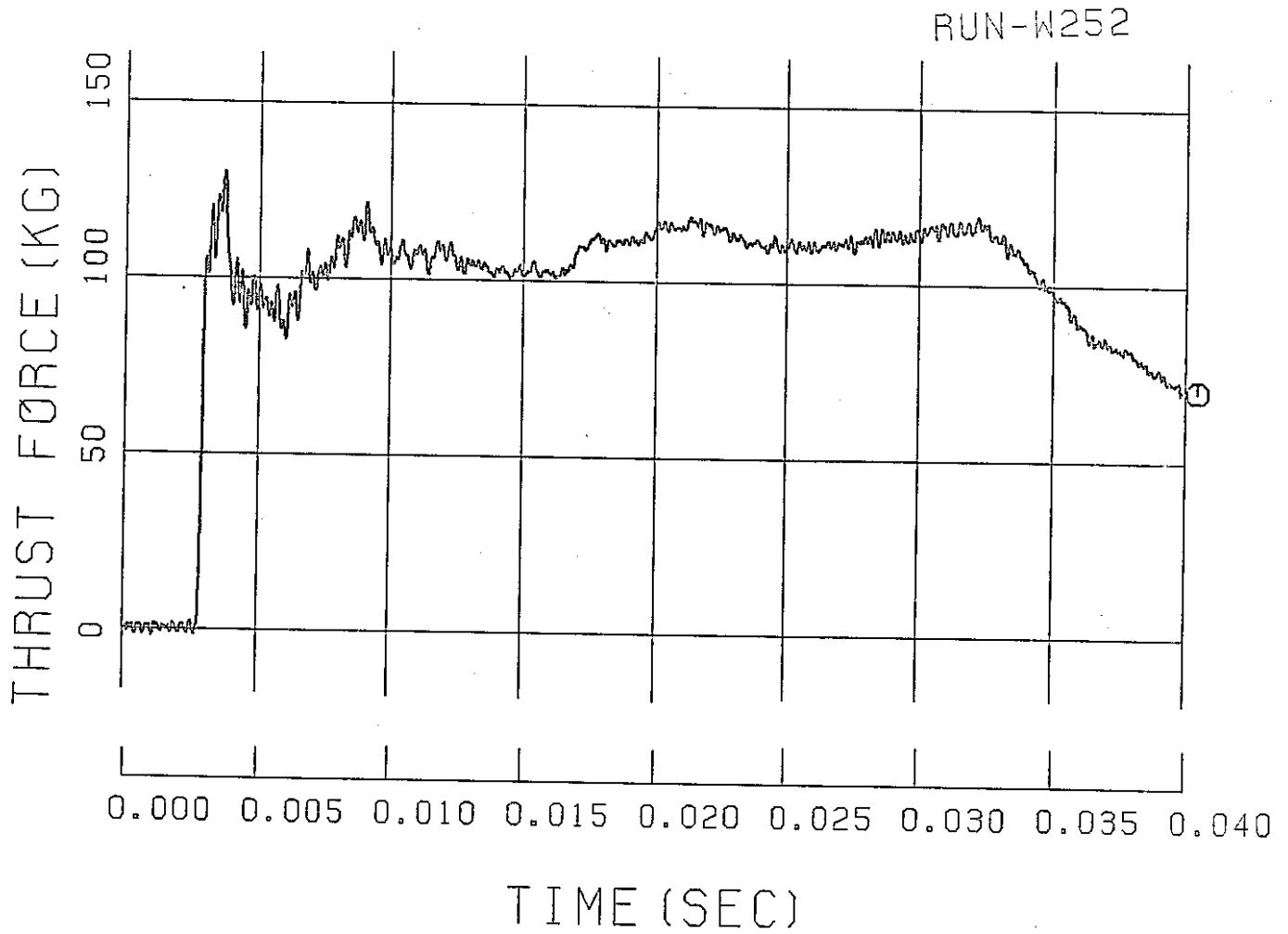


Fig. A.8-2 Thrust Force Transient

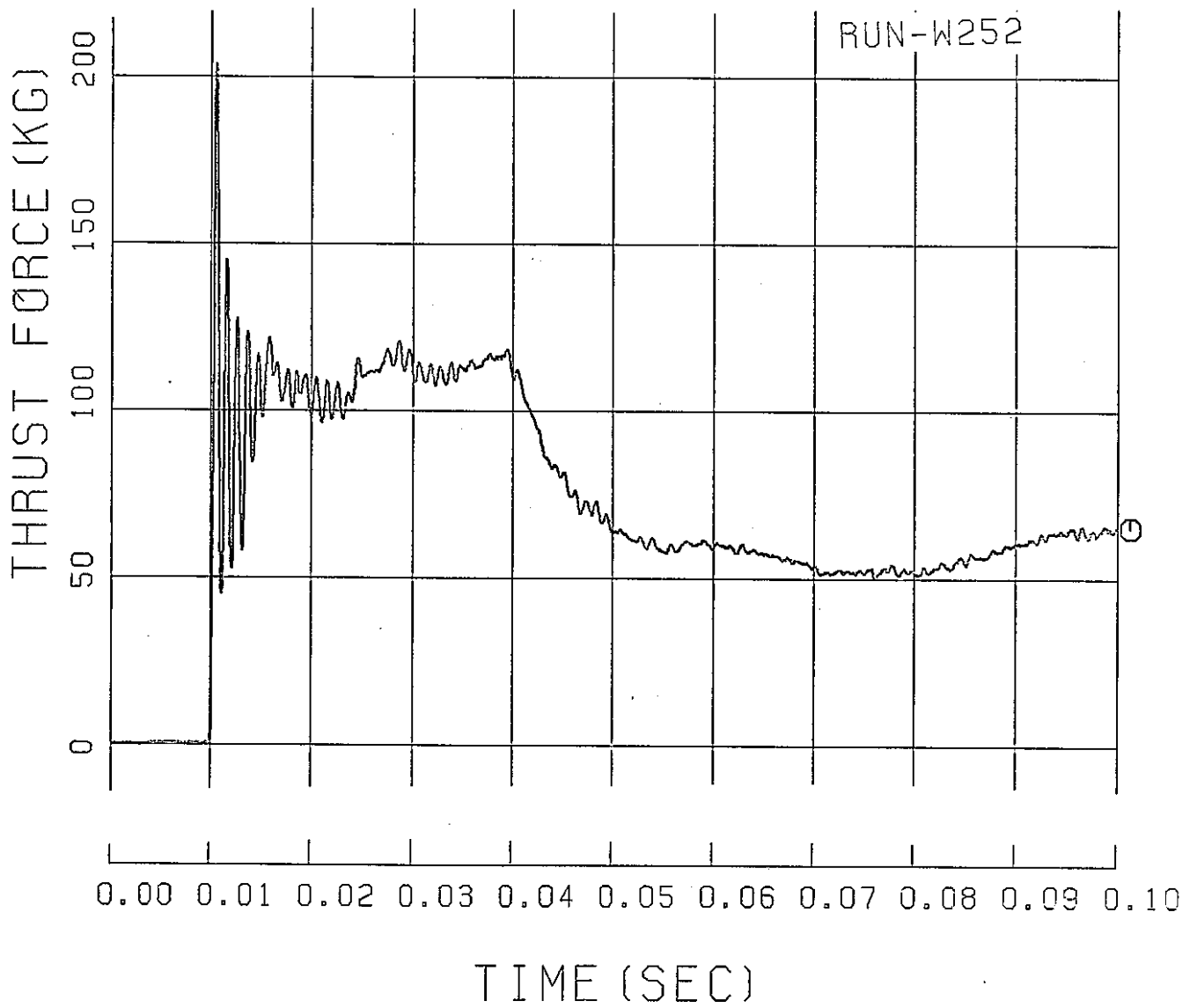


Fig. A.8-3 Thrust Force Transient

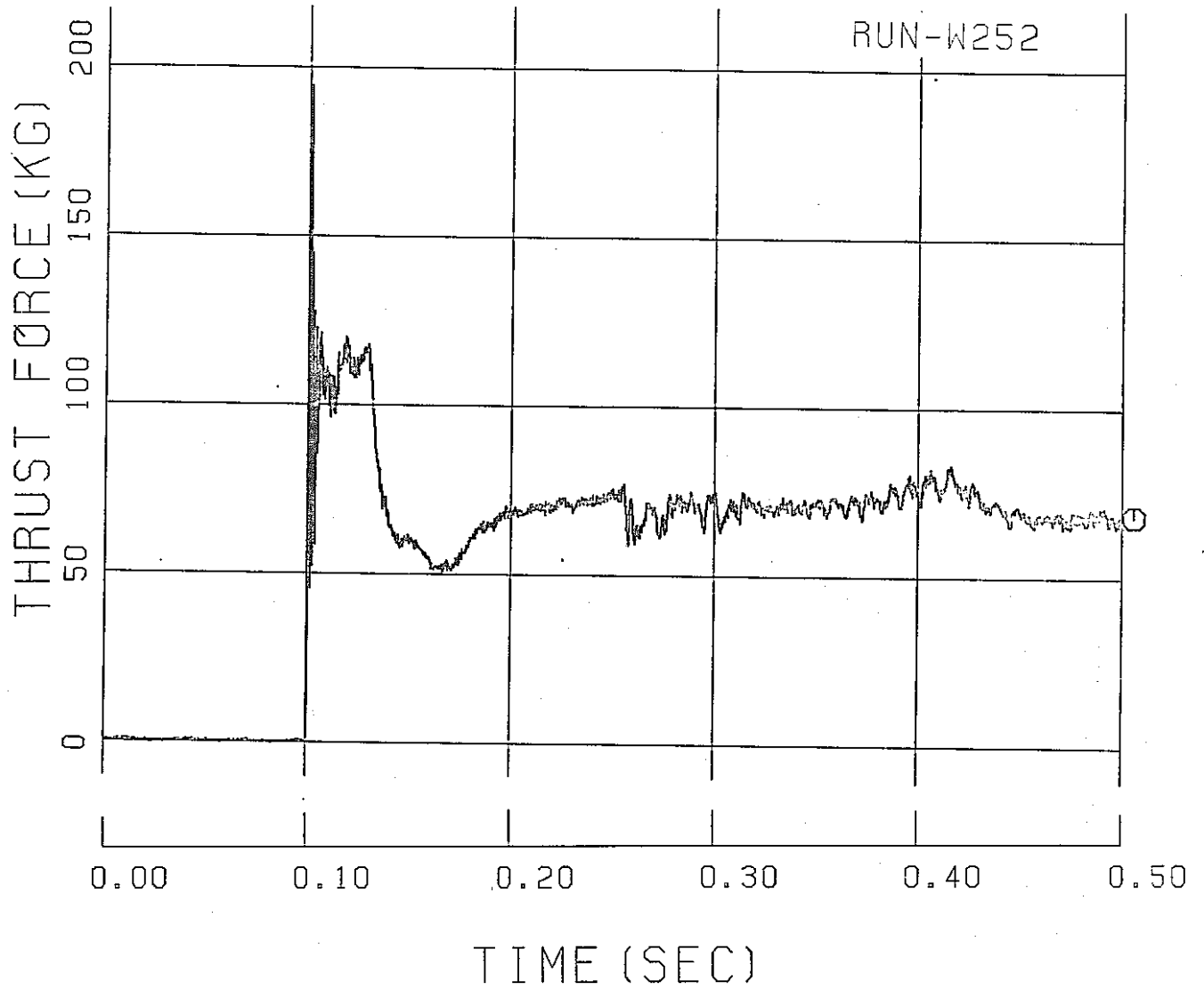


Fig. A.8-4 Thrust Force Transient

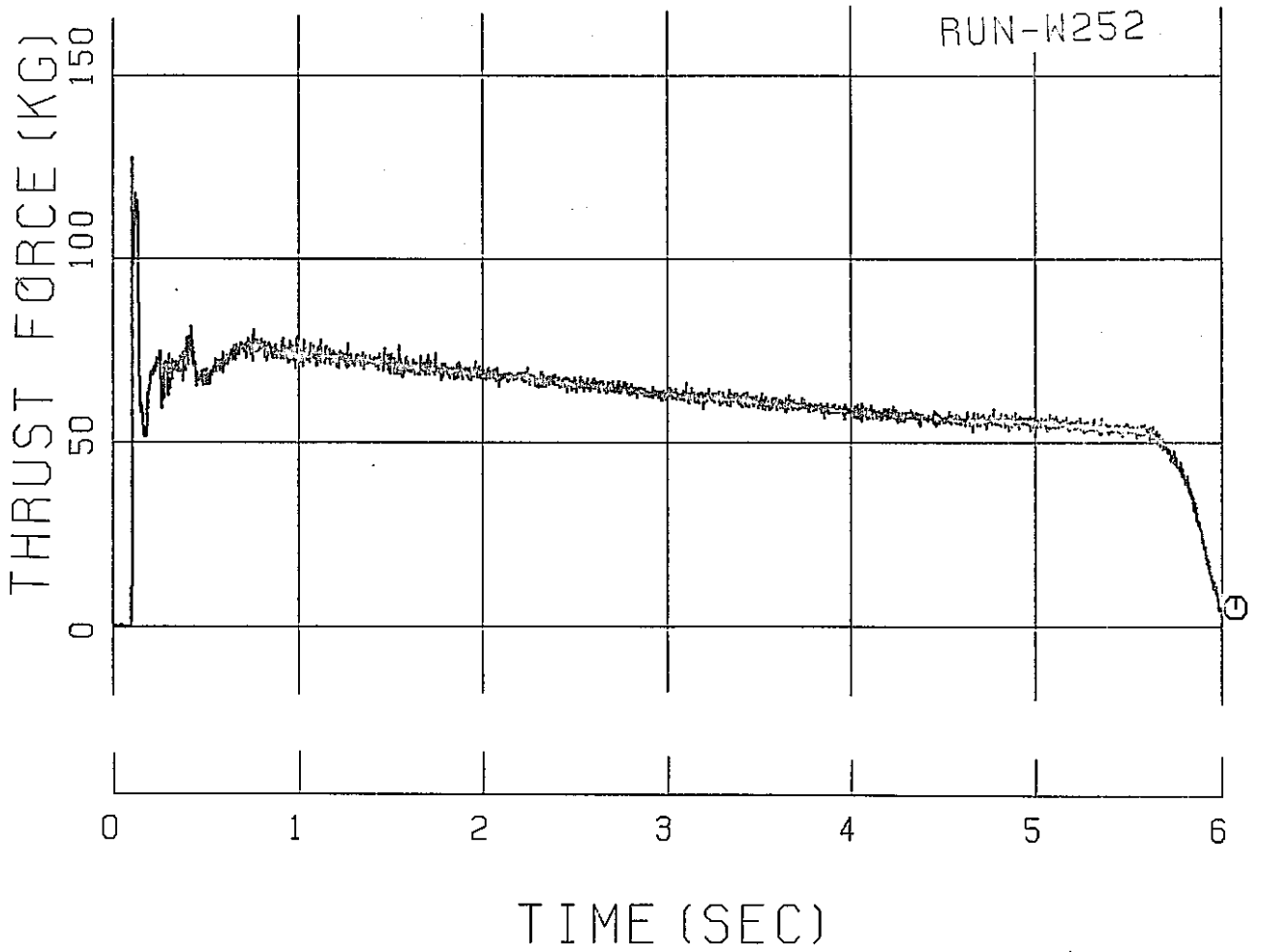


Fig. A.8-5 Thrust Force Transient

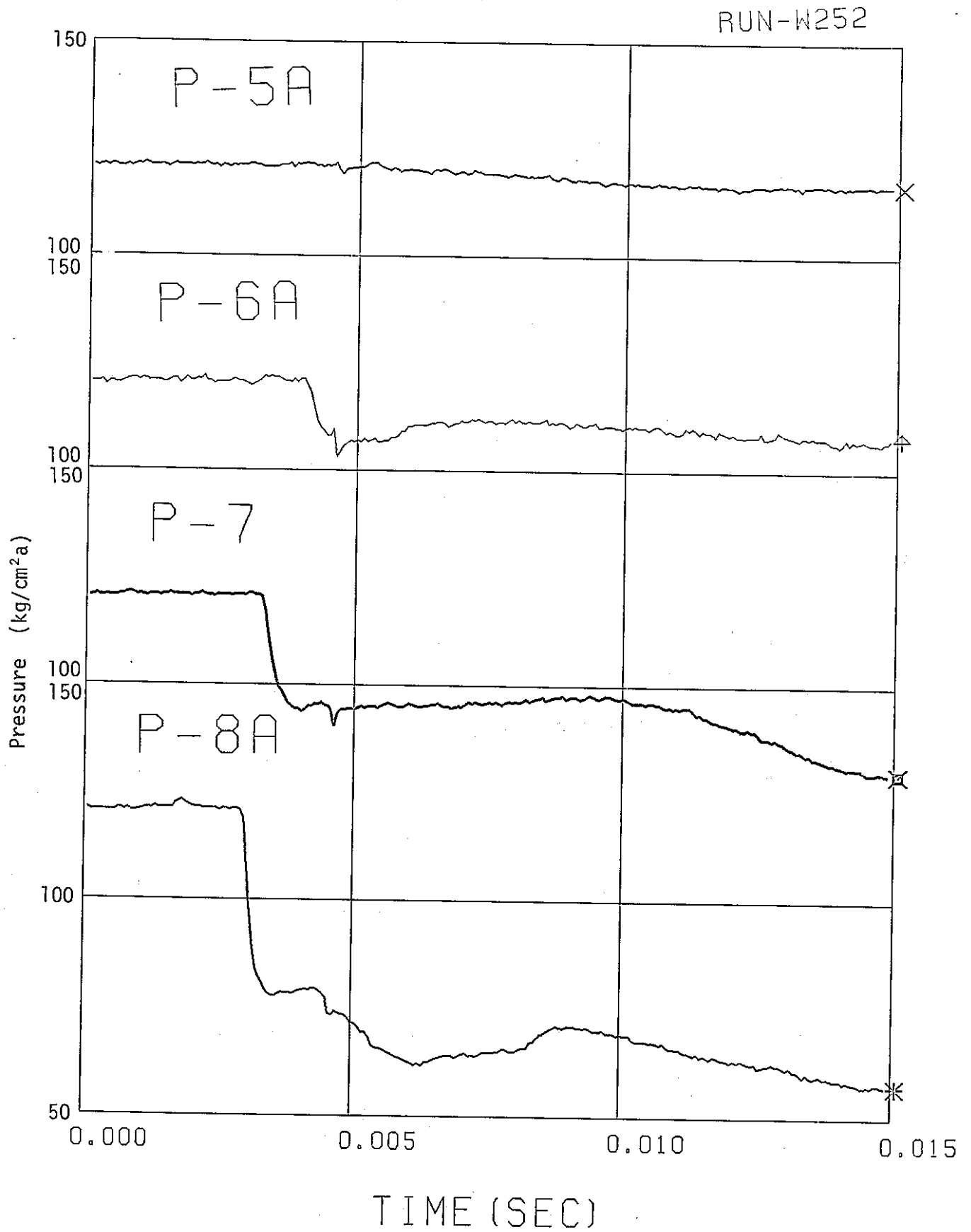


Fig. A.8-6 Pressure Transient

RUN-W252

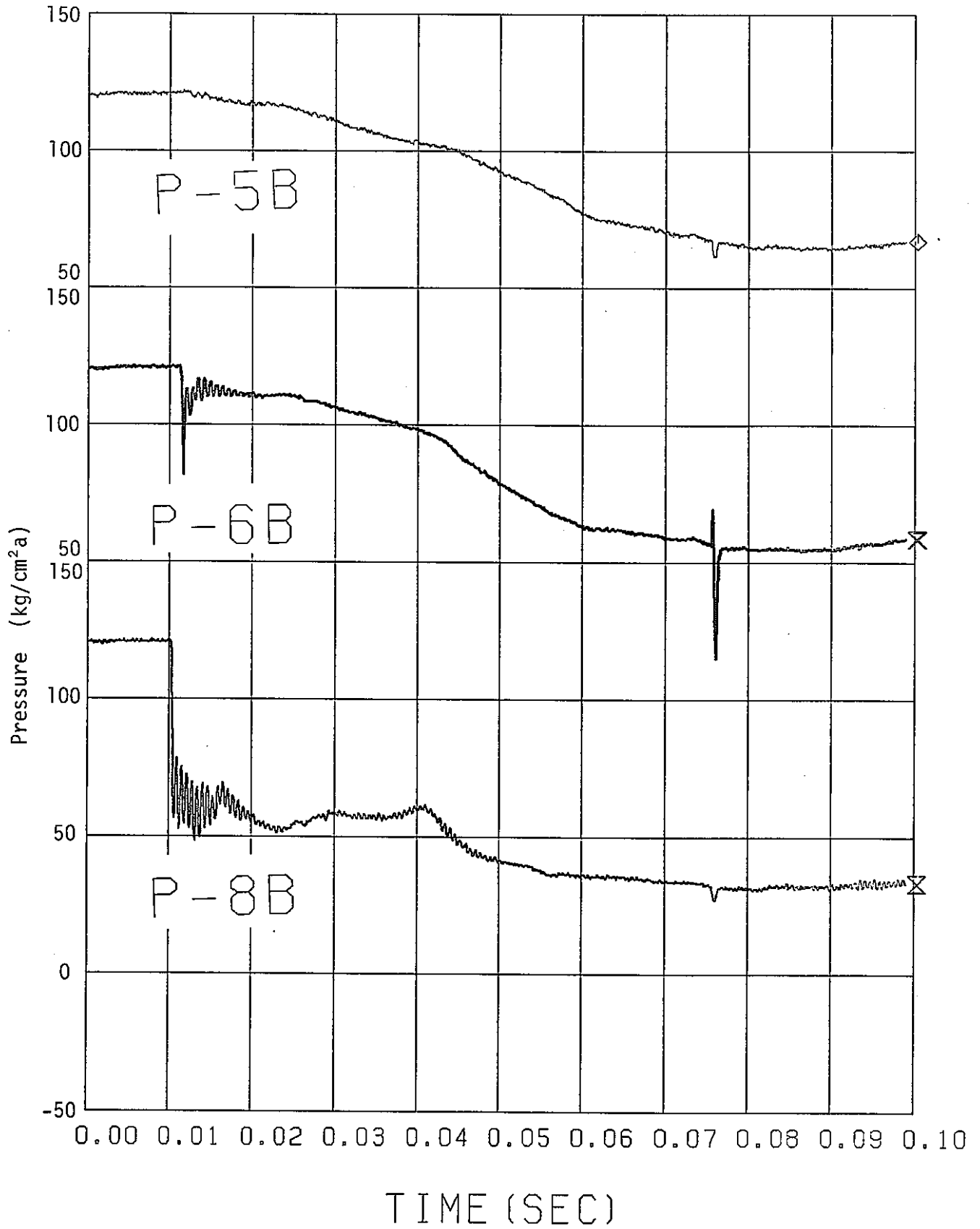


Fig. A.8-7 Pressure Transient

RUN-W252

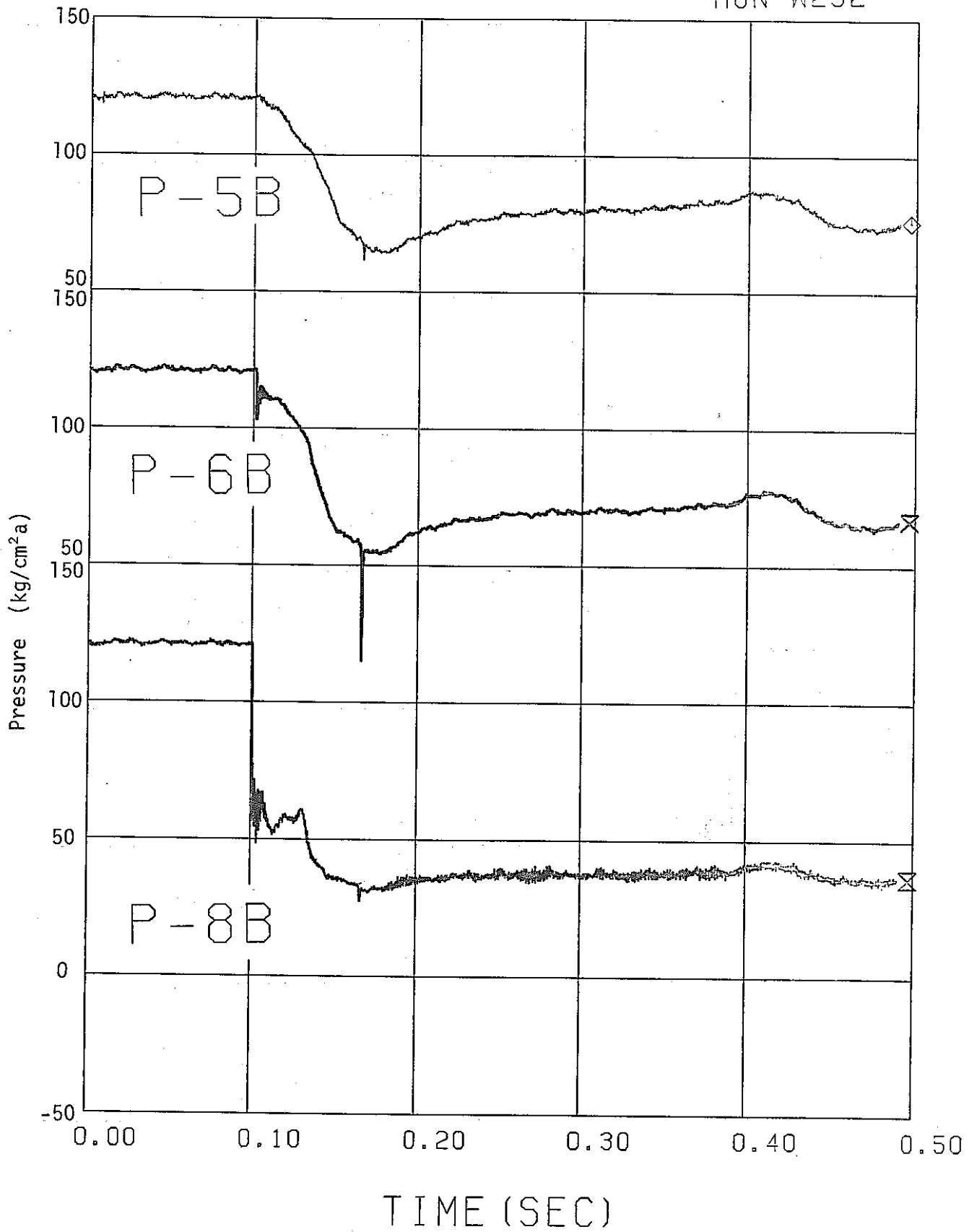


Fig. A.8-8 Pressure Transient

RUN-W252

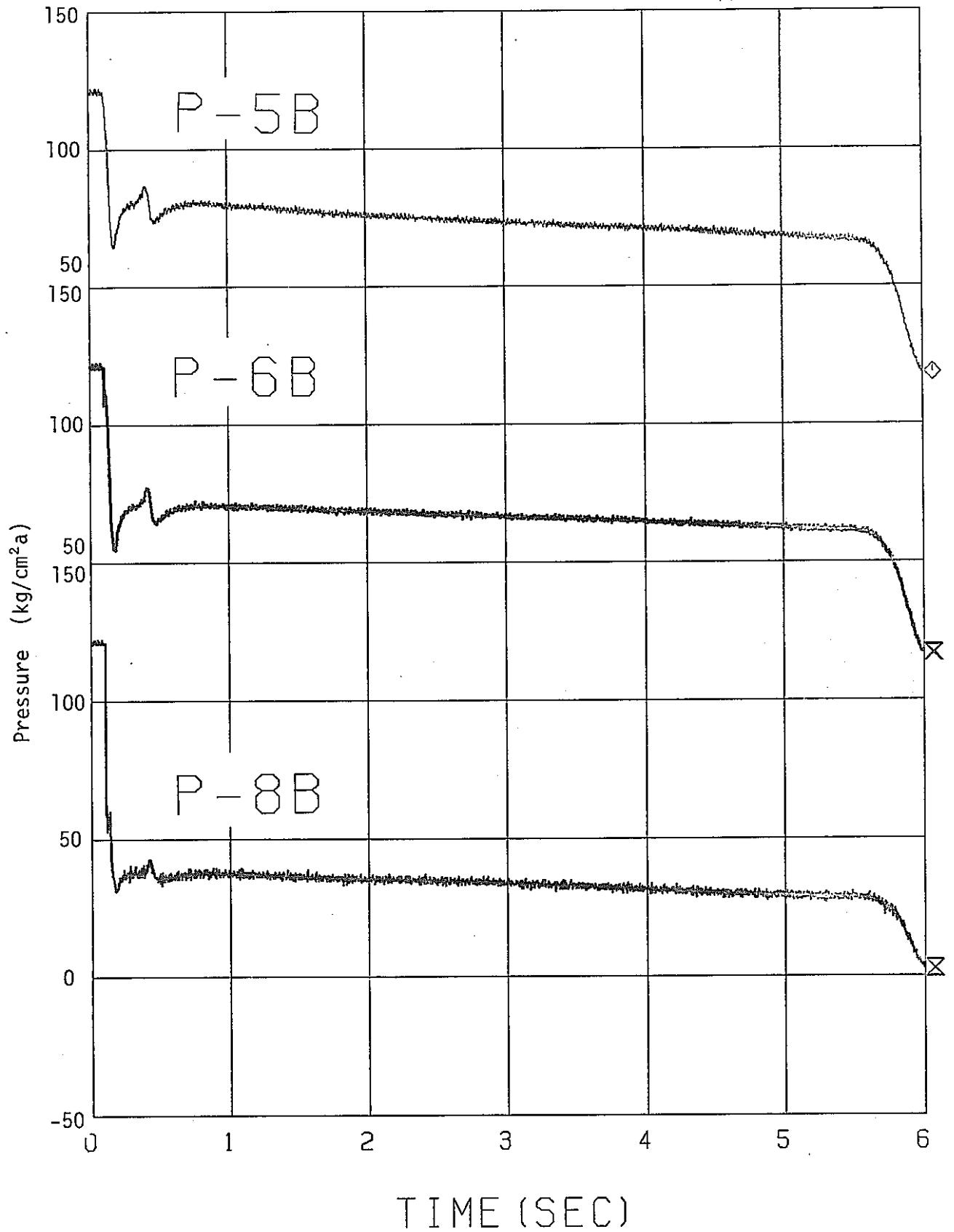


Fig. A.8-9 Pressure Transient

RUN-W252

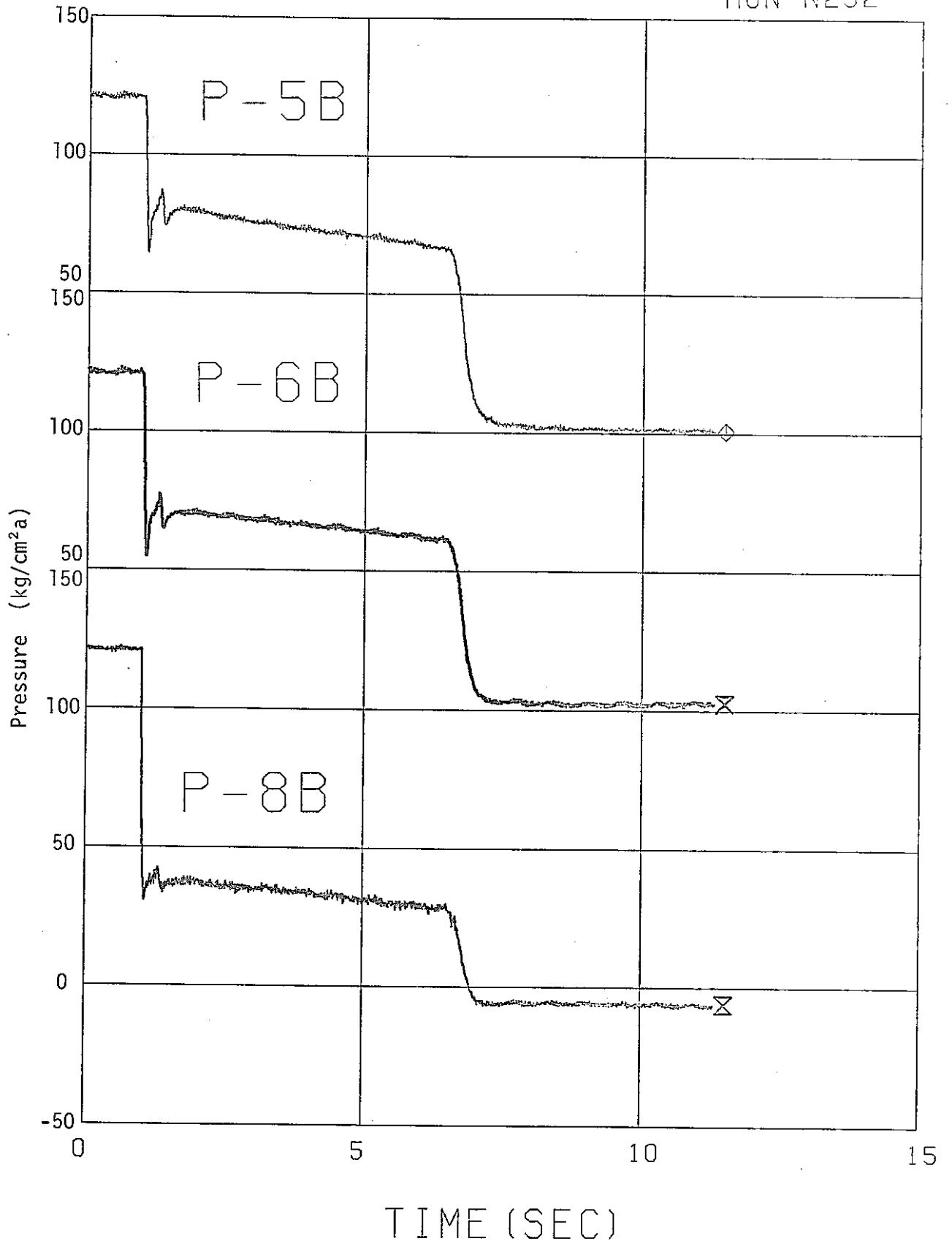


Fig. A.8-10 Pressure Transient

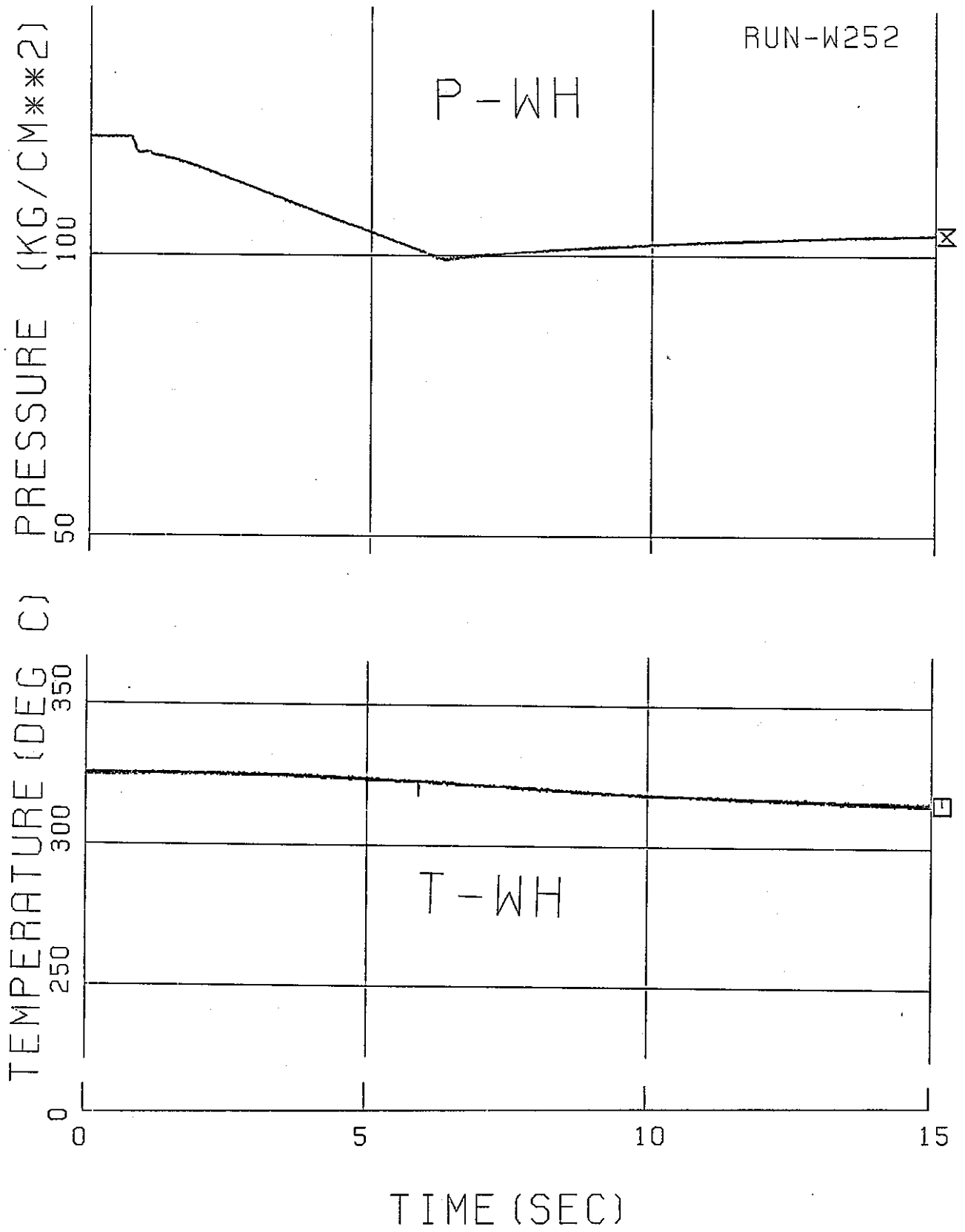


