

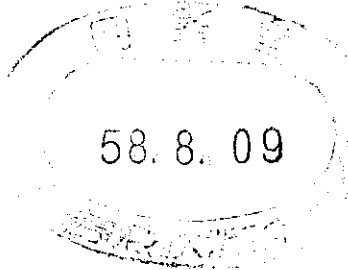
技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	J222 82-16(1)
<p>この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です</p> <p>動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室</p>	

ナトリウムスプレ燃焼試験 成果報告書

—— 第1分冊 ; ナトリウムスプレ燃焼実験 ——

区分変更	
変更後資料番号	PNC TJ222 82-16(1)
決裁年月日	平成 9 年 4 月 30 日

(受託研究)



1982年12月

三菱重工業株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた範囲の関係者に配布するものです。したがって、その取扱いには充分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。

動力炉・核燃料開発事業団
計画管理部技術情報室

ナトリウムスプレ燃焼試験^{*}

成果報告書

—— 第1分冊：ナトリウムスプレ燃焼実験 ——

中原崇文^{***}，佐野 保^{***}，上田三男^{****}
今津孝幸^{****}，玉木光男^{****}，根本和明^{*****}

要 旨

ナトリウム冷却高速増殖炉“もんじゅ”においては、ナトリウム漏洩が起きた場合を想定し、種々の設計上の配慮が必要である。その基本として、いわゆるナトリウム燃焼現象の把握が重要となる。

本研究では、一次系および二次系雰囲気でのナトリウムスプレ燃焼を対象とし、既存の21^m容積の試験容器を用い、実験研究を行なった。

実験では平均質量粒径1^{mm}級の液滴群を約530℃の初期温度で試験容器天井のフルコーンスプレノズルより噴出させた。雰囲気ガス中の酸素濃度のみならず、湿分濃度も実験パラメータとし、一連のTASP実験シリーズを行ない、所期の目的であった解析コード検証データの整備および気体成分濃度やナトリウムエアロゾル濃度の変化等のナトリウムスプレ燃焼現象に付随する実験知見に関して有効なデータを得ることができた。

得られた結果の要点は以下の通りである。

- (1) ナトリウムスプレ燃焼時の温度、圧力応答に対する雰囲気ガス条件の影響については、実験範囲では湿分濃度は余り効かず、酸素濃度が支配的因子であることが明らかとなった。

* 本報告書は、三菱重工業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

*** 三菱重工業(株)高砂研究所 燃焼伝熱研究室

**** 三菱重工業(株)高砂研究所 第三実験課

***** 三菱重工業(株)神戸造船所 新型炉設計部

- (2) 圧力応答に対する実験と解析の比較では、Ranz - Marshall の式をベースとした熱、物質伝達式を用いた解析で、実験値と充分良い一致を示すことが確認された。
- (3) 初期雰囲気ガス中の湿分濃度が、ナトリウムスプレ燃焼時の水素ガス発生にどのような影響を及ぼすかを調べた結果、次のことが判明した。
- (a) 酸素濃度が零のときには化学量論的に予測される可能最大水素濃度とほぼ一致する水素が発生した。
- (b) 一次系雰囲気に対応する酸素濃度（2～3%）では、化学量論的可能最大水素濃度よりもかなり低い水素濃度となった。これには、発生エアロゾルの吸湿作用が関与していると考えられる。
- (c) 空気雰囲気の実験では、水素ガスの発生は見られなかった。
- (4) スプレ燃焼時のナトリウムエアロゾル挙動について、濃度減衰、粒径分布、沈降速度および壁への付着速度等の種々の有効な定量的データが得られた。

得られた結果は、原型炉“もんじゅ”の検討に応用されることが期待されるが、更に万全を期するためには、今後、本R&Dをベースとし、大型セルでのナトリウムスプレ燃焼実験データを取得していくことが望ましい。

December, 1982

Sodium Spray Fire Experiment*

Part 1 ; Sodium Spray Fire Experiment

Takabumi Nakahara**, Tamotsu Sano**
Sabuo Ueda***, Takayuki Imazu***
Mitsuo Tamaki***, Kazuaki Nemoto****

Abstract

In the safety design of sodium cooled fast breeder reactor "MONJU", the unlikely event of large sodium leak must be taken into account as the design basic accident.

So, the behavior of sodium fire should be basically made clear. This test program dealt with the sodium spray fire under the condition of both primary and secondary cell.

Experimental studies were performed using the sodium fire facility with the volume of 21 m³.

In these experiments, sodium spray at about 530°C with the mean mass drop diameter of about 1 mm was discharged from the full-corn spray nozzle at the ceiling of the test vessel. As the test parameter, the initial humidity as well as the initial oxygen concentration was selected.

-
- * Work performed under contracts between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation and Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
 - ** Combustion and Heat Transfer Research Laboratory, Takasago Technical Institute, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
 - *** Third Experiment Section, Takasago Technical Institute, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
 - **** Advanced Nuclear Plant Engineering Department, Kobe Shipyard Engine Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

The named TASP experiments were carried out successfully, and the available data were obtained relating to the analytical code verification and the estimation of gas and sodium aerosol transitional concentration at the sodium spray fire, which are the main purposes of this test program.