Fig. A.8-11 Pressure and Temperature in Water Heater Tank

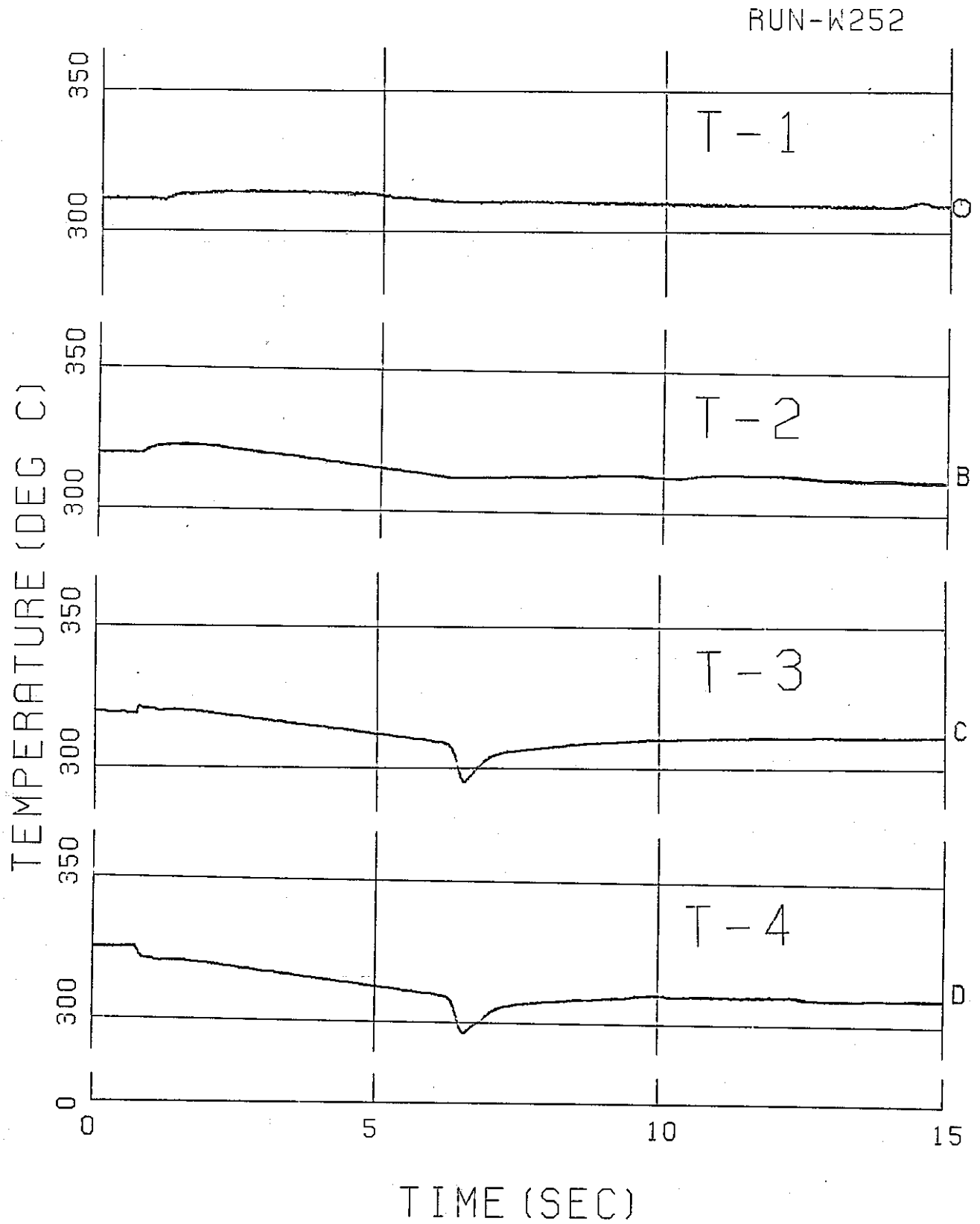


Fig. A.8-12 Temperature Transient

RUN-W252

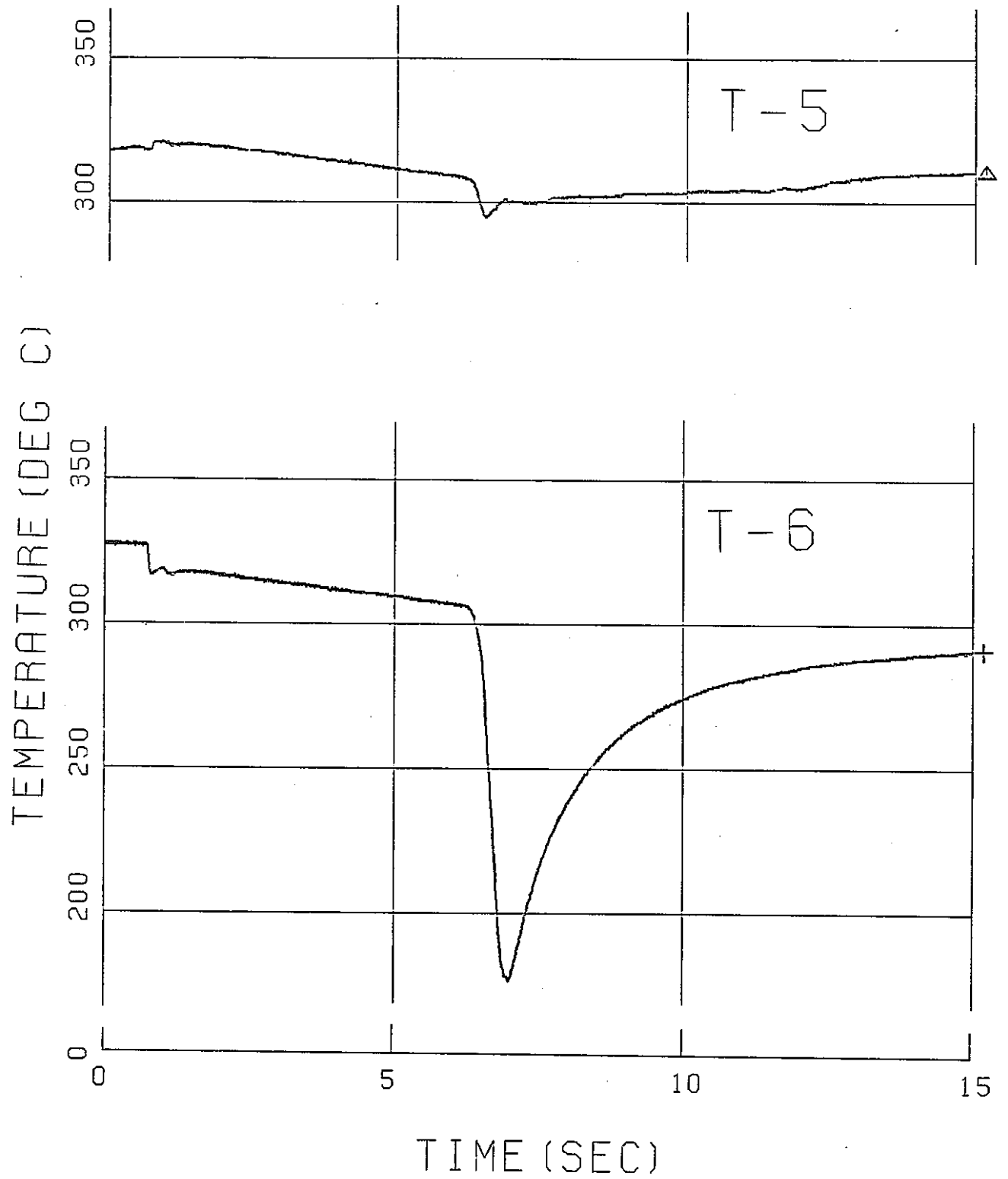


Fig. A.8-13 Temperature Transient

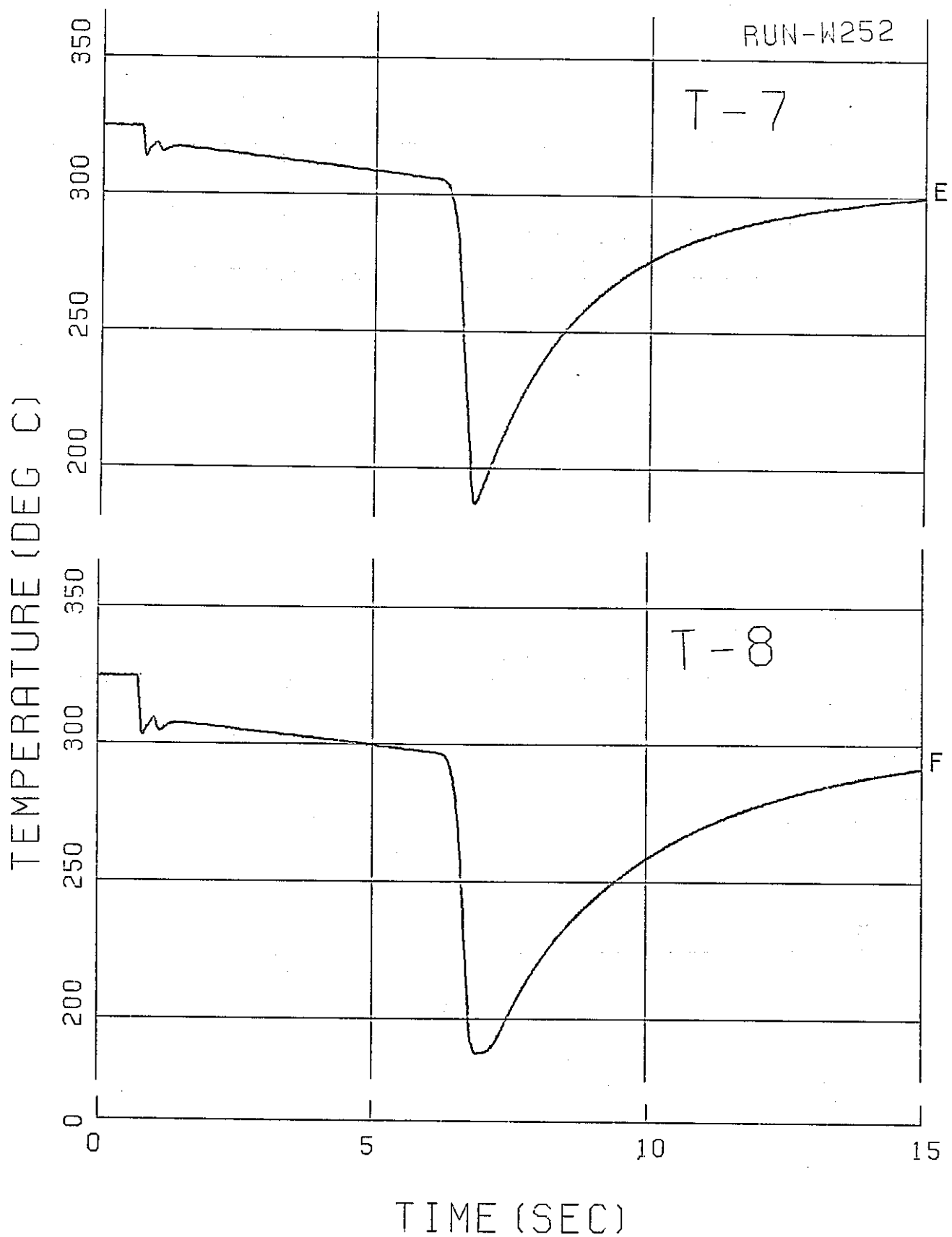


Fig. A.8-14 Temperature Transient

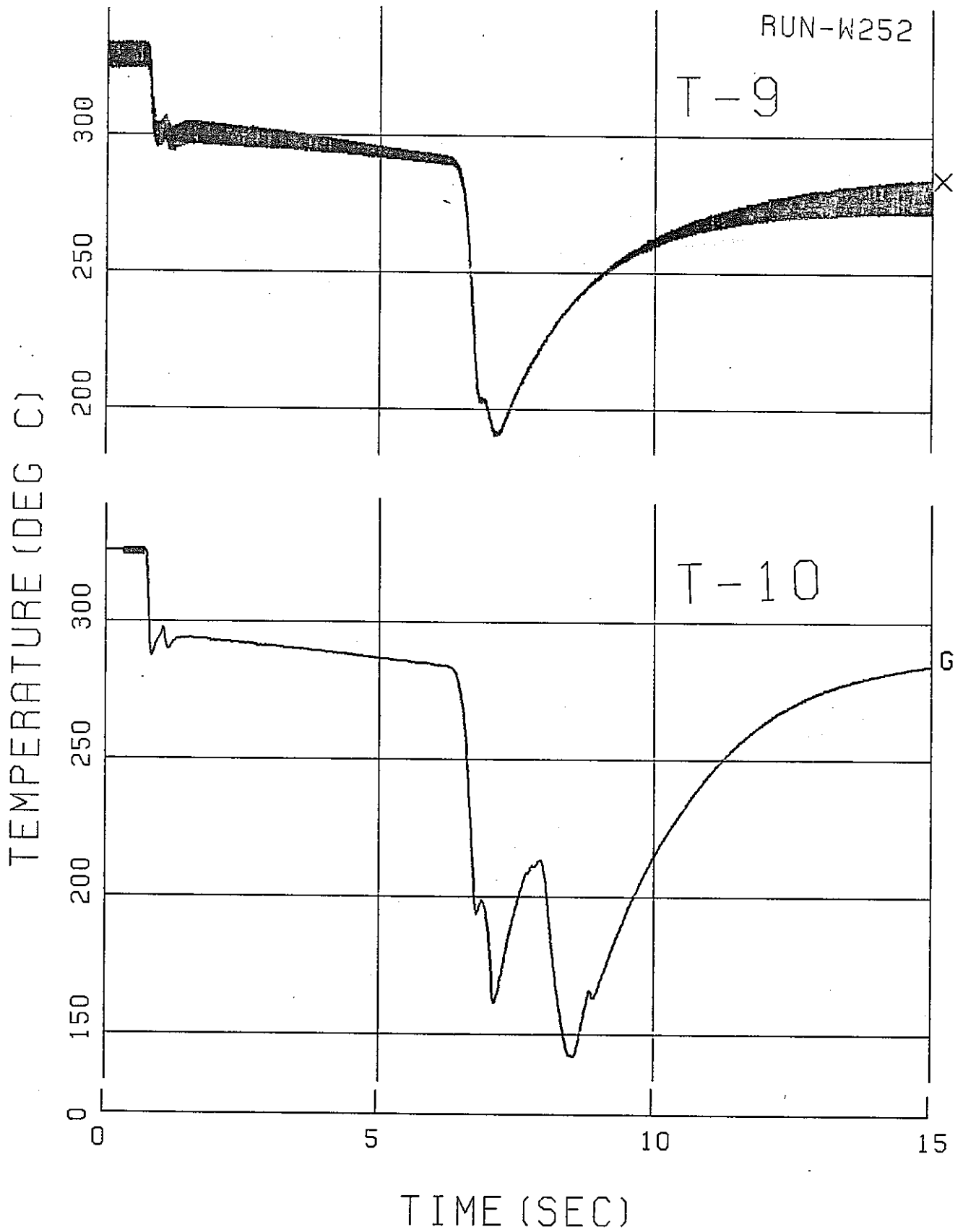


Fig. A.8-15 Temperature Transient

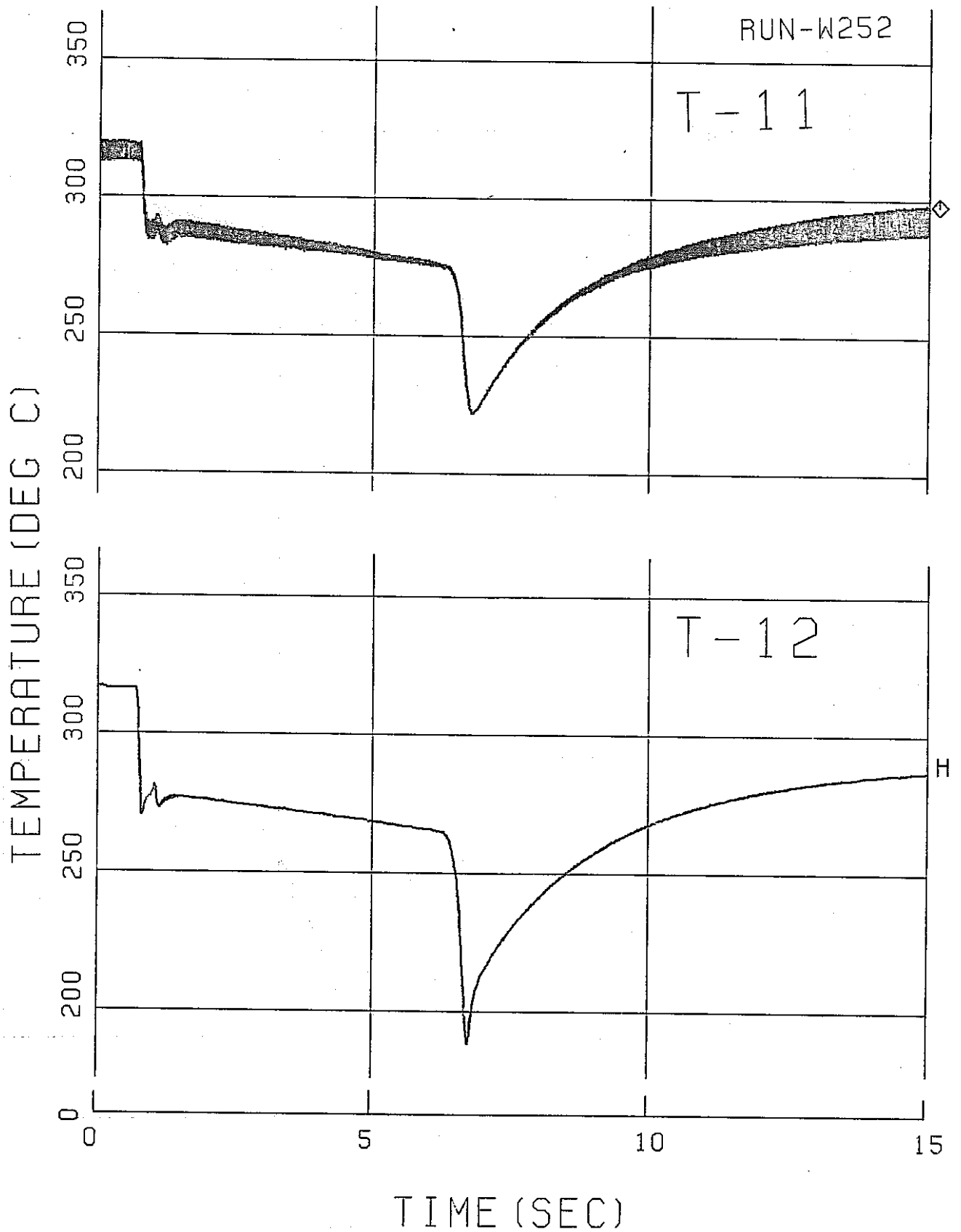


Fig. A.8-16 Temperature Transient

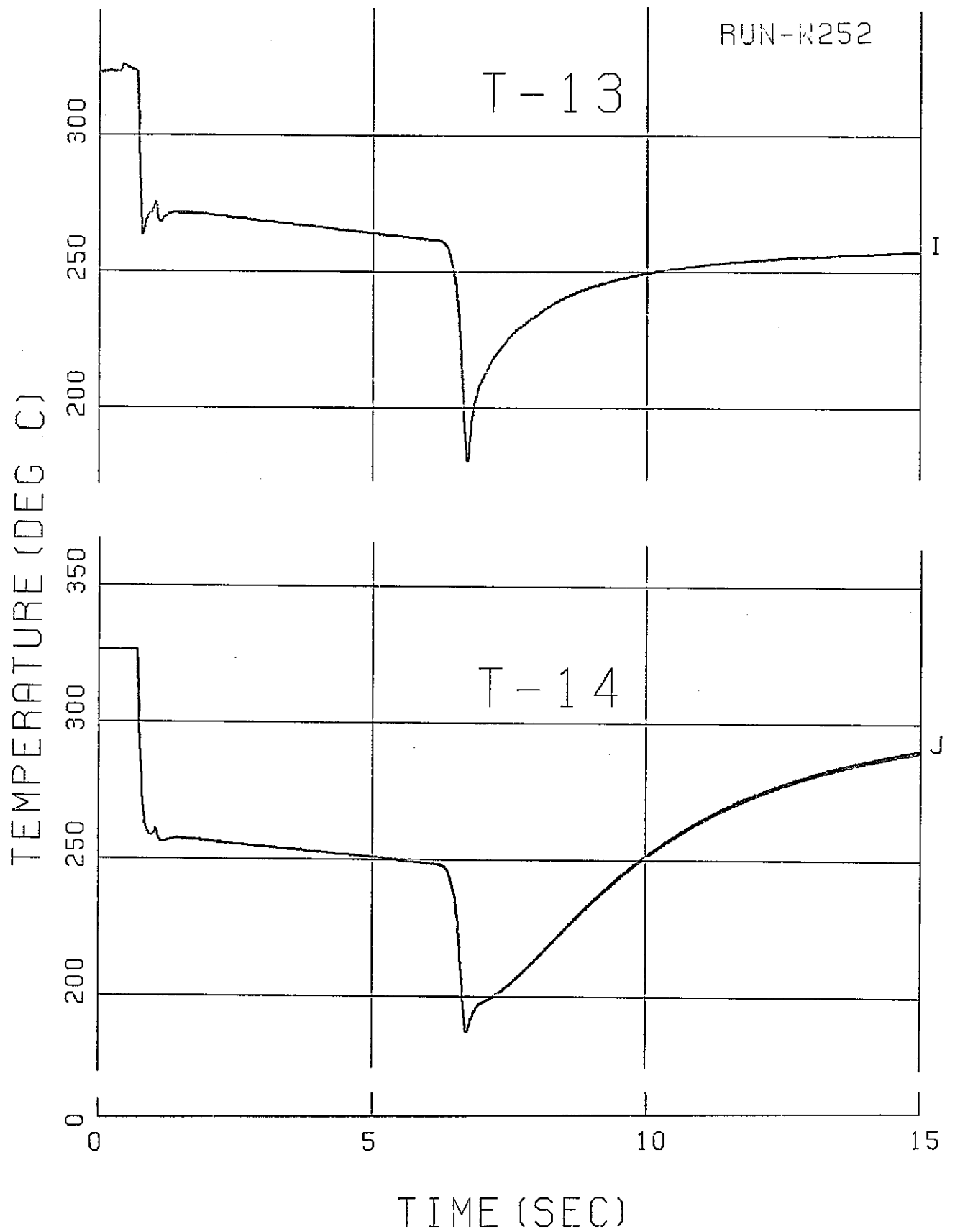


Fig. A.8-17 Temperature Transient

Appendix 9 Run-W332 試験データ

- Fig. A. 9-1 ~A. 9-3 Thrust Force Transient
- Fig. A. 9-4 ~A. 9-7 Pressure Transient
- Fig. A. 9-8 Pressure and Temperature
 in Water Heater Tank
- Fig. A. 9-9 ~A. 9-14 Temperature Transient

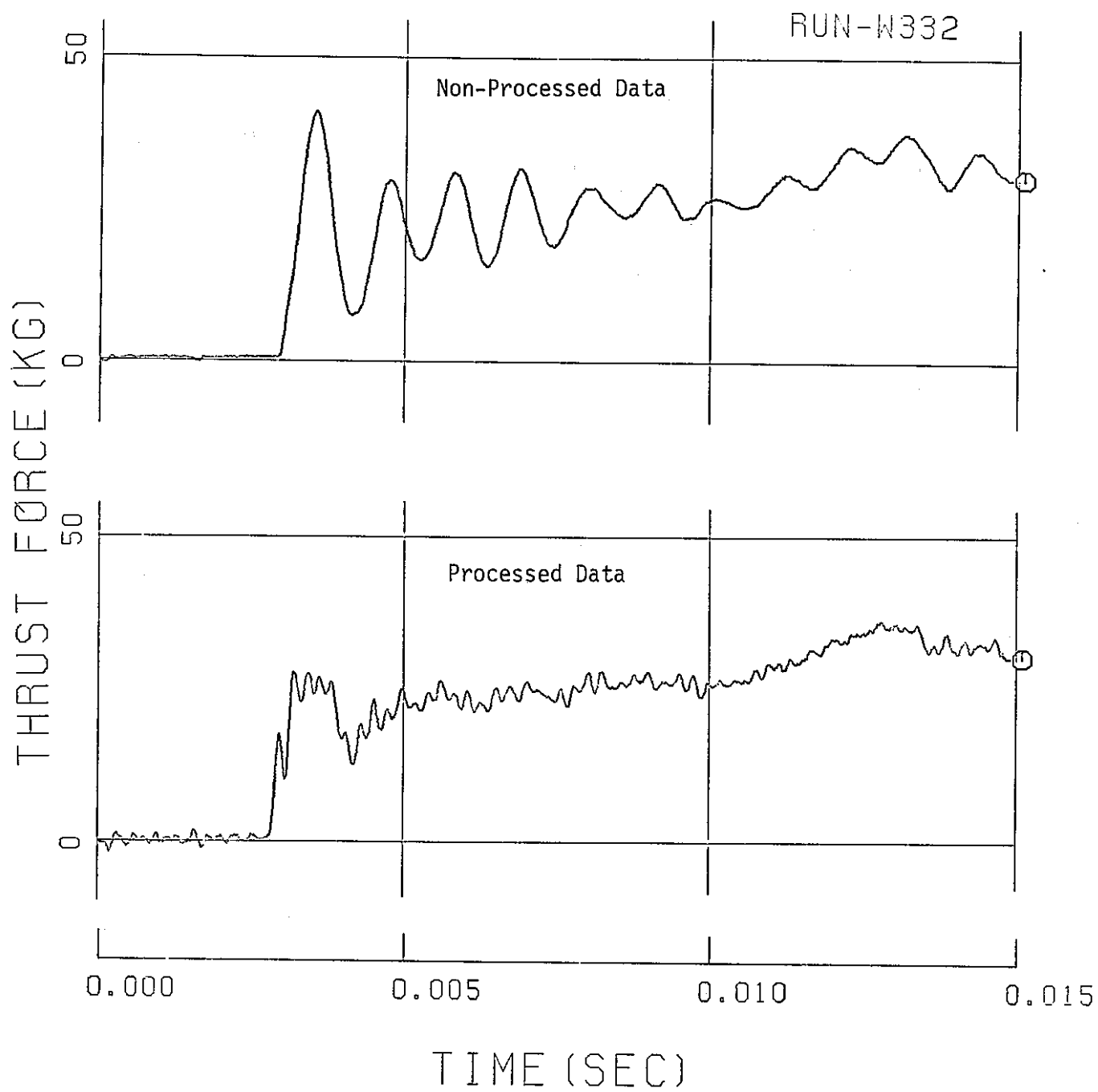


Fig. A.9-1 Thrust Force Transient

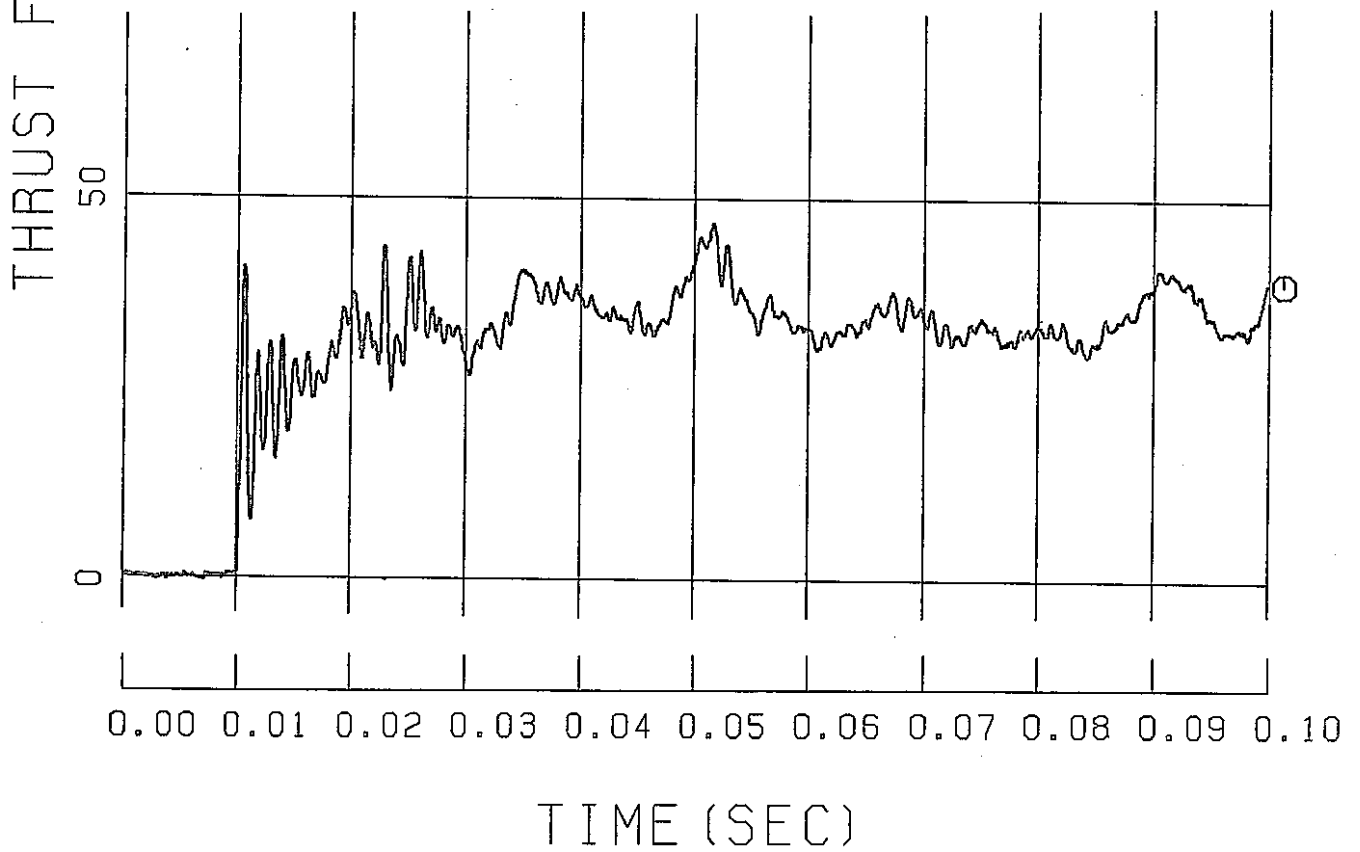
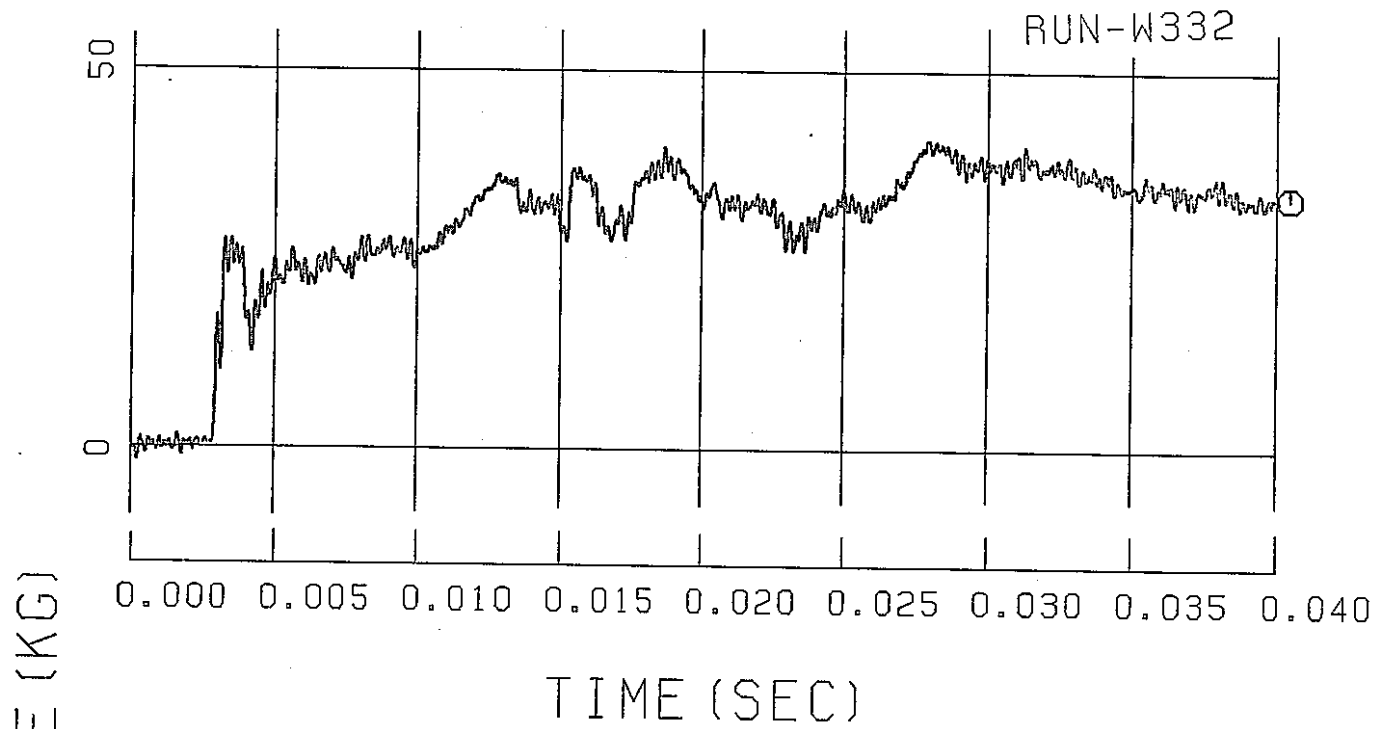


Fig. A.9-2 Thrust Force Transient

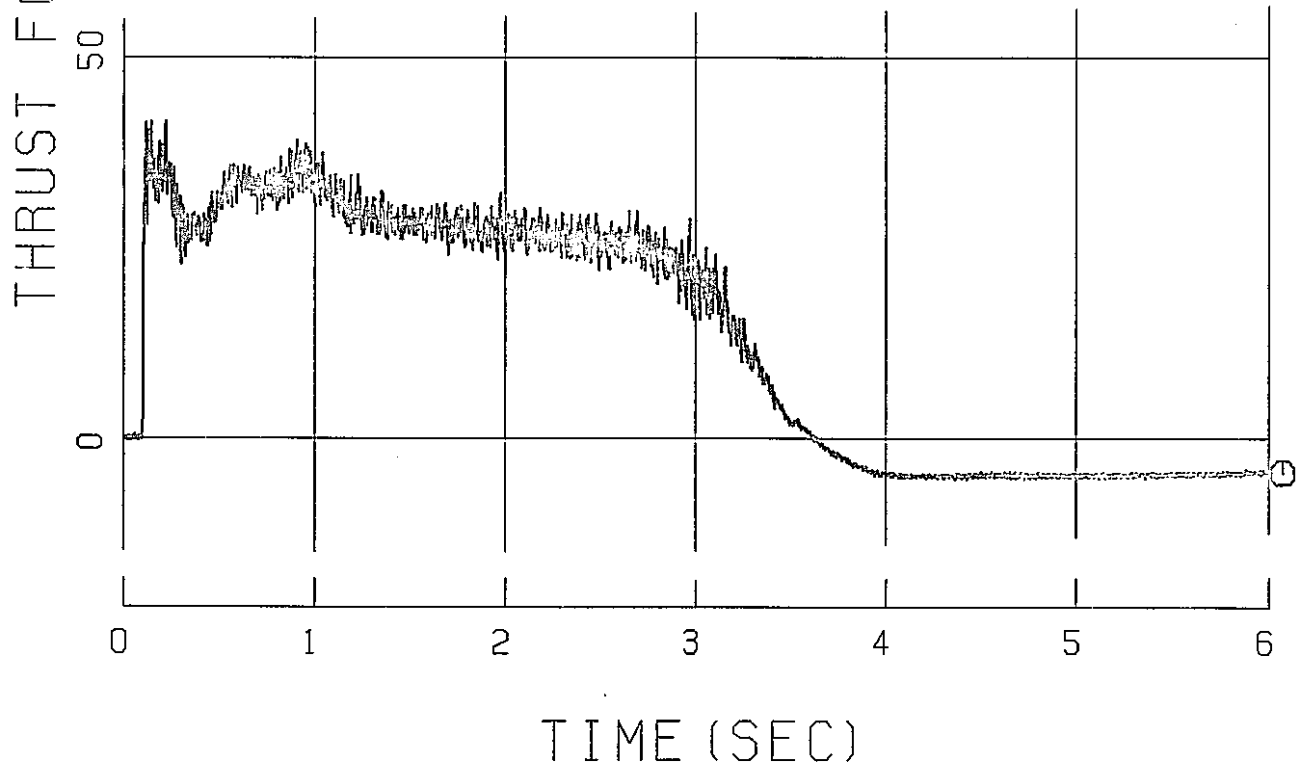
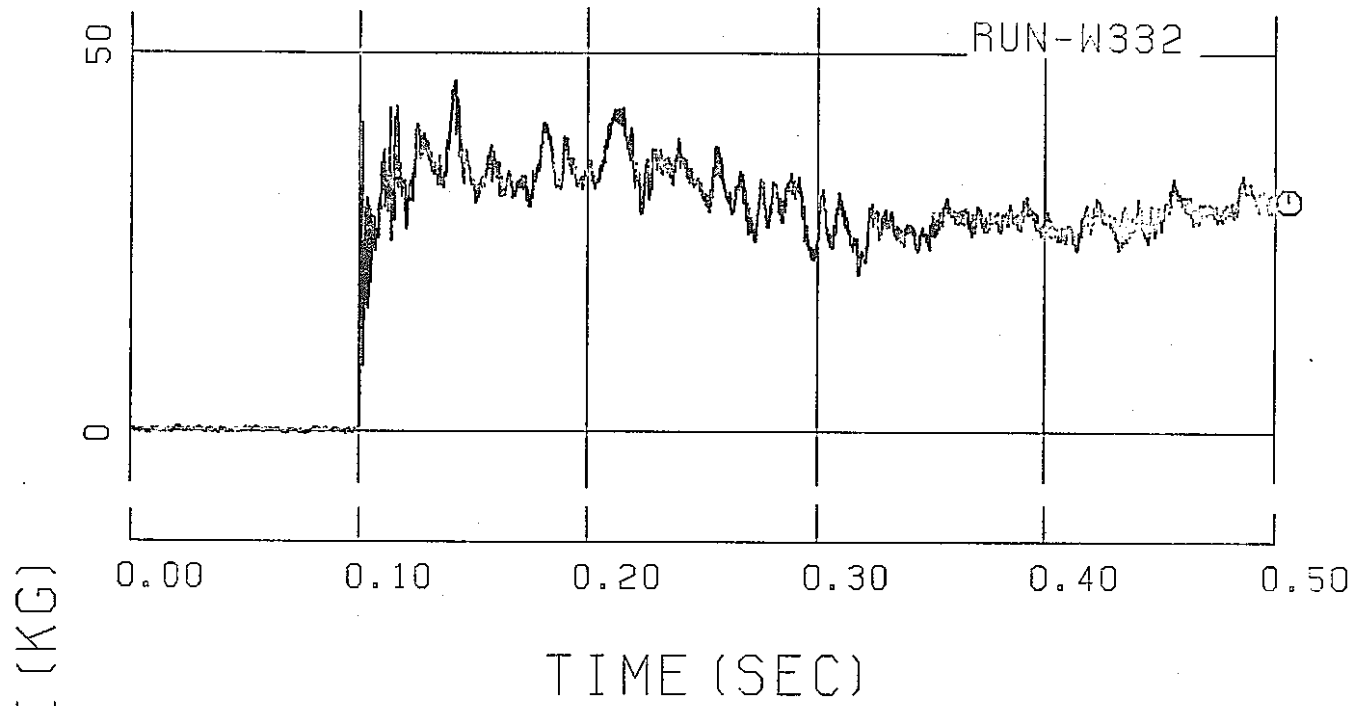