Summaries of the results obtained are as follows :

- (1) Concerning the effect of gas concentration on the response of temperature and pressure, the TASP experiments showed that humidity gave no significant effect but oxygen concentration was the predominant factor.
- (2) Comparison between experiment and calculation about the gas pressure response showed that the calculation based on the heat and mass transfer model of Ranz-Marshall equation was in good agreement with experimental data.
- (3) Experimental result are as follows relating to the effect of the initial humidity on the hydrogen generation:
 - (a) In the absence of oxygen, possible maximum stoichiometrical hydrogen was measured.
 - (b) In the presence of oxygen under the primary cell condition (2~3% oxygen), generated hydrogen was lower than the maximum stoichiometrical value. This result implies that humidity adsorption by sodium oxide aerosol plays an important role.
 - (c) Under the air-filled condition, no hydrogen generation was observed.
- (4) Several kind of available and quantative data were obtained concerning the sodium aerosol behavior. For example, decay characteristic of aerosol concentration, deposition rate to the wall, settling rate on the floor and aerosol particle diameter distribution were measured successfully.

Results obtained in this test program are expected to be applied to the design estimation of MONJU.

Moreover, for the perfect applicability, spray fire tests in large vessel are necessary in the near future.

目 次

	頁
1. ま え が き	(1)
2. 試験項目, 試験の目的	(2)
2.1 水による予備実験の目的	(2)
2.2 ナトリウム燃焼実験の目的	(2)
3. 実験装置, 実験方法	(3)
3.1 水による予備実験装置, 実験方法	(3)
3.1.1 実験装置の概要	(3)
3.1.2 実験方法	(3)
3.1.3 実験条件	(4)
3.2 ナトリウムスプレ燃焼実験装置, 実験方法	(6)
3.2.1 実験装置の概要	(6)
3.2.2 実験方法	(7)
3.2.3 実験条件	(8)
4. 水による予備実験の結果	(9)
5. ナトリウムスプレ燃焼実験結果	(12)
5.1 各試験状況の概要	(12)
5.1.1 TASP-N1 (顕熱効果試験)	(12)
5.1.2 TASP-N2 (3%酸素濃度, 低湿分濃度試験)	(15)
5.1.3 TASP-N3 (3%酸素濃度, 高湿分濃度試験)	(17)
5.1.4 TASP-N4 (3%酸素濃度, 高々湿分濃度試験)	(18)
5.1.5 TASP-N5 (液滴径効果試験)	(20)
5.1.6 TASP-A1 (21%酸素濃度, 高湿分濃度試験)	(22)
5.1.7 TASP-A2 (21%酸素濃度, 極低湿分濃度試験)	(25)

	頁
5.2 エアロゾルに関する測定結果	(27)
5.2.1 試験容器内エアロゾル濃度推移	(27)
5.2.2 エアロゾルの沈降量測定結果	(28)
5.2.3 エアロゾルの壁面への付量測定結果	(29)
5.2.4 エアロゾルの粒径分布の測定結果	(32)
5.3 その他の実験結果	(35)
5.3.1 試験容器のリークレート	(35)
5.3.2 試験容器の点検結果	(36)
6. 検討, 考察	(37)
6.1 ナトリウム液滴燃焼, 温度, 圧力応答の検討	(37)
6.1.1 水とナトリウムの相関性について	(37)
6.1.2 ナトリウム液滴燃焼のパラメータサーベイ	(39)
6.1.3 実験データ解析モデルの概要	(46)
6.1.4 実験データと解析との比較検討	(47)
6.1.4.1 TASP-N5 データとの比較	(47)
6.1.4.2 TASP-N2 データとの比較	(48)
6.1.4.3 TASP-A2 データとの比較	(49)
6.1.5 スプレ発火条件について	(50)
6.2 気体成分濃度変化についての検討	(51)
6.3 ナトリウムエアロゾル挙動についての検討	(53)
6.3.1 エアロゾル最大濃度	(53)
6.3.2 エアロゾルの床への沈降と粒径の関係	(54)
6.3.3 エアロゾルの付着速度について	(55)
7. 結 論	(57)
8. あとがき	(59)
参 考 文 献	(60)

List of Figure

- Fig.3.1 ; Equipment for Water Simulation Test
- Fig.3.2 ; Burning Characteristics of Sodium Drops in Air
- Fig.3.3 ; Full Corn Spray Nozzle
- Fig.3.4 ; Schematic Figure of Test Vessel
- Fig.3.5 ; Photograph of Test Vessel
- Fig.3.6 ; Flow Sheet of Test Facility
- Fig.3.7 ; Position of Thermo Couple
- Fig.3.8 ; Sodium Aerosol Sampler
- Fig.4.1 ; Photograph of Spray
- Fig.4.2 ; Flow Characteristic of Spray Nozzle
- Fig.4.3 ; Flow Rate Coefficient Versus Reynolds Number
- Fig.4.4 ; Dispersion Curve
- Fig.4.5 ; Mean Diameter and Standard Deviation
- Fig.4.6 ; Water Dispersion in The Catching Pan
- Fig.5.1(1)~(8) ; TASP-N1 Data
- Fig.5.2(1)~(7) ; TASP-N2 Data
- Fig.5.3(1)~(7) ; TASP-N3 Data
- Fig.5.4(1)~(7) ; TASP-N4 Data
- Fig.5.5(1)~(7) ; TASP-N5 Data
- Fig.5.6(1)~(7) ; TASP-A1 Data
- Fig.5.7(1)~(8) ; TASP-A2 Data
- Fig.5.8 ; Sodium Aerosol Concentration
- Fig.5.9 ; Total Amount of Settling Aerosol
- Fig.5.10 ; Transition of Aerosol Settling Flux
- Fig.5.11 ; Total Amount of Aerosol Deposition
- Fig.5.12 ; Transition of Aerosol Deposition Elux to Side Wall

List of Figure (continued)

- Fig.5.13 ; Transition of Aerosol Deposition Flux to Ceiling Wall
- Fig.5.14 ; Aerosol Particle Diameter Distribution
- Fig.5.15 ; Standard Deviation for Aerosol Particle Diameter Distribution
- Fig.5.16 ; Transition of Aerosol Mass Median Diameter
- Fig.6.1 ; Mean Diameter Versus Weber Number
- Fig.6.2 ; Parameter Search for Sodium Burning Rate
- Fig.6.3 ; Effect of Humidity on Sodium Burning Rate
- Fig.6.4 ; Heat and Mass Transfer Model of Spray Fire Calculation
- Fig.6.5 ; Comparison between Calculated and Experimental Value (TASP-N5)
- Fig.6.6 ; Comparison between Calculated and Experimental Value (TASP-N2)
- Fig.6.7 ; Comparison between Calculated and Experimental Value (TASP-A2)
- Fig.6.8 ; Temperature Distribution (Calculated Value)
- Fig.6.9 ; Comparison between Calculated Value and AI Single Drop Test
- Fig.6.10 ; Hydrogen Formation in HEDL F-1 Test
- Fig.6.11 ; Hydrogen Generation Characteristics in TASP Experiment
- Fig.6.12 ; Equilibrium H₂O Pressure for the Reaction with Sodium Oxide

List of Table

Table 3.1	;	Example of spray Fire Test
Table 3.2	;	Measuring Items
Table 3.3	;	Test Procedure
Table 3.4	;	Test Condition of Sodium Spray Fire
Table 4.1	;	Summary of Water Spray Test
Table 5.1	;	Summary of Test Result
Table 5.2	;	Description of Cascade Impactor
Table 5.3	;	Summary of Cell Leak Rate
Table 6.1	;	Physical Property of Sodium and Water
Table 6.2	;	Flow Chart of Spray Fire Calculation
Table 6.3	;	Maximum Aerosol Concentration

1. ま え が き

ナトリウム冷却高速増殖炉プラントにおいて、ナトリウムの漏洩事故が起きた場合を想定し、種々の設計上の配慮が払われているが、その基本として、いわゆる「ナトリウム燃焼現象」が把握されねばならない。

原型炉「もんじゅ」においては、例えばセル・ライナの設計基本条件、建物の健全性等を把握することや、ナトリウム漏洩時の気体成分濃度変化、エアロゾル挙動等が重要課題として挙げられている。

設計基本条件を明らかにする為には、ナトリウム漏洩時の温度、圧力過渡変化を知る必要があり、これに対しては、ナトリウムプール燃焼解析コード（例えば、SOFIRE コード⁽¹⁾、⁽²⁾）やナトリウムスプレ燃焼解析コード（例えば、SPRAY コード⁽³⁾）が開発されてきており、設計基本条件の設定に使用されつつある。

解析コードに対しては、実験データによる検証が極めて重要であり、プール燃焼については内容積 21 m^3 の容器を用いたナトリウム実験⁽²⁾が行なわれ、実験データと解析コードとの照合を既に実施してきている。

一方、スプレ燃焼については、内容積約 2 m^3 の容器を用いた小規模ナトリウム実験⁽⁴⁾が行なわれているが、比較的大きな規模での実験データが皆無である。本研究は、上記の内容積 21 m^3 の容器を用いたナトリウムスプレ燃焼実験を行ない、より実際的なコード検証を行なうよう計画されたものである。

又、本ナトリウムスプレ燃焼実験実施を機に、スプレ燃焼時の気体成分の変化やエアロゾル挙動についても実験知見を得、実機での問題点の有無について目安が得られるよう配慮することとした。

2. 試験項目，試験の目的

ナトリウムスプレ燃焼実験を行なうにあたり，液滴径分布やスプレ流況を直接測定することは極めて困難であるので，まず水を用いた予備実験を行ない，その後，ナトリウム実験を行なう方法を探った。

すなわち，次の二種の実験を行なった。

- (1) 水による予備実験
- (2) ナトリウムスプレ燃焼実験

以下に両試験の目的をまとめる。

2.1 水による予備実験の目的

水による予備実験は，次の目的で実施する。

- ナトリウムスプレ燃焼実験に先立ち，流動様相や液滴径分布を把握することにより，目視のできないナトリウム実験に対する基本データを整備すること。

2.2 ナトリウム燃焼実験の目的

ナトリウムスプレ燃焼実験は，次の諸目的で実施する。

- (1) ナトリウムスプレ燃焼解析コードの検証用データを取得すること。
- (2) ナトリウムスプレ燃焼に付随する諸現象に関する実験知見を併せて取得すること。具体的には，高湿分濃度雰囲気中でのスプレ燃焼時の水素ガス発生の有無や，エアロゾル濃度推移等の把握を行なうこととする。

3. 実験装置，実験方法

3.1 水による予備実験装置，実験方法

3.1.1 実験装置の概要

Fig 3.1 による予備実験を行なうための容器を示す。前述のように，ナトリウムスプレ燃焼実験の基本データ取得が目的であるので，次の諸点を配慮した装置となっている。