Fig. A.9-3 Thrust Force Transient

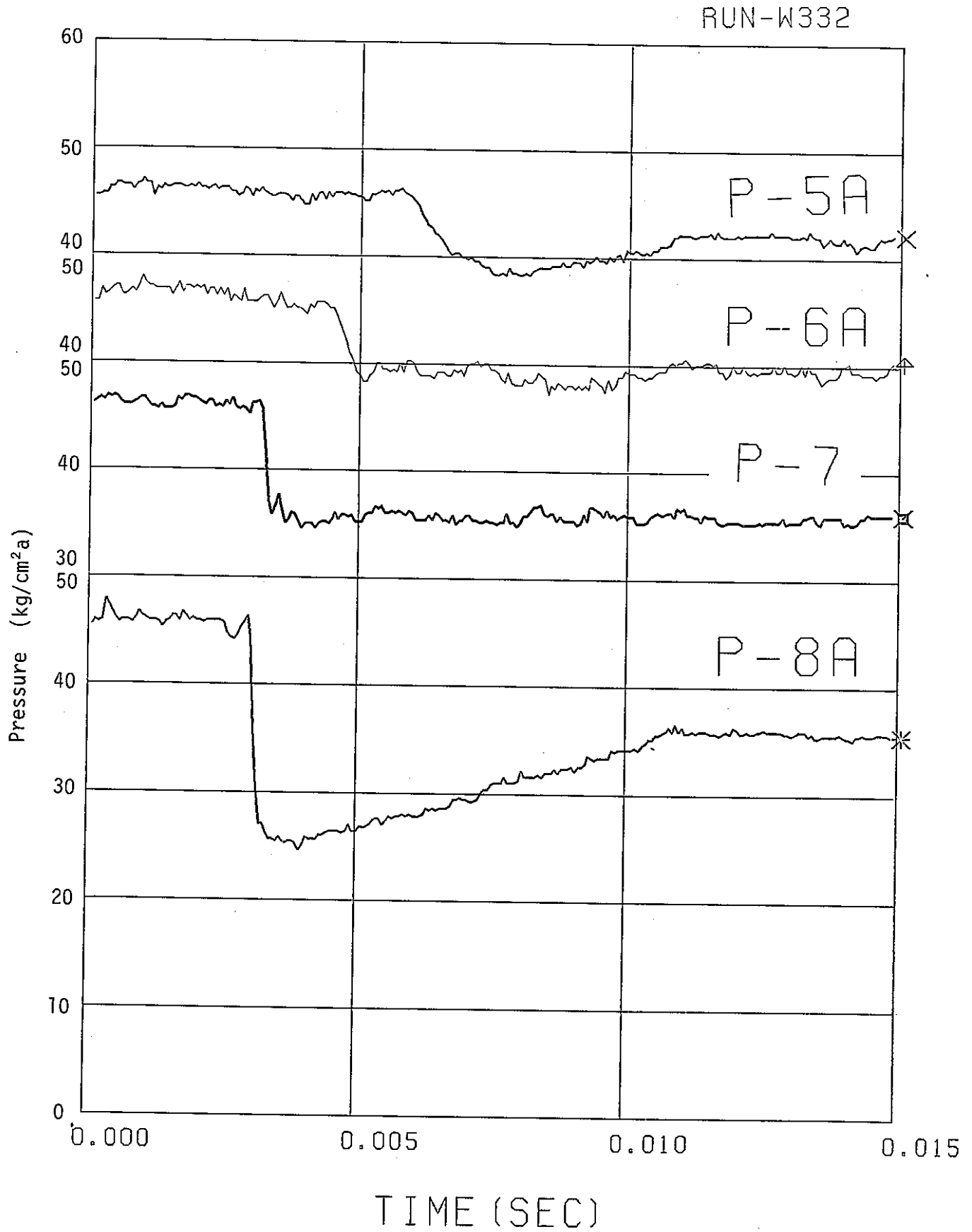


Fig. A.9-4 Pressure Transient

RUN-W332

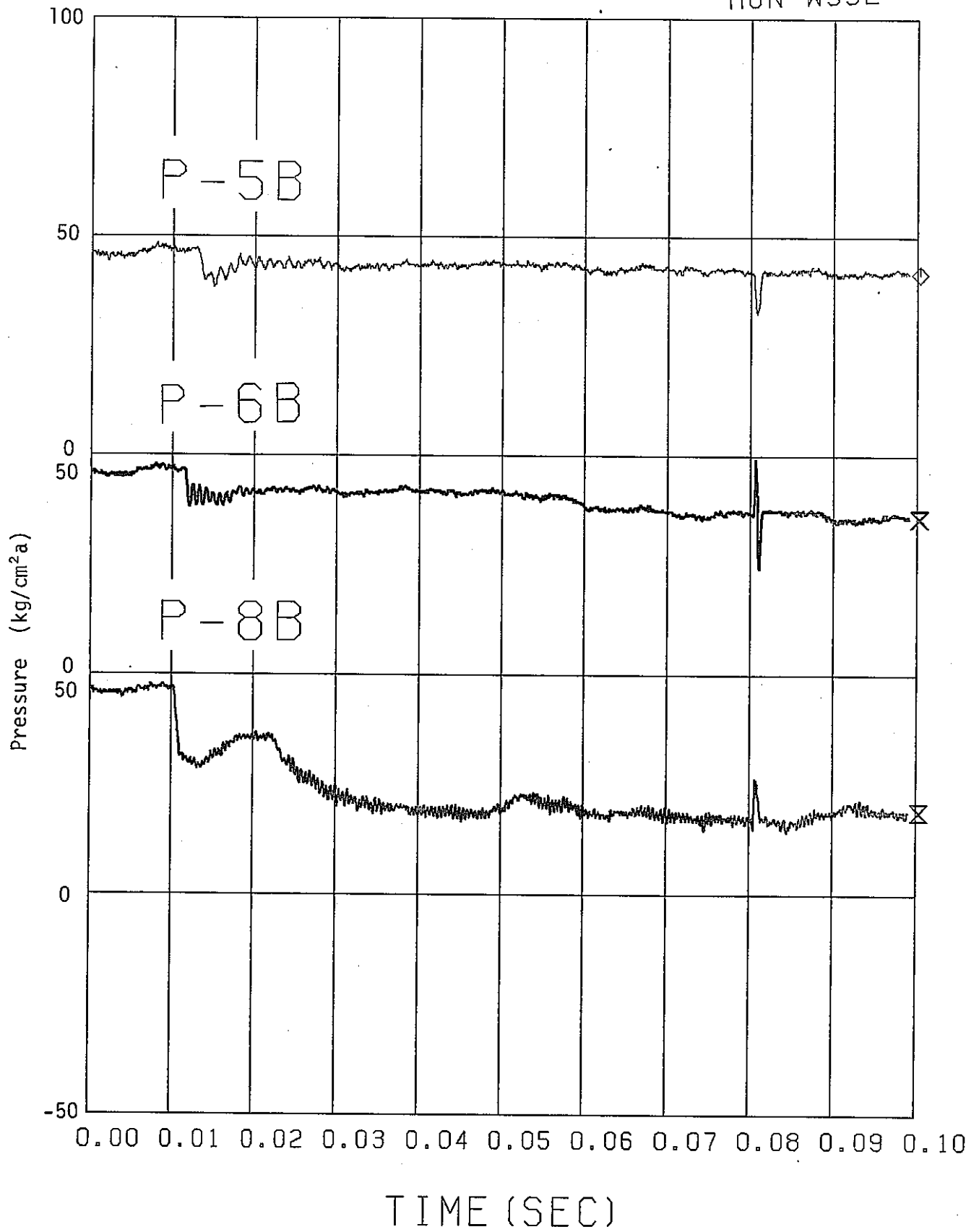


Fig. A.9-5 Pressure Transient

RUN-W332

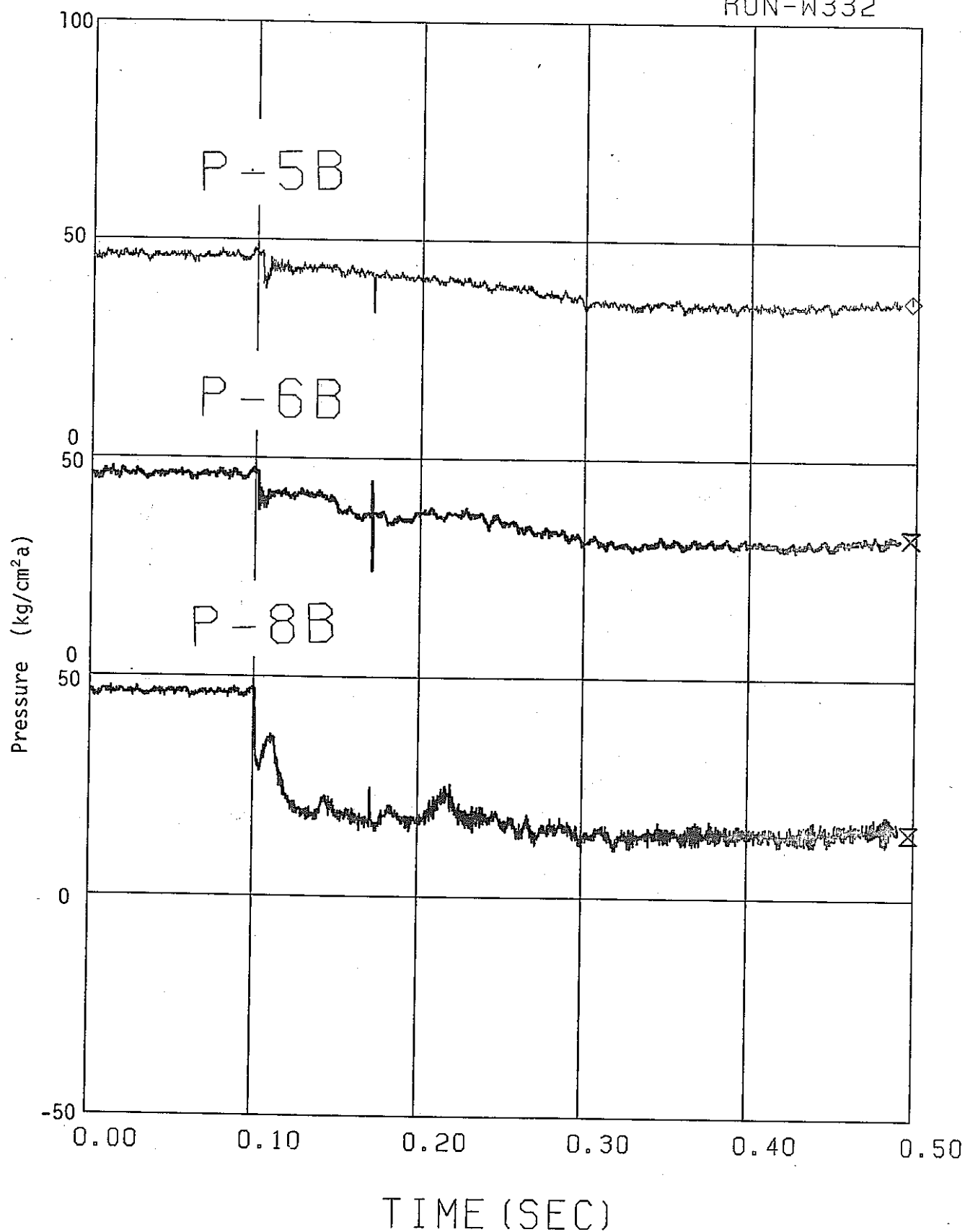
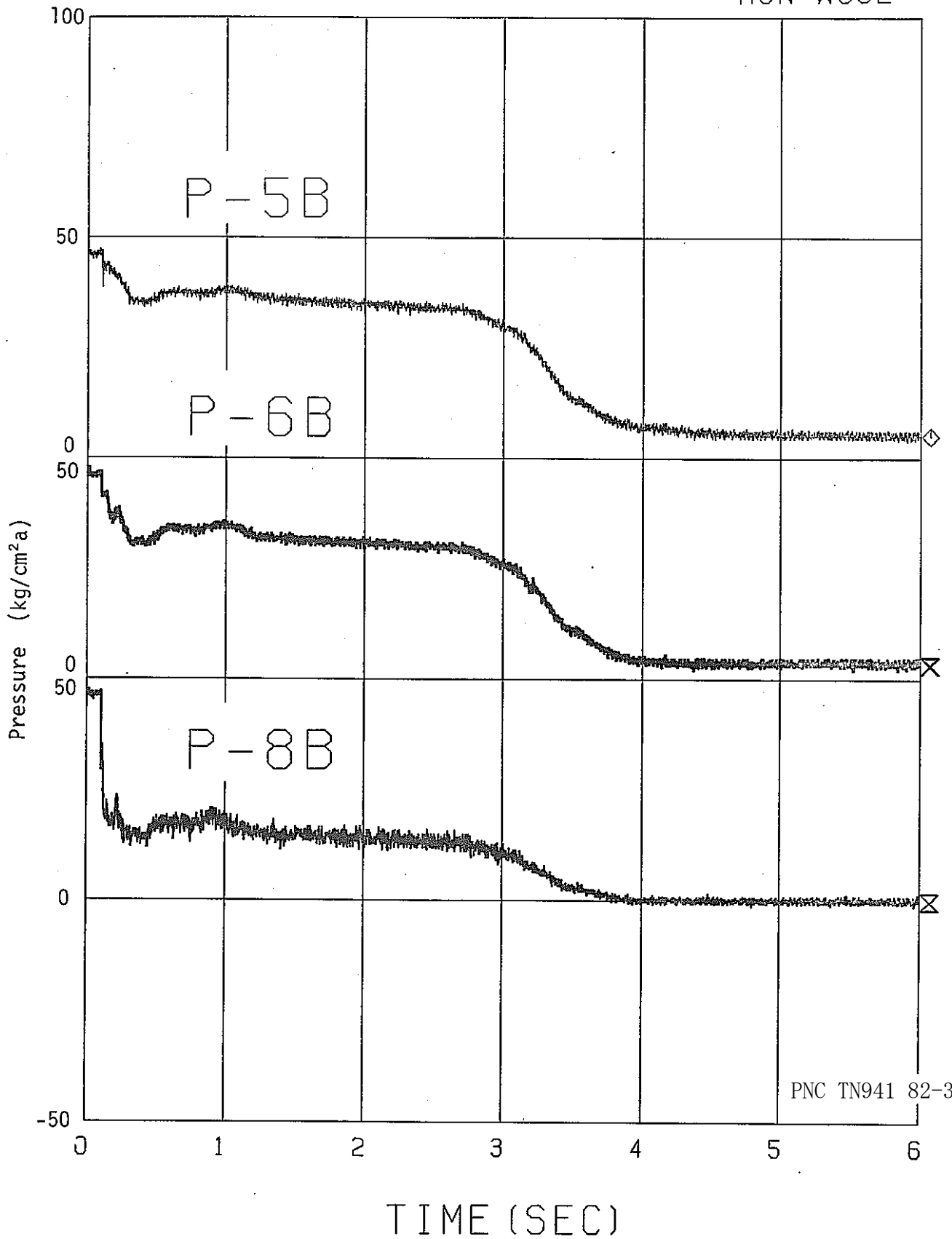