- (a) 受皿形状，寸法をナトリウム燃焼実験装置のそれと同じものにし，スプレ燃焼に続いて起きるプール燃焼時のバックデータも得ることができるようにした点。
- (b) スプレ噴出部と受皿までの高さをナトリウム燃焼実験のそれと同じものにし，空間滞留液滴の様相等を把握できるようにした点。
- (c) 噴出部手前の弁から噴出部に至るまでの配管内容積をナトリウム燃焼実験装置のそれに合わせ，噴出開始直後および噴出完了直後の過渡的状況を概略把握できるようにした点。

又，その他スプレの様相を把握できるように暗幕の設置，コリメータの設置等の配慮を行なった装置となっている。

3.1.2 実験方法

定常噴出時に次の諸量を測定又は観測する。

- (1) 噴出圧力
- (2) 噴出流量
- (3) 噴出外観状況；スプレ拡がり角，エンベロップ等を写真撮影により把握する。
- (4) 粒径分布；受止め式によりサンプリング後，計数する。
- (5) 分散量；受止め式により測定する。

又，噴出弁開放直後，噴出弁閉鎖直後の流動状況も併せ，観測する。

さらに，容器下部に受皿を設置した実験においては次のものを測定する。

- (6) 受皿分散量；一定時間スプレを噴出させた後，各分離受皿内の貯

留水の量を計測する。

3.1.3 実験条件

(1) スプレノズルの選定；

解析コードの検証が主目的であるので、これにもっとも適合するノズルを選定する必要がある。選定にあたっては既存文献の調査や、解析コードによる予備計算等を経て、充分検討の上、選定のこととした。数種類のノズルを試作、実験を行なったが、最終的にはそのうちの二種をナトリウム燃焼実験に供試した。以下に選定したノズルの概略諸元および選定根拠を述べる。

(a) スプレノズル型式；フルコーンスプレノズル。

解析コード SPRAY⁽³⁾のモデルはフルコーンスプレに近いものであり、これに合わせるのが妥当と考えられること、および標準ノズルとして充分実績のあるものを選定するのが良いと考えられたので本型式を選んだ。

(b) 液滴平均粒径；平均質量粒径にて約 1 mm φ 前後を目標。

ナトリウム燃焼実験容器の高さは約 3 m であるため、落下した液滴が充分反応せぬうちに床面まで行くと、解析コード検証上不具合の生じる恐れがある。米国 A I 社の単一落下液滴実験⁽⁵⁾によると、液滴の着火は液滴径に依存し、径が小さい程、早く着火する。

(Fig 3.2 参照) したがって限られた高さの容器で充分反応を生じさせる為には液滴が小さい方が望ましい。しかし、反面過度に微粒化しすぎると容器内圧力が上昇しすぎ、最高使用圧力を越ええる恐れが出てくる。それに加え、標準ノズルととして達成可能な粒径範囲としての制限も存在する。解析コードによる予備解析も行ない、以上の諸条件を勘案して最適な粒径として 1 mm φ 前後を目標とした。

(c) スプレ噴出拡がり角；約 30° 目標。

拡がり角として 15°、30°、55° 級のもの三種類を準備したが、

米国CRBRPのナトリウムスプレ燃焼解析に用いられた値である 28° にもっとも近い 30° 級のものを最終的には選定した。

- (d) スプレ噴出率；約 $50 \ell/min$ 。

当面の対象となる「もんじゅ」各室の容積あたりの漏洩率に合わせるためには本試験容器基準では、 $10 \sim 100 \ell/min$ となる。これらの平均的なものとして $50 \ell/min$ を選んだ。

又、予備解析によりこの流量にて、検証上問題のないことを予め確かめた。

- (e) スプレ噴出圧； 1.9 kg/cm^2 以下。

ナトリウム実験装置では、上部の高温タンクにナトリウムを貯留し、これを加圧することによりスプレ状噴出を起こさせる。

したがって高温タンクの最高使用圧力である 1.9 kg/cm^2 以下の噴出圧が実験上の制限となる。

又、ノズルの選定には直接関連はないが、ナトリウムスプレ燃焼実験計画時のその他の数値を参考として以下に示す。

- (f) スプレ噴出時間；約1分。

解析コード検証の為に余り短かな噴出時間では不具合が多いが逆に噴出時間が長すぎると圧力が上昇しすぎたり、試験後の処理ナトリウム量が膨大になりすぎる恐れがある。そこで、解析コードによる予備解析も行ない本噴出時間を暫定的に選んだ。

但し、実験での圧力応答次第により多少の調整は行なえる。

- (g) スプレ総噴出量；約 50ℓ 。

$50 \ell/min$ で1分間の噴出ゆえ約 50ℓ となる。Table 3.1に海外を含めた既存のナトリウムスプレ燃焼実験例を示す。本表の比較から判るように、本実験でのナトリウム総噴出量は容器の容積から考えれば極めて多く、熱載荷量としては充分保守的な実験になっていると言える。

最終選定したスプレノズルをFig 3.3に示す。

以降、本ノズルの名称として、Fig 3.3上のものをBノズル、

Fig 3.3 下のものをDノズルと称する。

(2) 水模擬実験条件；

次の諸条件にて実験を行なう。

- (a) 流量； $\sim 50 \text{ l/min}$
- (b) 噴出圧力； $\sim 2 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$

3.2 ナトリウムスプレ燃焼実験装置，実験方法

3.2.1 実験装置の概要

(1) 試験容器

本試験容器は既にナトリウムプール燃焼実験に使用されたものであり，容器の詳細については参考文献(2)に述べられている。

Fig 3.4 および Fig 3.5 に本試験容器の外観図，外観写真を示す。

又，装置の主要目を Fig 3.4 中に示す。

なお，本ナトリウムスプレ燃焼実験実施にあたり，次の諸点を改造している。

- (a) 調湿系の設置
- (b) 気体成分濃度の測定，モニタ系の設置
- (c) ナトリウムエアロゾル測定，モニタ系の設置
- (d) 噴出配管系の改造；噴出弁以降の配管内容積を小さくするため，
4 インチ配管より1 インチ配管に変更した。
- (e) 試験セル床部への保温層の設置；
スプレ噴出後はプール状燃焼になるが，その際，床面下部への熱放散を極力小さくする為，Fig 3.4 中に示すように薄い鋼ライナ下部に保温層を設置した。
- (f) 受皿構造の変更；ナトリウム燃焼試験後のナトリウム処理，洗浄を考慮し，Fig 3.4 中に示すように“分割受皿”方式を採用した。

(2) 試験系統

Fig 3.6 に系統図を示す。系統は大別すると次のものより成る。

- (a) ナトリウム系；高温タンクを加圧しナトリウムを噴出させる系統
およびナトリウムのドレン系。
- (b) 気体成分濃度調節，測定系；
酸素濃度，湿分濃度を調節し，かつ，気体成分濃度のサンプリング測定，連続モニタを行なう系統。
- (c) エアロゾル系；サンプリング管を用い，閉ループにてエアロゾルを導き，測定モニタする系統。サンプリング管内面へのエアロゾル付着を減じる為，約 300℃までヒートトレースしている。なお，後述のようにエアロゾルサンプリングには，サンプリング管によるガス導入方式だけでなくエアロック式のサンプリングシステムも別途採用している。

3.2.2 実験方法

(1) 測定項目，測定方法

測定或いはモニタ項目，測定方法を Table 3.2 にまとめて示す。このうち温度計測位置については Fig 3.7 に詳細を示す。

又，エアロック式エアロゾルサンプリングについてその構造図を Fig 3.8 に示す。即ち，セル壁よりボール弁を介して，石英ウールを充填したサンプリング管を直接セル内に挿入し，セル内ガスを吸引し石英ウールにエアロゾルを捕獲して，サンプリングする方式としている。こうすることにより測定精度を上げるように配慮した。又，サンプリング管の出入時に外気がセル内に混入せぬよう図に示すようにガス置換を行なうようにしている。すなわちエアロック方式としている。捕獲されたエアロゾルは中和滴定又は原子吸光法により Na 量が得られ，吸引ガスの積算量に対する比から濃度を算定した。

(2) 試験基本手順

実験の基本手順を Table 3.3 にまとめて示す。

3.2.3 実験条件

ナトリウムスプレ燃焼実験は合計7ケース行なわれた。各ケースの実験条件を Table 3.4 に示す。

各ケースの特徴は Table 3.4 に記した通りであるが、TASP-N1は顕熱効果のみを見る実験、TASP-N2～TASP-N5は一次系ガス雰囲気を対象とした実験、TASP-A1～TASP-A2は二次系雰囲気を対象とした実験であり、湿分濃度を可変パラメータとして重視していることを特徴としている。

又、TASP-N5は平均粒径がやや大きいDノズルを用いており、他はすべてBノズルを用いている。

4. 水による予備実験の結果

ナトリウム試験用ノズルの選択の為、合計四種類のフルコーンスプレノズルを供試した。なお、最終的には Table 3.4 に示しているように B ノズルと D ノズルをナトリウム試験に採用した。

各実験結果を以下に示す。

(1) 拡がり角；

Table 4.1 にスプレの拡がり角を示す。ここでは分散の端より定めた拡がり角を示している。なお、中心からの分散積分量が全噴出量の 99% を超える半径位置を分散の端部と定義してデータ整理を行なった。

B ノズルおよび D ノズルについて代表的な噴出外観写真を Fig 4.1 (1) および(2)に示す。

ナトリウムスプレ燃焼解析コードの機能に合わせ、拡がり角を考慮していく必要があるが、SPRAY コードの場合は、スプレゾーン内とスプレゾーン外の占有容積を問題としている。したがって分散の端部で定義される拡がり角を用い、かつ各高さでの測定値の平均拡がり角を用いて充分の近似と考えられる。すなわち、下記の程度である。

- ・ B ノズルの平均拡がり角；約 40°
- ・ D ノズルの平均拡がり角；約 30°

(2) 流量特性；

Fig 4.2 に B および D ノズルの流量特性を又、B ノズルについてはノズル噴出孔部で定義した流量係数を Fig 4.3 に示す。使用レイノズル数範囲ではほぼ一定値であり、水に代わるナトリウム使用の際にも本数値に基づき評価し、ナトリウム実験時の初期加圧等を決めるのに用いた。

又、ノズル噴出孔オリフィス部で定義した流量係数がほぼ 1 であることから、噴出孔に流体が充填した状態で噴出されることを意味しており、したがってナトリウムスプレ燃焼解析評価に必要なナトリウム液滴の噴出初速度は、ノズル噴出孔部平均流速で近似して良いと考えられる。

(3) 分散 ;

BおよびDノズルに対する分散量の測定結果を Fig 4.4 に示す。

(4) 液滴径分布 ;