Fig. A.9-6 Pressure Transient

RUN-W332



PNC TN941 82-37

Fig. A.9-7 Pressure Transient

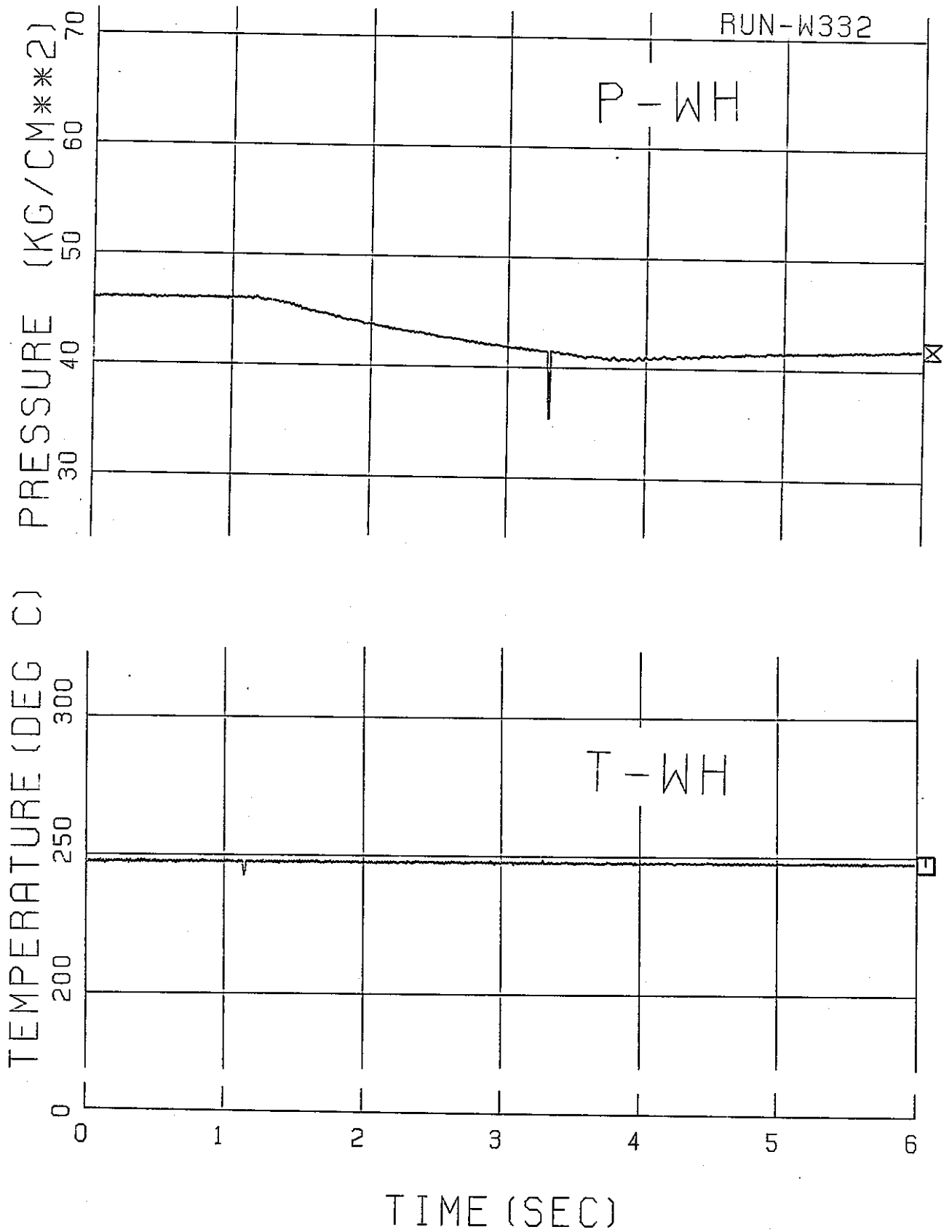


Fig. A.9-8 Pressure and Temperature in Water Heater Tank

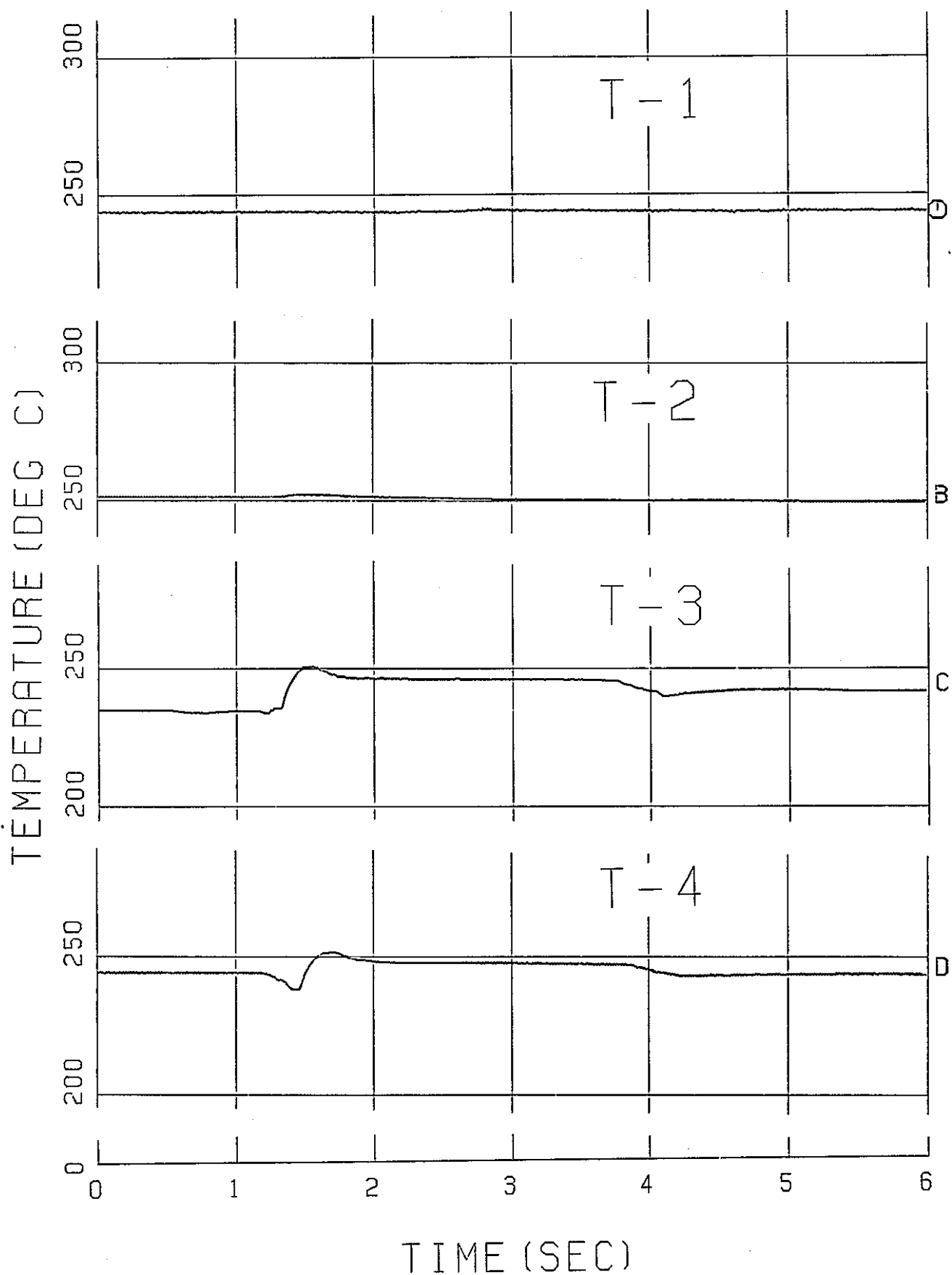


Fig. A.9-9 Temperature Transient

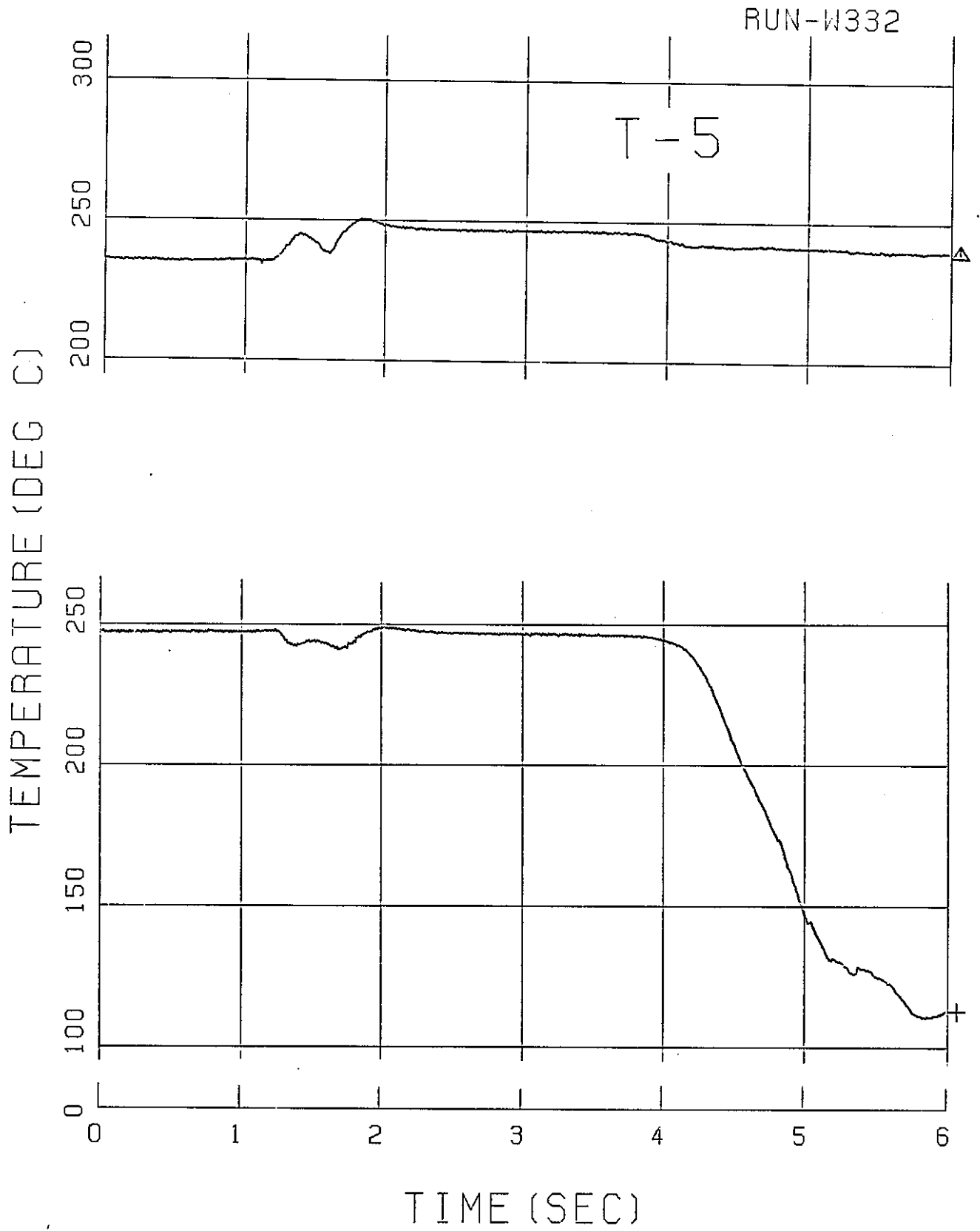


Fig. A.9-10 Temperature Transient

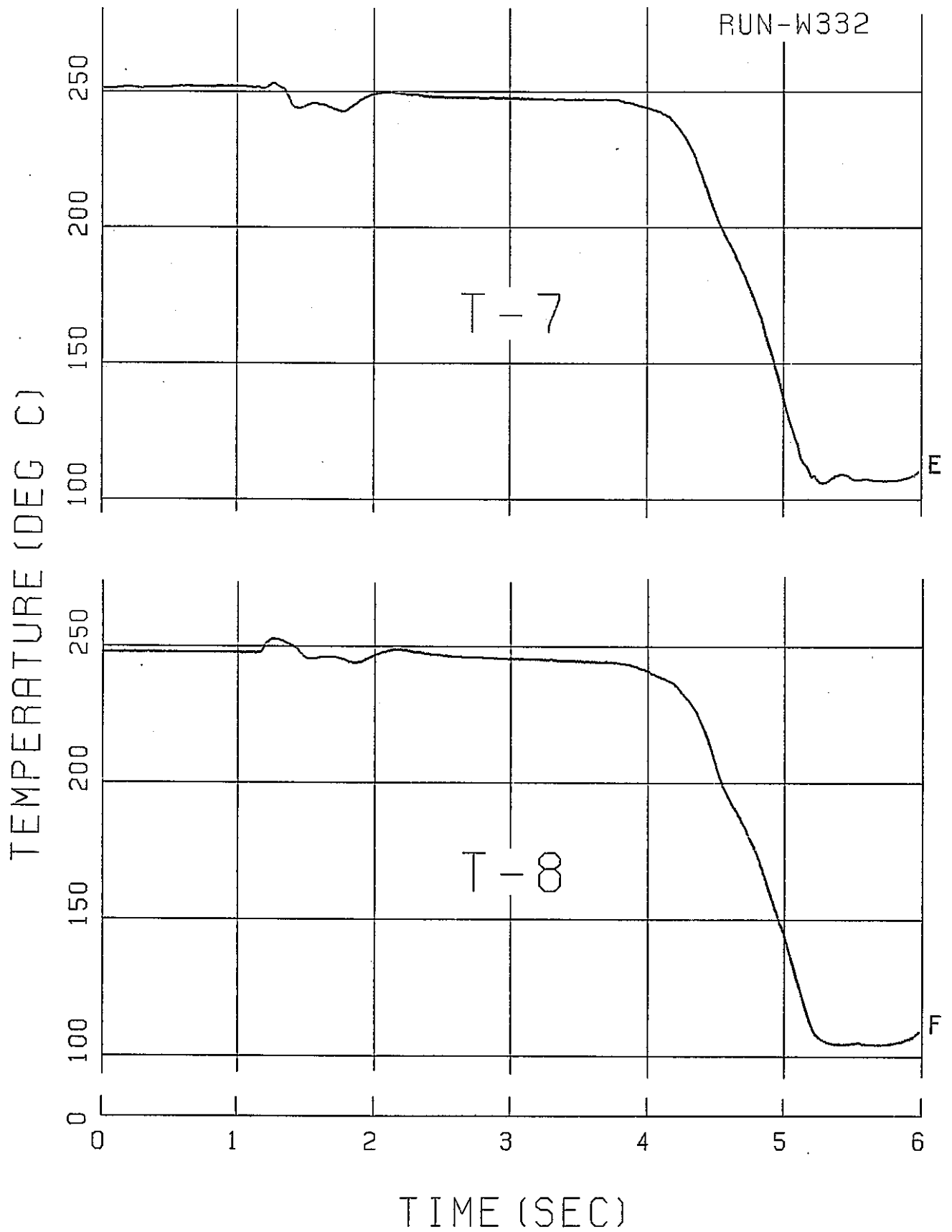


Fig. A.9-11 Temperature Transient

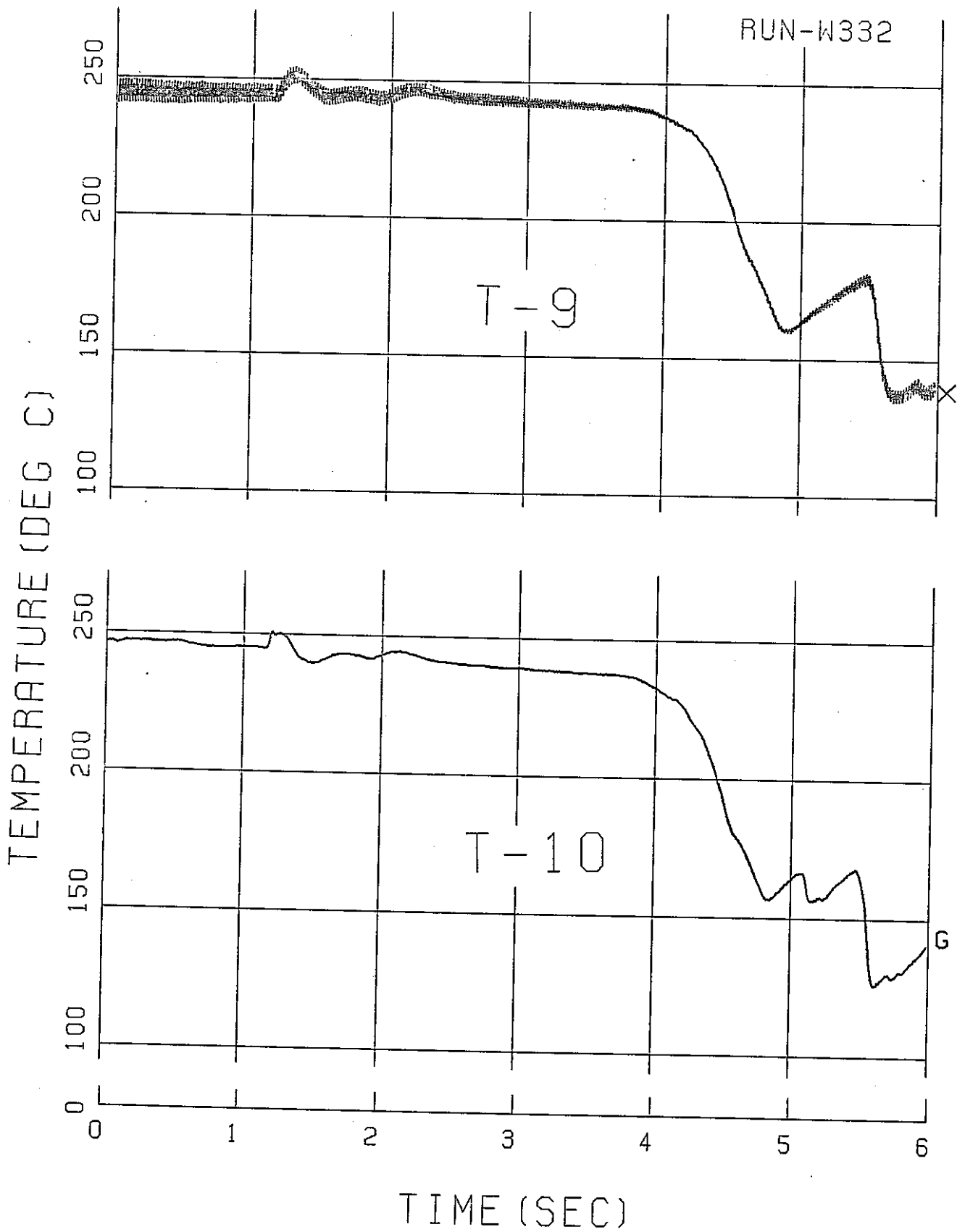


Fig. A.9-12 Temperature Transient

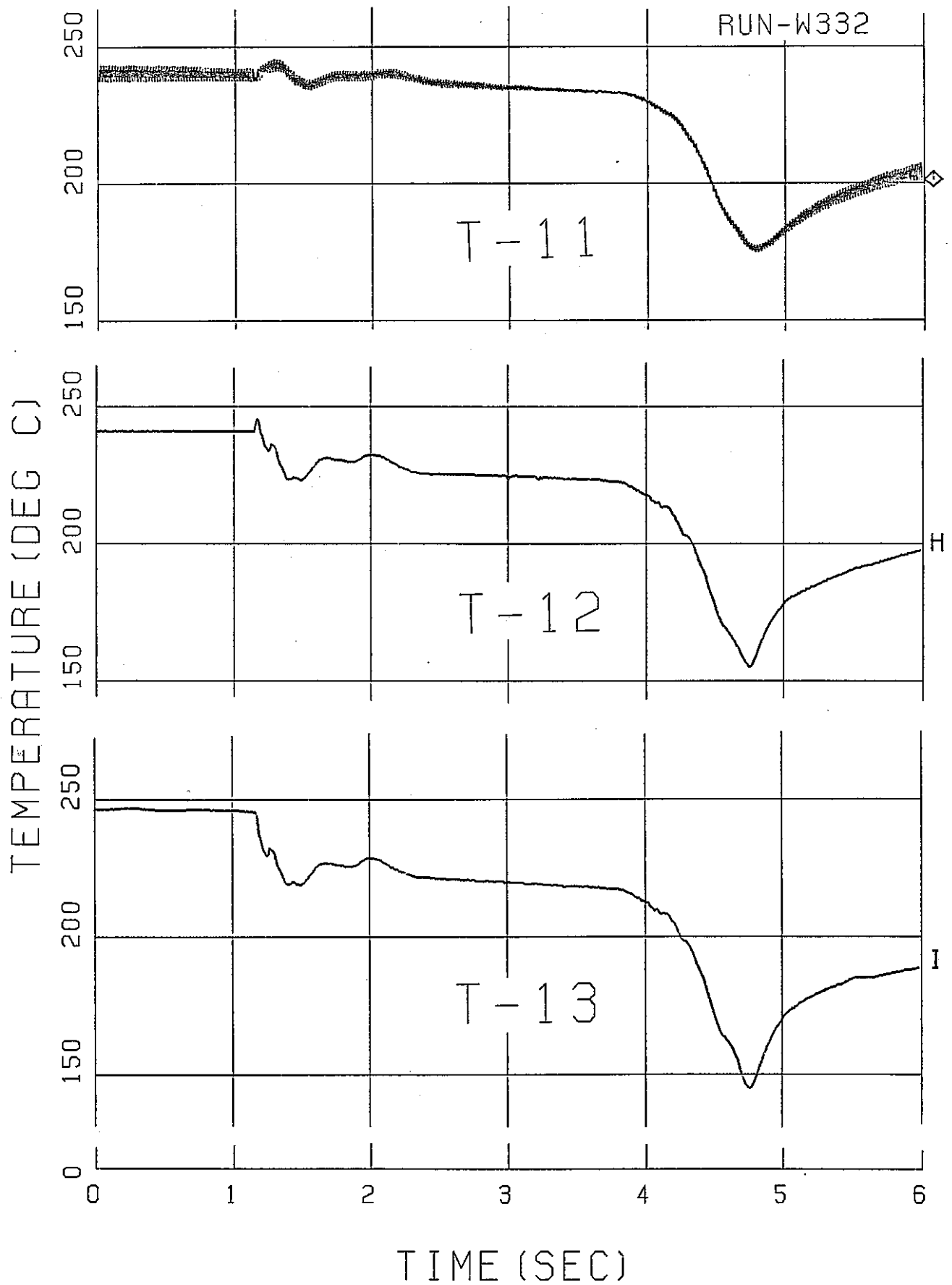


Fig. A.9-13 Temperature Transient

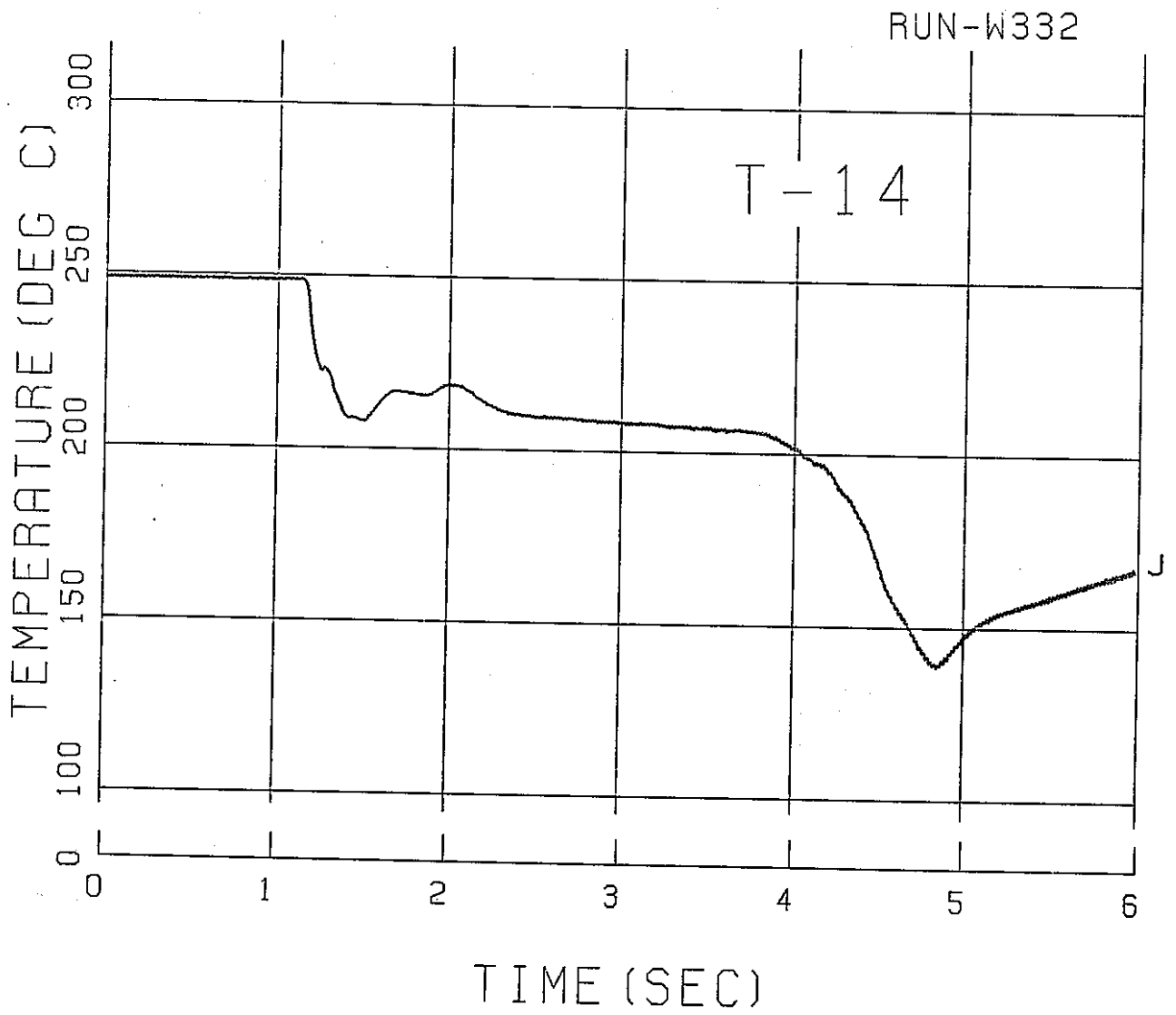