ノズルより約 1 m 下方にて受止め式により測定した粒径分布の結果を Fig 4.5 に示す。平均液滴径には，目的により種々の定義が成される。ここでは今後の使用の便を考え，平均質量径，平均表面積径，面積平均径等をリストアップした。各測定データはほぼ次の対数平均分布関数に従うことが確かめられており，したがって各平均径間の諸関係は，以下に示す諸式により関係付けることが可能である。

$$f(\ln d) = \frac{1}{\ln \sigma_G \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln d - \ln d_G)^2}{2 \ln^2 \sigma_G} \right] \dots\dots\dots (4.1)$$

ここに， f ; 対数平均分布関数

d ; 液滴径

d_G ; 幾何平均径

σ_G ; 幾何標準偏差

良く知られるようにこの分布に従うとすると，液滴径測定値を大きさの順に並べ，その累積頻度を対数確率紙上にプロットすれば，測定値は一直線上にのることとなる。標準偏差 σ_G は次のようになる。

$$\sigma_G = \frac{84.13 \% \text{径}}{50 \% \text{径}} = \frac{50 \% \text{径}}{15.87 \% \text{径}} \dots\dots\dots (4.2)$$

本データ処理では各平均粒径，標準偏差等は次の各式により求めた。⁽¹⁾

言うまでもなく，対数正規分布に完全に従うならば(4.2)式のσ_Gと下式のσ_Gは一致する。

$$\left. \begin{aligned}
 d_n &= \Sigma(n_i d_i \Delta d_i) / \Sigma(n_i \Delta d_i) \\
 d_s &= \{ \Sigma(n_i d_i^2 \Delta d_i) / \Sigma(n_i \Delta d_i) \}^{1/2} \\
 d_v &= \{ \Sigma(n_i d_i^3 \Delta d_i) / \Sigma(n_i \Delta d_i) \}^{1/3} \\
 d_M &= \Sigma(n_i d_i^3 \Delta d_i) / \Sigma(n_i \Delta d_i^2) \\
 \sigma_G &= \exp(\sqrt{\ln(d_v / d_s)})^2
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.3)$$

ここに、 d_n ; 個数平均径
 d_s ; 平均表面積径
 d_v ; 平均質量径
 d_M ; 面積平均径

(5) 受皿の分散量 ;

B および D ノズルに対する受皿の分散量測定結果を Fig 4.6 に示す。B ノズルの場合、中央の 4 ケの受皿に約 50% の水が貯まり、中央に近い 16 ケの受皿では全体の 96% の水が貯まる。ナトリウム火災実験では、この貯留ナトリウムがプール状燃焼するが、このような分散になっていることを考慮しておく必要がある。

又、噴出弁開放直後の過渡状況の観察では、弁開放後 1 秒以内位に定常噴出状態になることがみとめられた。但し、噴出弁閉鎖後では弁閉鎖とほぼ同時に水の噴出が止まるが、弁からノズルまでの間に残留した水がゆっくりとした間欠的な落下を起こすことがみとめられた。しかし、この量は全体噴出量と比べ無視しうる程小さく、実質的な影響はないものとみなせる。

5. ナトリウムスプレ燃焼実験結果

5.1 各試験状況の概要

各RUNの主要結果をTable 5.1にまとめて示す。以下に各RUNの所見、特徴の概要を示す。

5.1.1 TASP-N1 (顕熱効果試験)

本RUNは、基本比較データとしてナトリウムの顕熱効果のみを見るべく実験を行なったものである。すなわち酸素濃度はほぼゼロであり、又湿分についてもドライ条件下でナトリウムの噴出を行なった。

(1) 噴出経過 ; Fig 5.1 (1)

試験は高温タンク圧力を一定値にし、噴出弁を開くことにより実施した。水による予備実験から求めたノズルの流量係数を用い、ナトリウムにおいて 50 l/min の噴出率となるよう圧力を設定した。図より判るように噴射直後には、ほぼ 50 l/min の流量が得られている。しかし、容器内圧力が徐々に上昇してくるため、流量も徐々に減少していく。

(2) ガス圧力 ; Fig 5.1 (2)~(4)

スプレ噴出開始後よりガス温度、ガス圧力は上昇し続け、噴出の終了時にほぼピークに到達、以降徐々に低下する。

ピークガス圧力は 0.39 kg/cm^2 となった。

(3) 空間温度分布 ; Fig 5.1 (5)

スプレ噴出中の容器内空間温度分布については、図から判るように半径方向の温度差が大きくついているが、これは中心部にスプレゾーンが存在するためである。スプレゾーン外のガス温度は高さ方向に余り温度差がないが、中心部のガス温度は高さ方向にかなりの温度差がある。もっともスプレゾーン内の温度は実質上、ナトリウム温度と付近のガス温度との平均値を示す参考値である。下部の方の

温度が低い原因としては落下ナトリウム液滴自体が周囲に放熱して冷えていく効果と、スプレゾーン内ガスとスプレゾーン外ガスとの温度差の為、スプレゾーン内で上昇流となる自然循環流が生じ、これに伴ない下部にいく程周囲の冷たいガスをスプレゾーン内に巻込む量が増す効果との二者が相乗しているためと考えられる。

(4) 受皿温度 ; Fig 5.1(6)

受皿に落ちたナトリウムは受皿に熱を奪われ、受皿と等温になるので受皿温度はほぼナトリウム温度を示すものと考えて良い。

Fig 5.1(2)より分るように累積貯留ナトリウムがもっとも多くなる噴出終了後の貯留ナトリウム温度は約370℃を示している。受皿や、受皿下部の構造物へも一部の熱が奪われることを勘案すれば、受皿まで到達したナトリウム温度はもう少し高い。スプレ噴出時間中のガス空間への伝熱等を見捨て、かつFig 5.1(8)に示す受皿への貯留ナトリウム量測定値より、次式により温度を概算する。

$$T_{Na} = \frac{(W_{Na} C_{PNa} + W_R C_{PR}) T_{MIX} - W_R C_{PR} T_R}{W_{Na} C_{PNa}} \dots\dots (5.1)$$

ここに、 W ; 重量 (kg)
 C_p ; 比熱 (kcal / kg °C)
 T ; 温度 (°C)

添字 Na ; ナトリウム

R ; 受皿

MIX ; 混合温度すなわち実測ナトリウム温度

$$\left(\begin{array}{ll} W_{Na} = 6.37 \text{ kg} & W_R = 1.27 \text{ kg} \\ C_{PNa} = 0.31 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} & C_{PR} = 0.11 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \\ T_R = 20^\circ\text{C} & T_{MIX} = 370^\circ\text{C} \text{ (Fig 5.1(2) TE 602 のデータを参照)} \end{array} \right.$$

の数値を代入すると、

$$T_{Na} = 395 (^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (5.2)$$

と計算される。すなわち 500℃ で噴出したナトリウムが受皿に到達するまでに約 100℃ の温度降下となっていることが判る。

又、受皿の温度分布の特徴としては言うまでもなく、受皿分散量の大きい部分の温度が高くなっている。

(5) その他の温度；

その他、温度測定点として床ライナ、側壁ライナ、天井ライナ、コンクリート温度が測定されている。詳細については、本報告書第 2 分冊のデータ集にて示すが、次の結果となった。

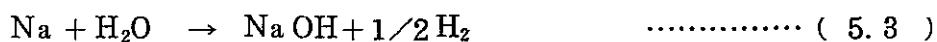
(i) 床ライナ、コンクリート；ほとんど温度変化なし。

(ii) 側壁ライナ、天井ライナ；スプレ噴射期間中で約 5℃ の温度上昇を示す。

(6) 気体成分の濃度変化； Fig 5.1 (7)

本 R U N は顕熱効果試験であるため、気体濃度の過渡変化は測定していないが、スプレ噴射後に水素濃度を調べた所 1500～2000 ppm 程度に上昇していた。以下、気体成分濃度は特に断わりない限りモル分率を示す。酸素濃度 $\div 0$ では雰囲気中の湿分とナトリウムの反応の結果、水素が生じたものと考えられる。

ナトリウムと水分との反応には次の二種がある。



前者の反応については H_2O 過剰のときに生じ易く、後者は NaOH の融点 (約 320℃) 以上でかつ Na 過剰のときに生じ易い。

したがって、本実験では後者の反応が起きると考えられる。初期湿分の濃度は 1000 ppm オーダであったので、ほぼこれに匹敵する H_2 が発生したことが判る。

なお、本図では測定生データをプロットしているが、ガスサンプリングラインでの滞留時間による遅れが実際には存在する。この遅れ時間は酸素濃度については約 2.5 分、湿分濃度については 5 分 40

秒そして H_2 濃度については約1分である。

(7) 試験後の開放点検結果；

本試験では酸素濃度がほぼゼロであるが，ナトリウムミストとしてエアロゾルが発生しており，開放点検でも，エアロゾルの沈降堆積や壁への付着がみとめられた，これらの定量値については5.2節で示す。

又，各受皿に貯まったナトリウム重量を測定した結果をFig 5.1 (8)に示す。水試験で得られた分散量とほぼ相似である。

5.1.2 TASP-N2 (3%酸素濃度，低湿分濃度試験)

本RUNは，一次系雰囲気気を模擬したものである。又，湿分濃度は一次系雰囲気気として目標としている1000 ppmオーダの低湿分濃度とした。

(1) 噴出経過；Fig 5.2 (1)

TASP-N1 とほぼ同じような経過をたどっているが，TASP-N1 よりもガス圧力の上昇が大きいため，流量減少は大きくなっている。又，噴射時間は流量減少が予想されたのでTASP-N1 よりも長く75秒程度とした。

噴出ナトリウム温度は約540℃程度である。

(2) ガス圧力；Fig 5.2 (2)

TASP-N1 と比べ空間ガスの圧力は高くなっており，ピーク圧力で 0.7 kg/cm^2 となった。又，TASP-N1 ではガス圧力ピークはスプレ噴出完了時点に存在していたが，本RUNおよび後述のTASP N3~N4ともスプレ噴出途上にピーク圧力を示す傾向がある。

(3) 空間温度分布；Fig 5.2 (3)~Fig 5.2 (5)

TASP-N1 と比べ全体的にかなり温度が高く，酸素濃度が3%となっただけでもかなりの反応熱の生じていることが窺える。スプレゾーン中心の温度は，噴出直後では注入ナトリウム温度を上回るも

のも見られる。推定の域を出ぬが、噴出ノズル部近辺ではナトリウム温度が高く、かつ、まだスプレゾーンが拡がっていないので、周囲の酸素を十分に含むガスと接触し易い。加えて、液滴群の落下による剪断力により周囲ガスがスプレゾーンに巻き込まれ易い状況にあるため、反応し易い条件が整っている。したがって一種の局部効果と見るべきかもしれない。

(4) 受皿温度 ; Fig 5.2 (6)