Fig. A.9-14 Temperature Transient

Appendix 10 Run-W325 試験データ

- | | |
|-----------------------|--|
| Fig. A.10- 1 ~A.10- 3 | Thrust Force Transient |
| Fig. A.10- 4 ~A.10- 7 | Pressure Transient |
| Fig. A.10- 8 | Pressure and Temperature
in Water Heater Tank |
| Fig. A.10- 9 ~A.10-14 | Temperature Transient |

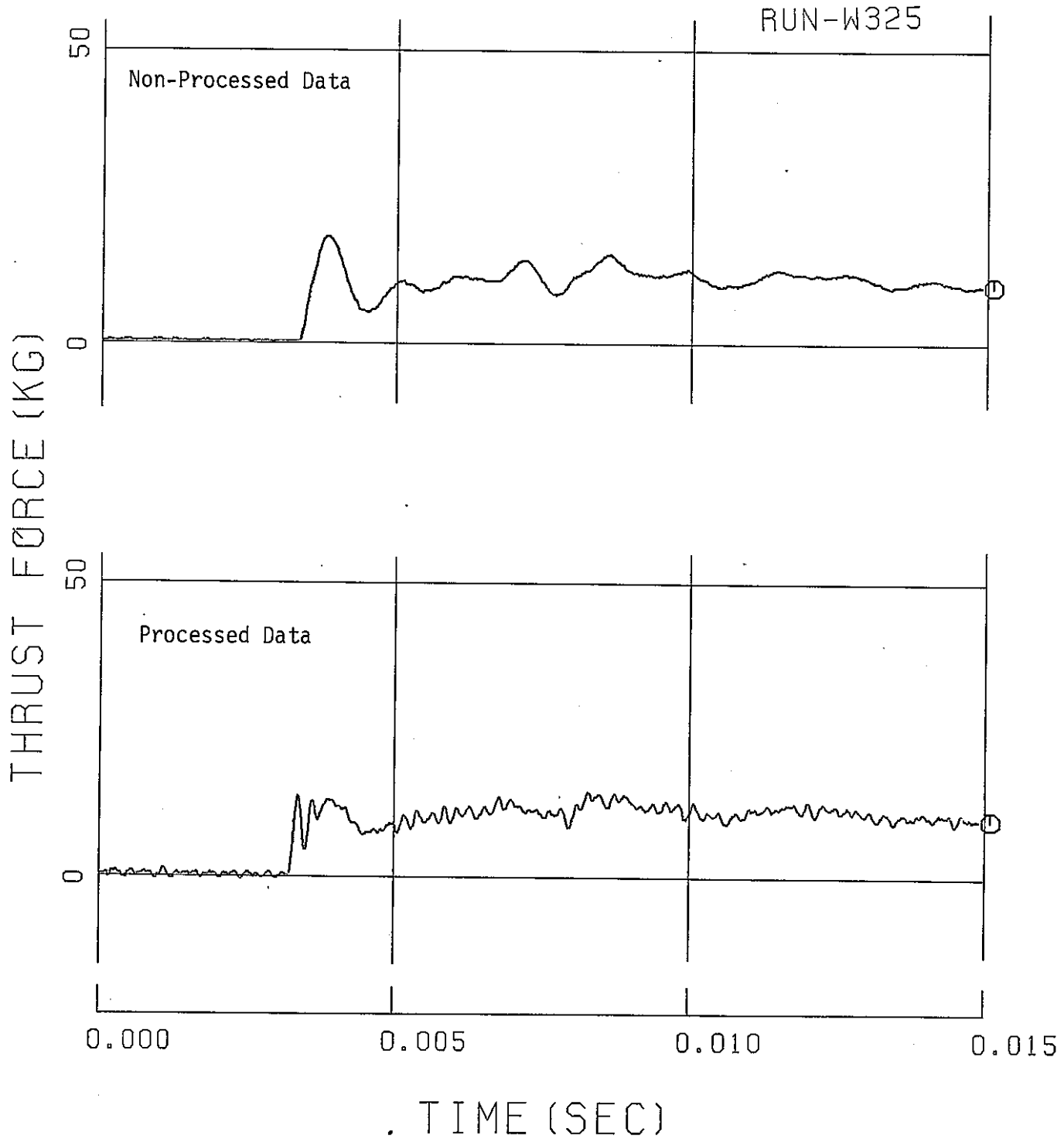


Fig. A.10-1 Thrust Force Transient

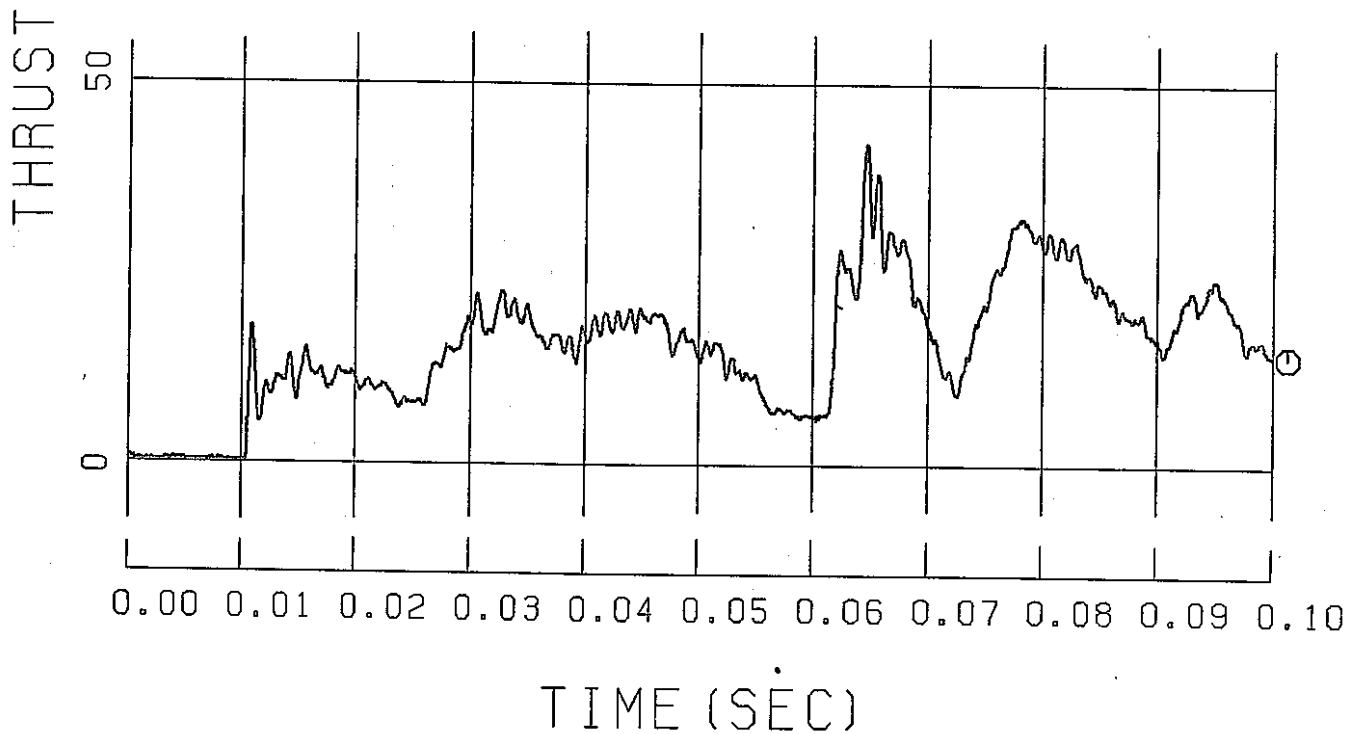
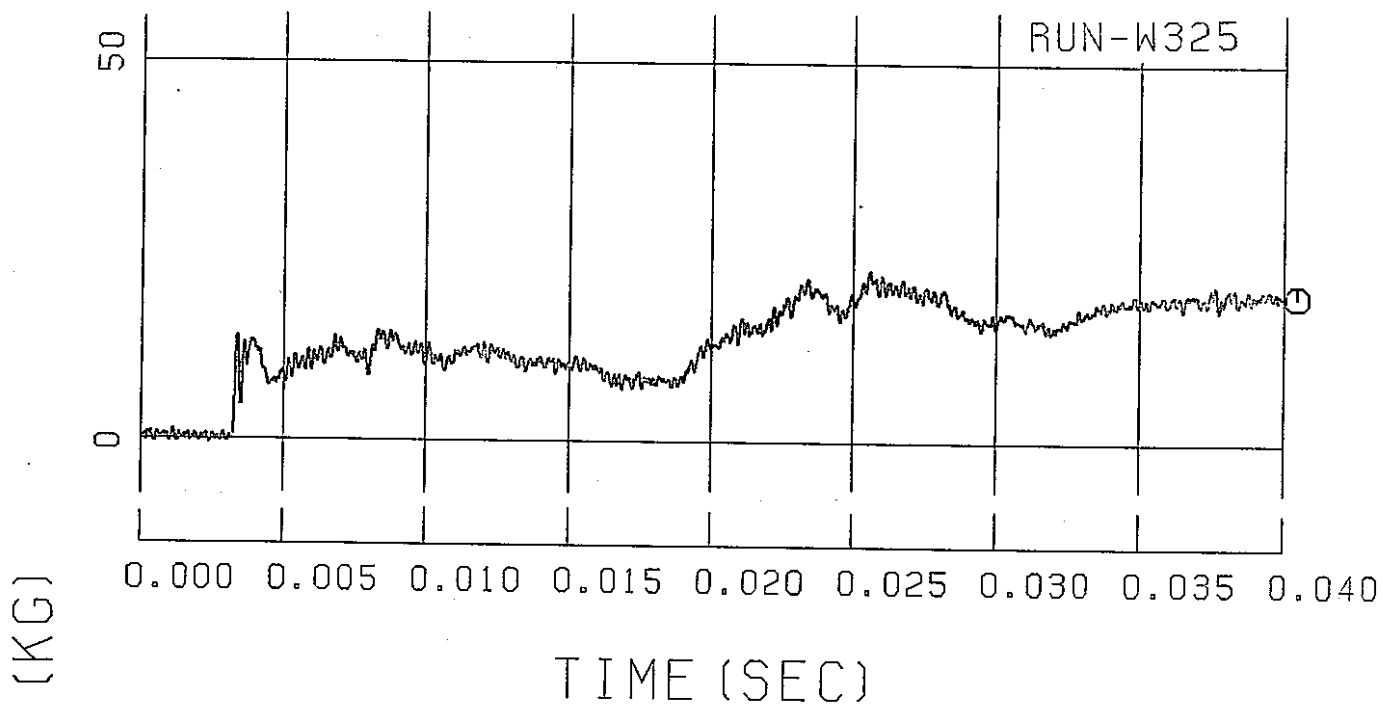


Fig. A.10-2 Thrust Force Transient

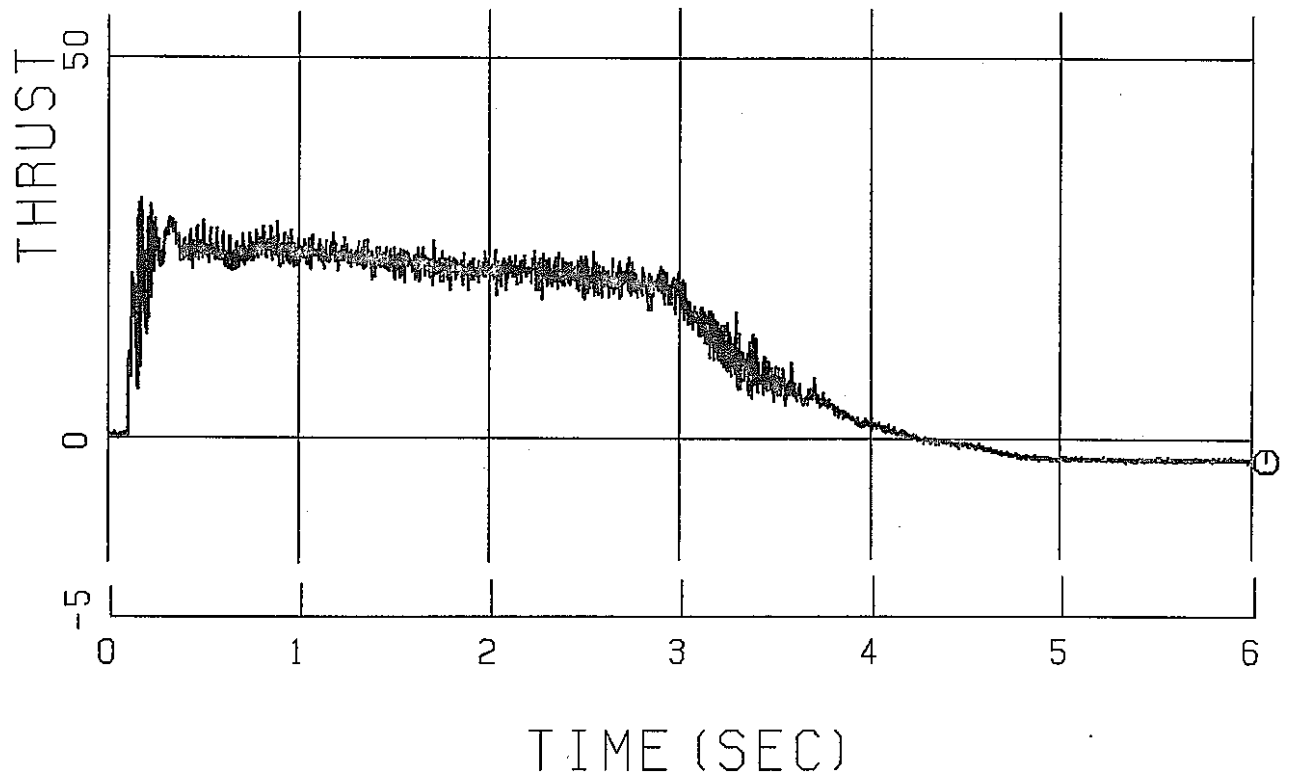
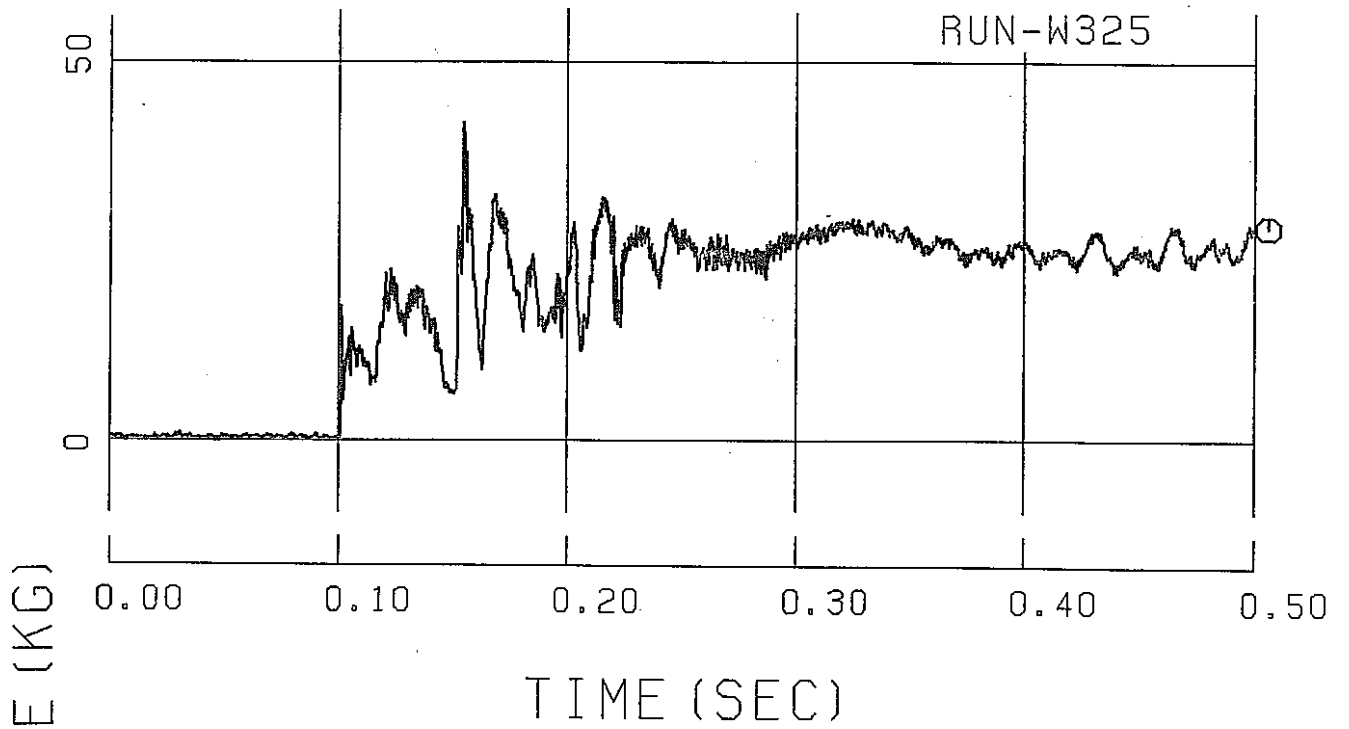


Fig. A.10-3 Thrust Force Transient

RUN-W325

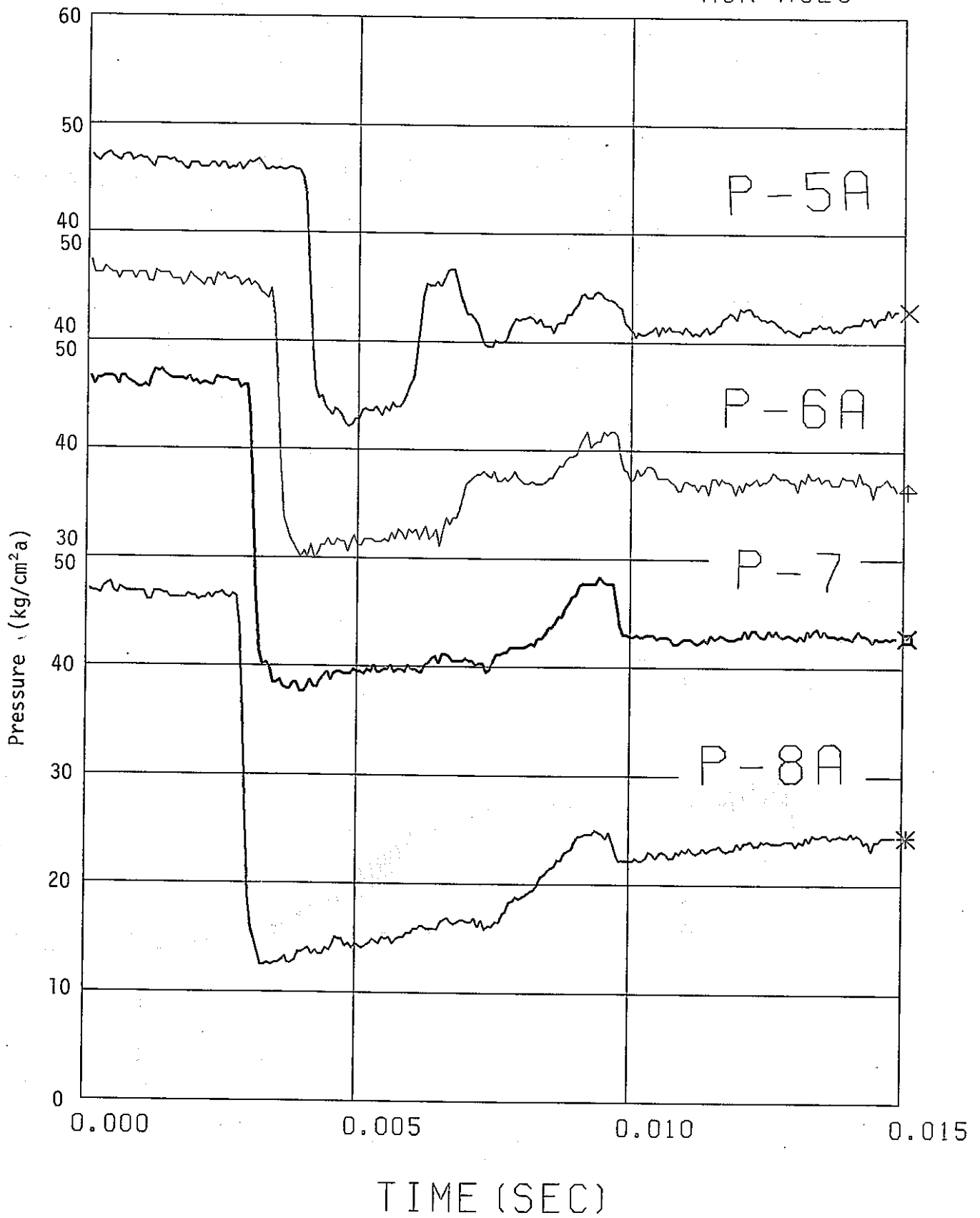


Fig. A.10-4 Pressure Transient

RUN-W325

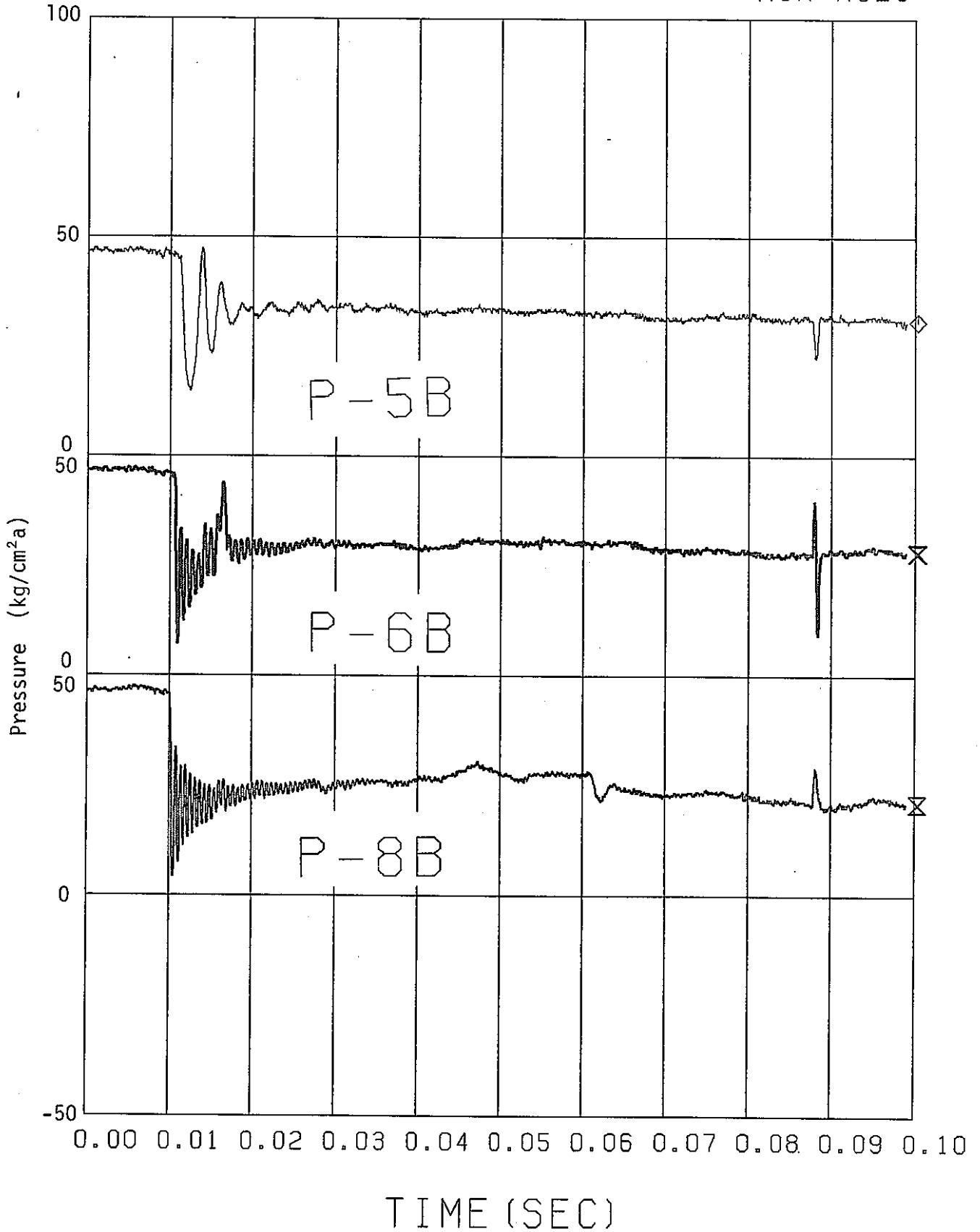


Fig. A.10-5 Pressure Transient

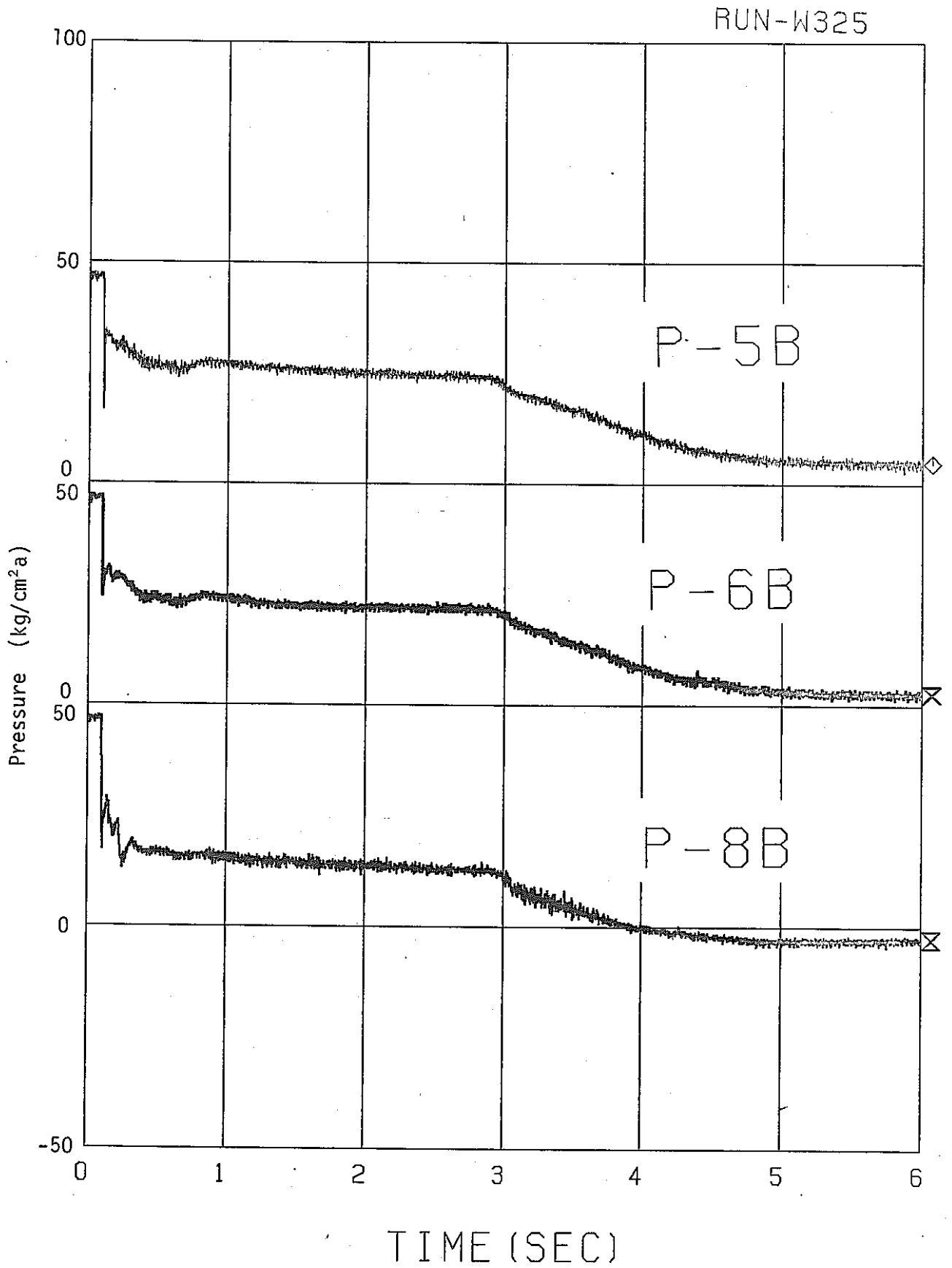


Fig. A.10-6 Pressure Transient

RUN-W325

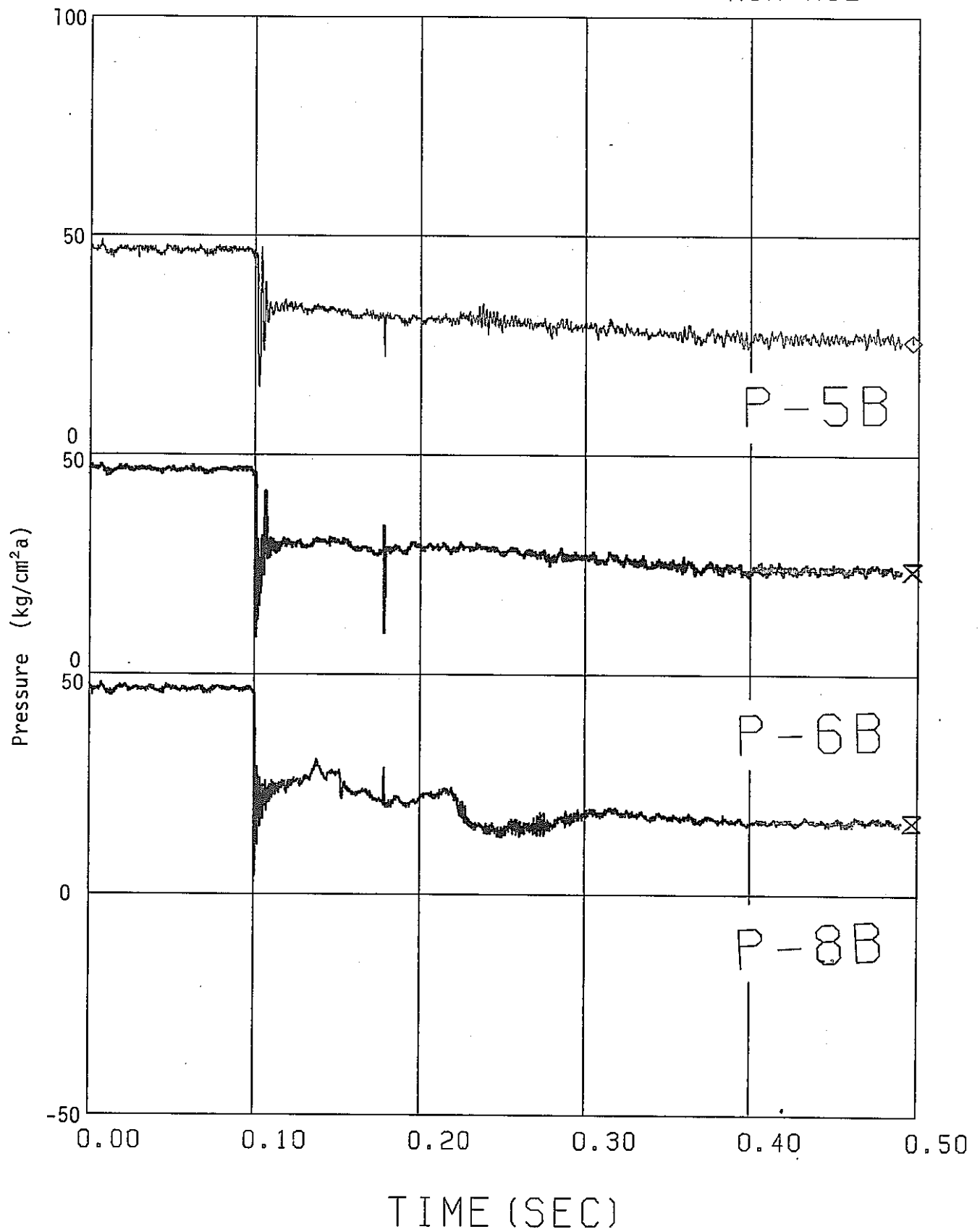


Fig. A.10-7 Pressure Transient

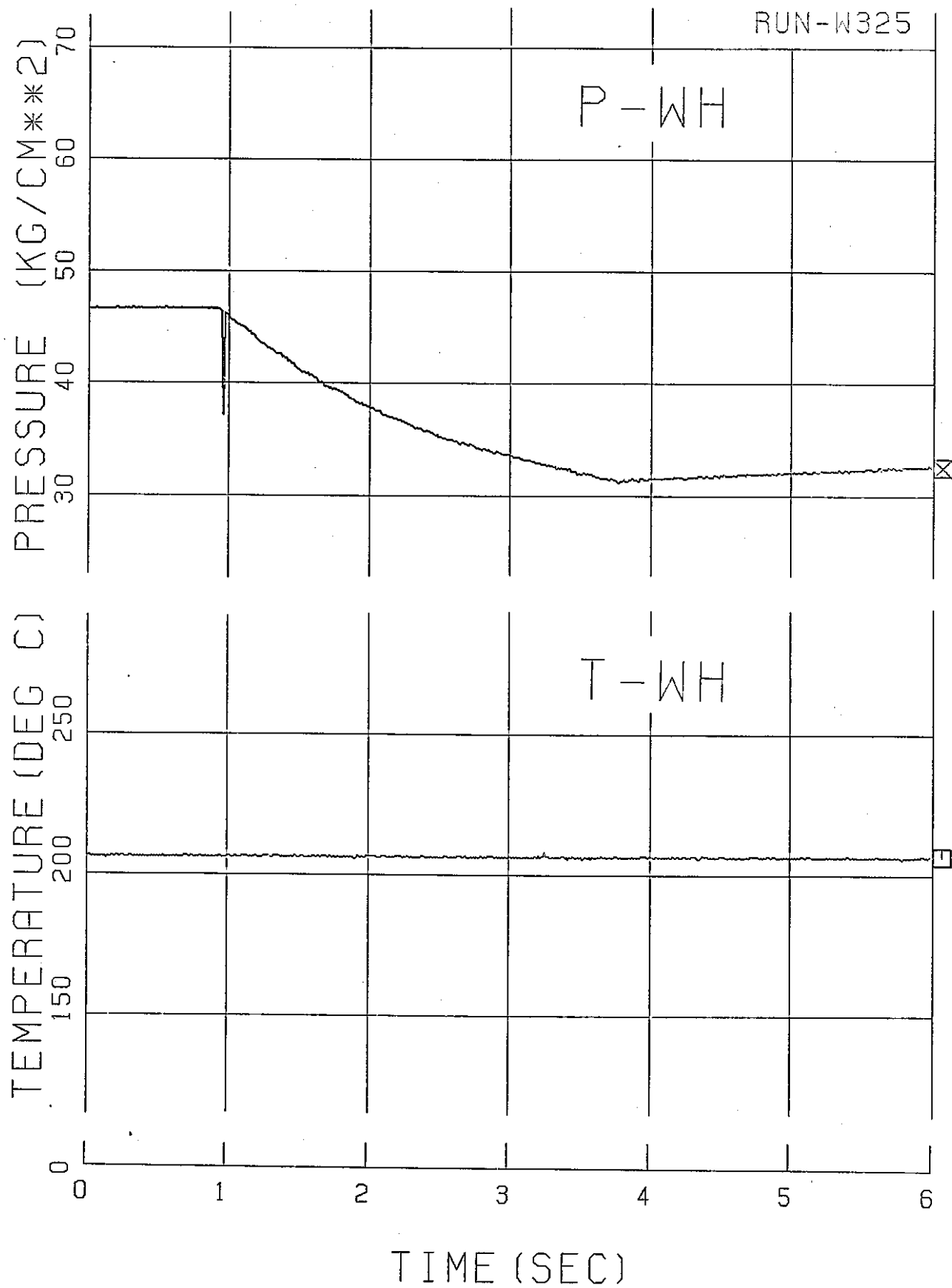


Fig. A.10-8 Pressure and Temperature in Water Heater Tank

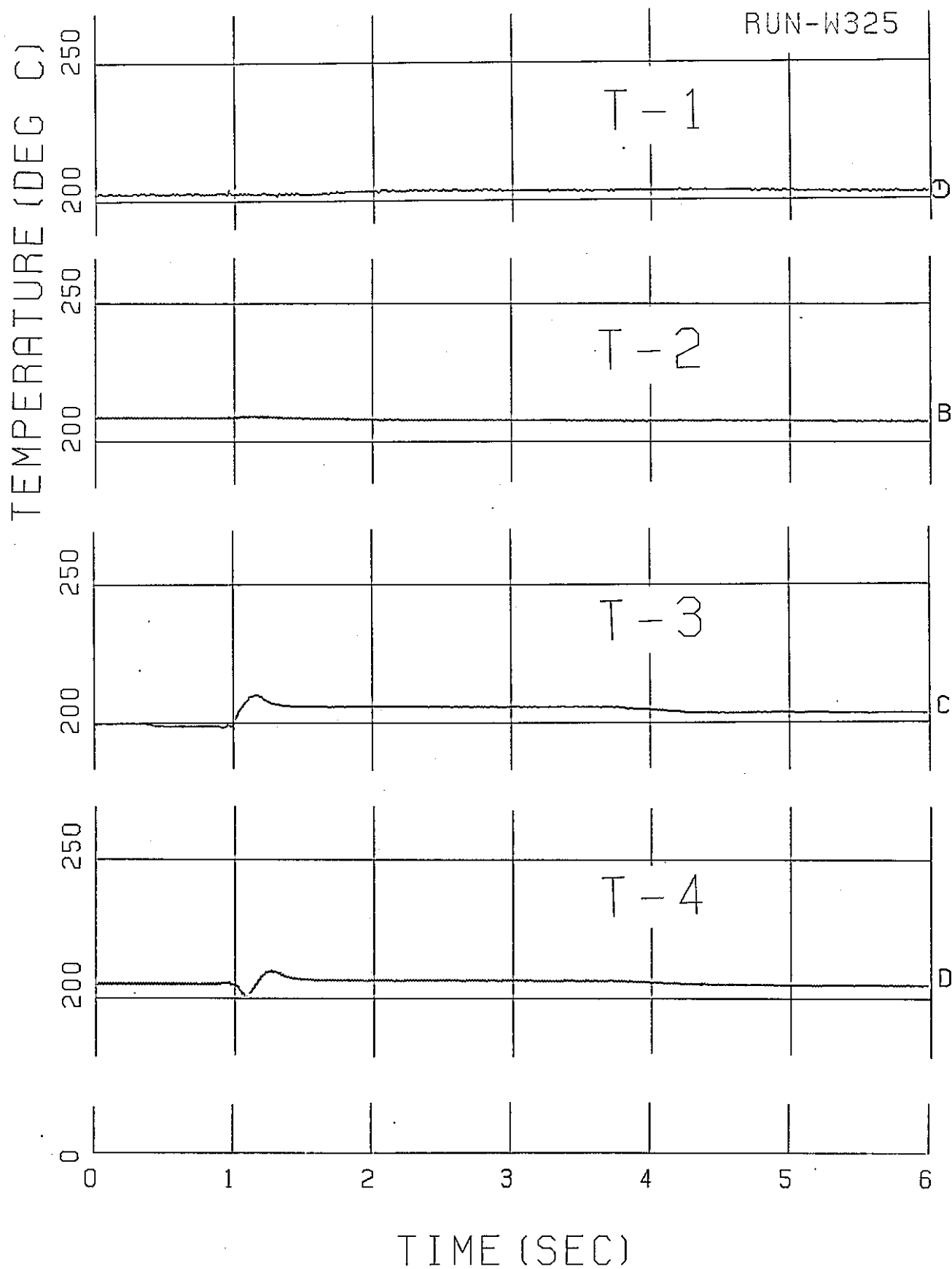


Fig. A.10-9 Temperature Transient

RUN-W325

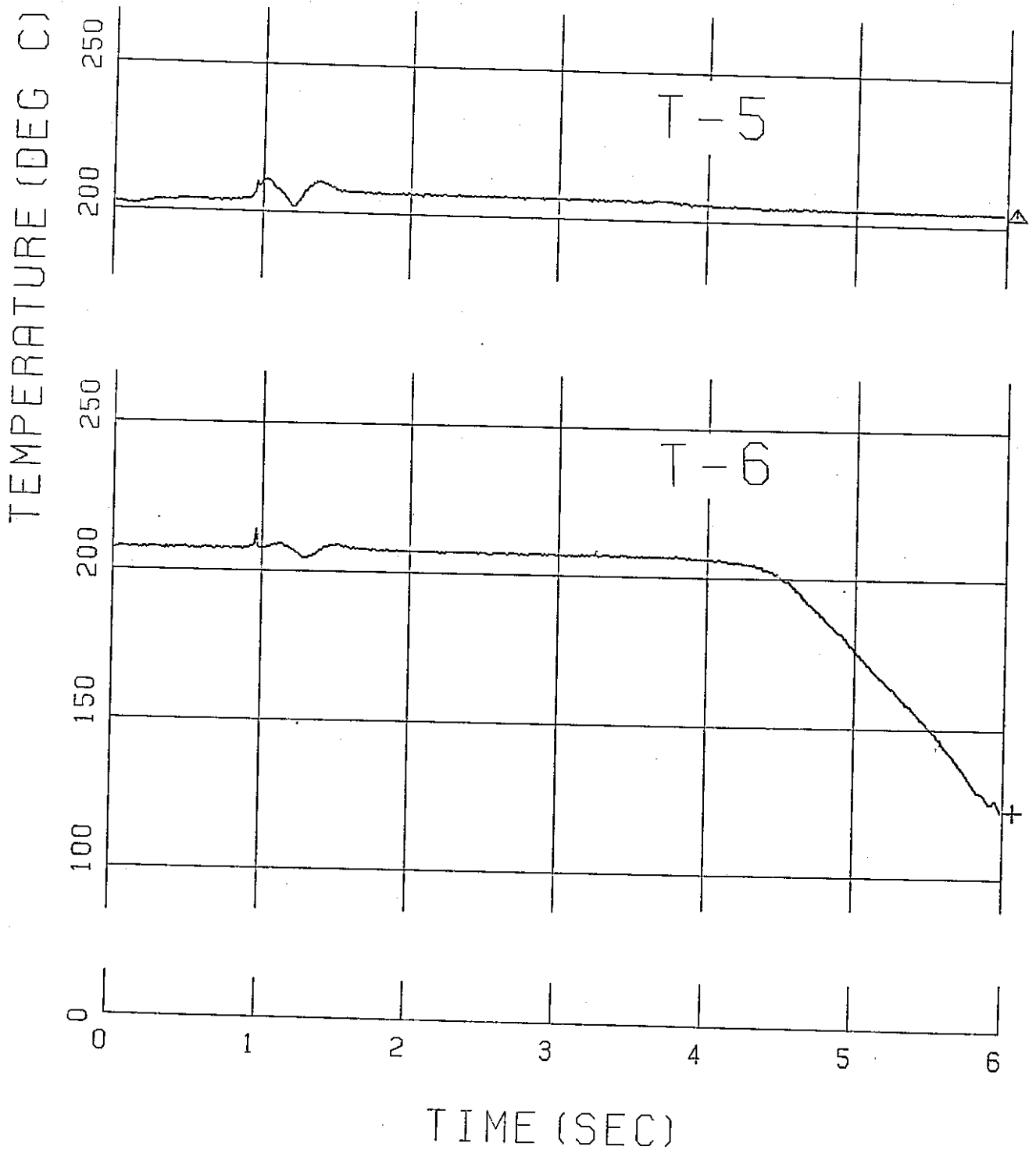


Fig. A.10-10 Temperature Transient

RUN-W325

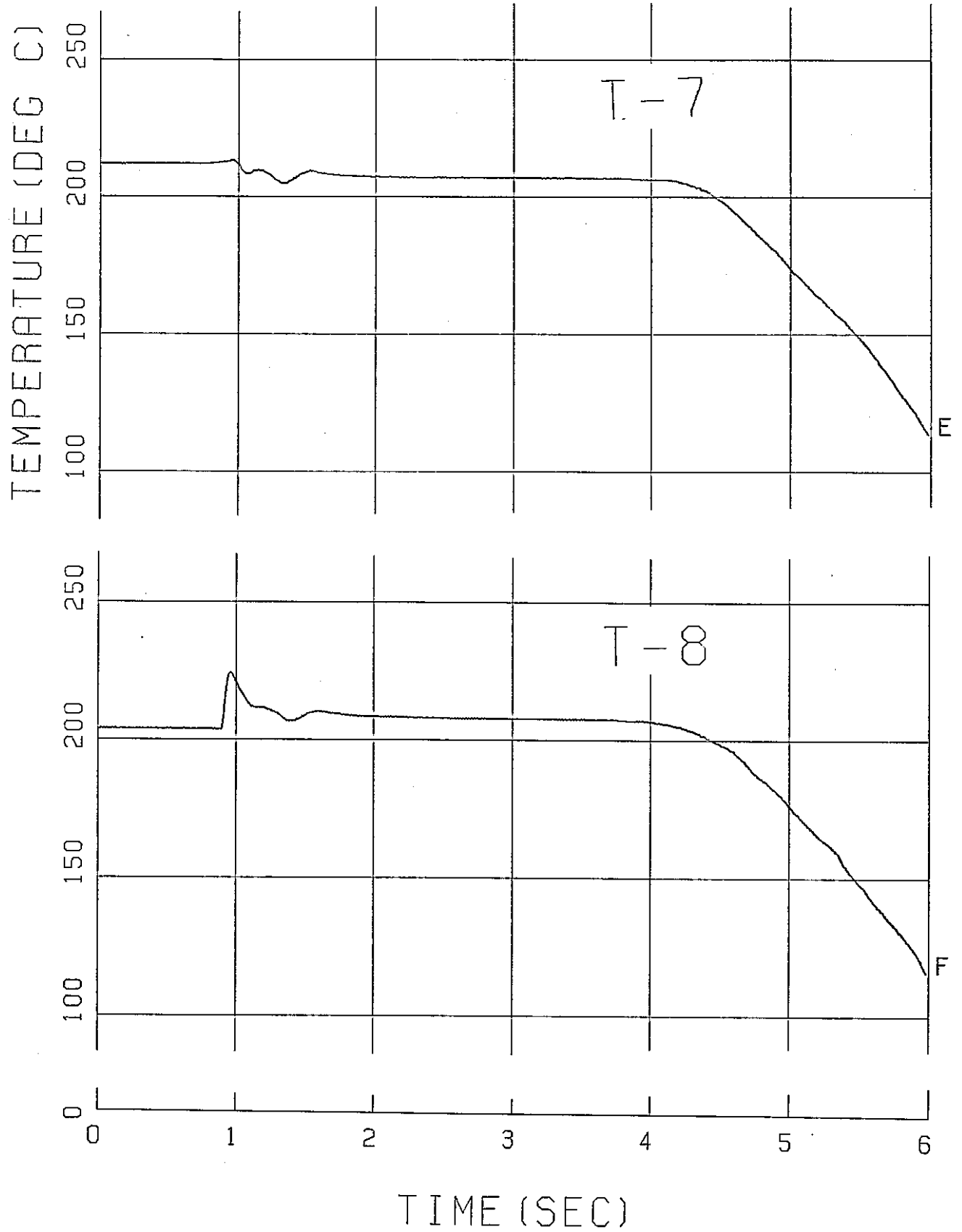


Fig. A.10-11 Temperature Transient

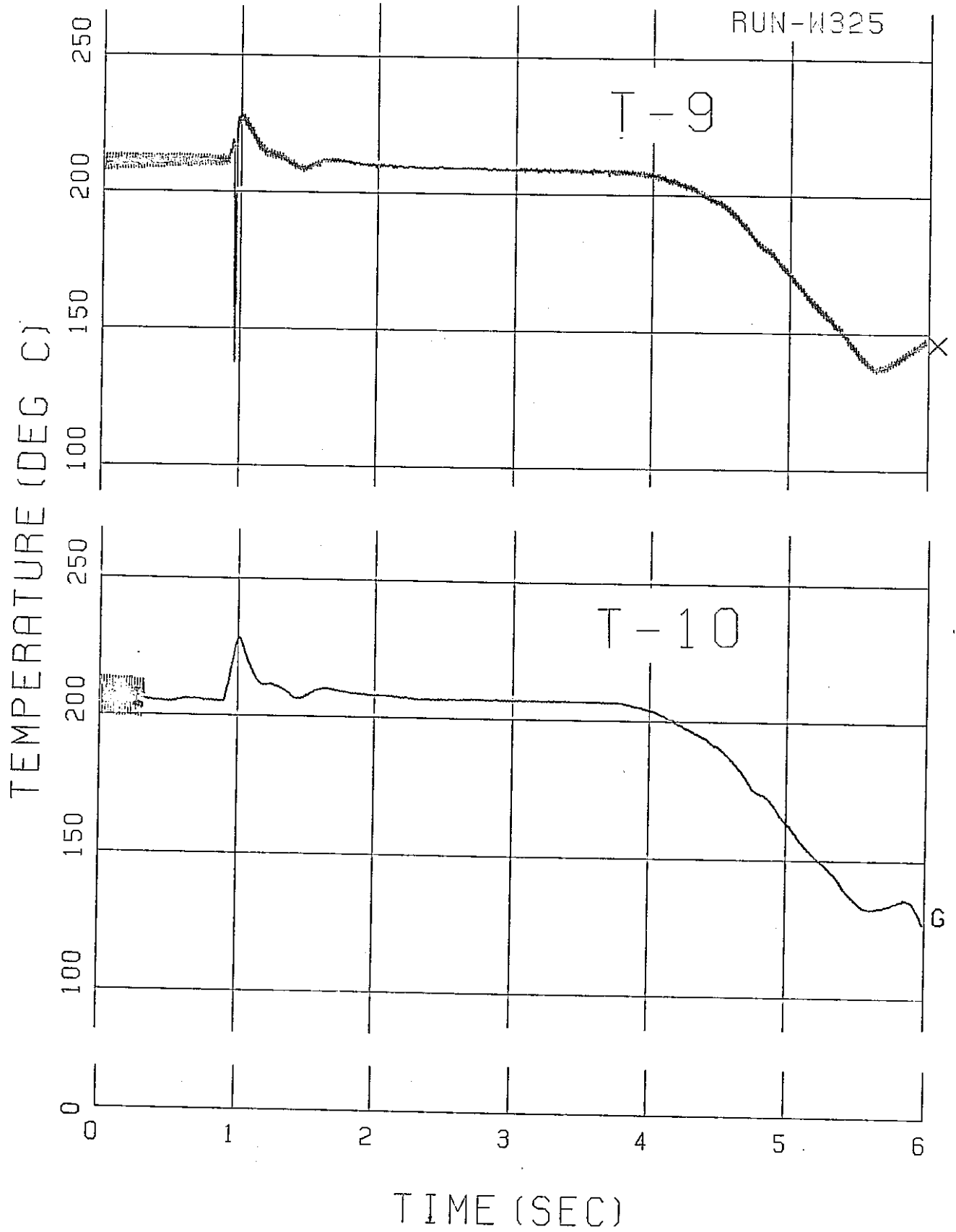


Fig. A.10-12 Temperature Transient

RUN-W325

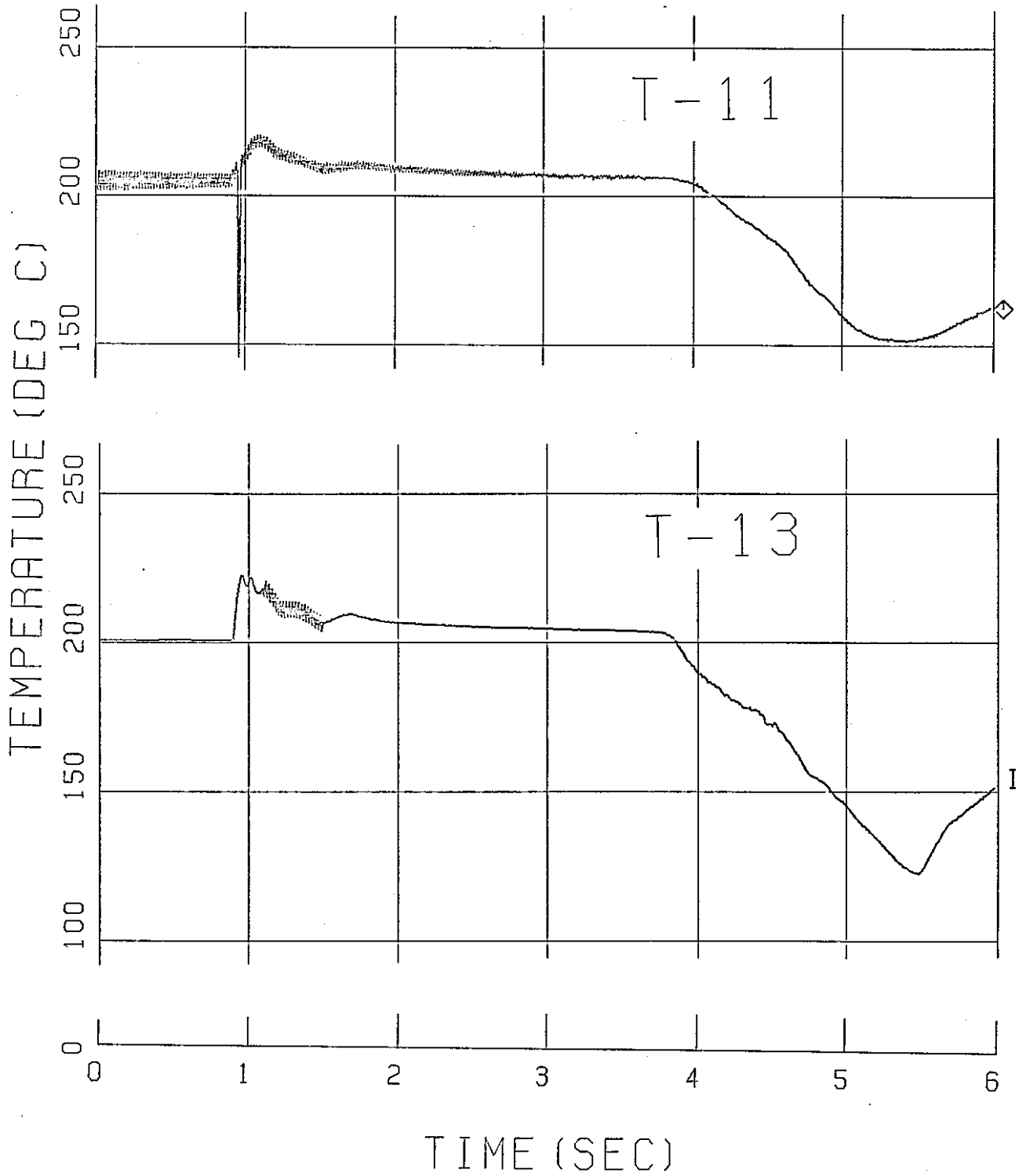


Fig. A.10-13 Temperature Transient

RUN-W325

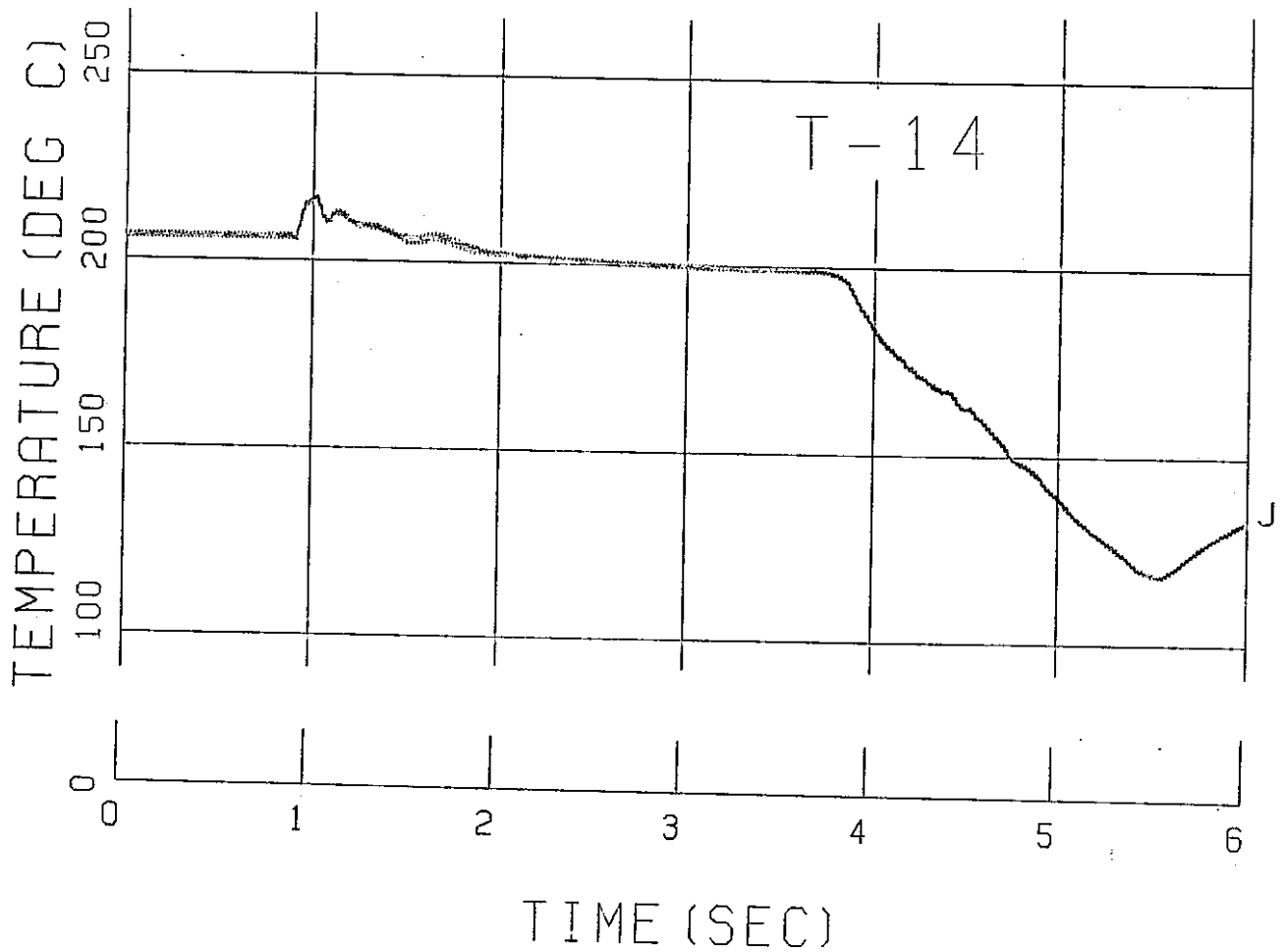


Fig. A.10-14 Temperature Transient