受皿温度についても TASP-N1 よりもかなり温度が高い。前述したのと同じ方法で受皿へ到達したナトリウム温度の推定値を求めると、約 480℃ と計算される。すなわち注入ナトリウム温度が 530℃ であるので、落下液滴の温度降下は TASP-N1 の約 1/2 である。換言すれば反応熱がかなり大きいことを意味している。

(5) その他の温度

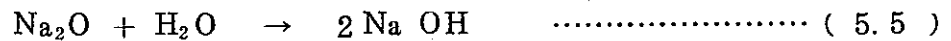
側壁ライナ、天井ライナは、スプレ噴射期間中で約 150℃ の温度上昇を示している。これについても TASP-N1 との差が顕著である。なお、床ライナやコンクリートの温度は余り変化していない。

(6) 気体成分の濃度変化 ; Fig 5.2 (7)

本 RUN では、後になって判明したことであるが、噴出弁の弁座からのナトリウムの漏れがわずかにあり、湿分濃度を調整中にナトリウムがごく少量漏れたため、水素ガスが発生し、初期 H_2 濃度は約 3000 ppm 程度あった。ナトリウムを噴射すると、酸素、湿分濃度のみならず、 H_2 濃度も低下する結果となった。一旦発生した H_2 ガスが何らかの形で反応したことを物語っている。酸素との結合、又は NaH への転換が考えうるが、前者の反応は高温で、後者の反応は低温で生じ得ることが言われている。しかし通常後者の反応速度はかなり遅く、かつスプレ火炎による局所高温化をかんがみれば、前者の反応の方が生じる可能性が強いと思われる。前者の反応とすれば

酸素と水素の結合により H_2O が発生し、それが Na と反応し、再び H_2 を発生する可能性があるのではあるが、実際にはそのようになっ
ていないことは注目すべきである。

かなり確度の高い可能性として Na_2O のエアロゾルが湿分を吸収する
ことが考えられる。この場合、下式に示すように H_2 は発生しない。



このことについては、6.2 節でも触れる。

(7) 試験後の開放点検結果；

エアロゾルの堆積・付着について、定量的には後述するが、目視で
もかなりの量が確認された。

5.1.3 TASP - N3 (3%酸素濃度, 高湿分濃度試験)

本 RUN では酸素濃度を 2.8%，湿分濃度を 16,500 ppm として実験を
行なった。湿分濃度は「もんじゅ」一次系雰囲気ガス調節系のコールド
温度 (=15℃) での飽和湿分濃度 ($\approx 15,000$ ppm) を狙ったものであ
り、実機での最高湿分濃度に対応する。

(1) 噴射経過； Fig 5.3 (1)

噴出ナトリウム流量，ガス圧力ともほぼ TASP - N1 と同じ経過で
ある。換言すれば圧力応答については，湿分濃度はほとんど関与し
ていないことを示している。又，噴射ナトリウム温度は 538℃ で
ある。

(2) ガス圧力； Fig 5.3 (2)

TASP - N2 とほぼ同様である。ガス圧力ピーク値は 0.72 kg/cm^2
となった。

(3) 空間温度分布； Fig 5.3 (3)~(5)

ガスの空間温度分布パターンについても TASP - N2 と大きな差は
ない。

(4) 受皿温度 ; Fig 5.3 (6)

全般的には , TASP - N2 と大きな変わりはない。

(5) 気体成分の濃度変化 ; Fig 5.3 (7)

酸素濃度 , 湿分濃度についてはナトリウム噴射後低下するが , 水素濃度については約 2,000 ppm まで上昇している。しかし初期の湿分濃度が約 16,000 ppm であったので , 湿分がすべて (5.4) 式によりナトリウムと反応すると仮定すると 16,000 ppm の水素濃度となる筈であり , これと比べれば実測の水素濃度はかなり低い。前記したように Na_2O エアロゾルが水分を吸収する割合が大変大きいことに関連すると考えられるが発生した水素が酸素と結合し , この水分がエアロゾルに吸収されるのか , 初めから雰囲気ガス中に存在する水分がエアロゾルに吸収されるのかは明らかではない。恐らく両者とも起きているものと思われる。

いずれにしても本 RUN により初期湿分濃度が 16,000 ppm の場合には思いのほか水素濃度は上昇せぬことが実験的に確認された。

(6) 試験後の開放点検結果 ;

エアロゾルの堆積量 , 付着量等につき TASP - N2 との顕著な差はみとめられなかった。

5.1.4 TASP - N4 (3% 酸素濃度 , 高々湿分濃度試験)

本実験では酸素濃度を 3% とし , 湿分濃度を 23,000 ppm とさらに高い湿分濃度とした。本湿分濃度値は実機にはない条件であるが , 酸素濃度と同じ程度の湿分濃度になるとどのようになるかを調べるため実験を行った。

(1) 噴射経過 ; Fig 5.4 (1)

図に示すように噴射流量経過は TASP - N3 とほぼ同じである。

噴出ナトリウム温度は約 520℃ である。

(2) ガス圧力 ; Fig 5.4 (2)

圧力上昇パターンは TASP-N3 とほぼ同じである。ただし、ガス圧力のピーク値は 0.62 kg/cm^2 となっており、TASP-N3 よりやや低い。

(3) 空間温度分布 ; Fig 5.4 (3)~(5)

TASP-N2, TASP-N3 と傾向的な差異はない。

(4) 受皿温度 ; Fig 5.4 (6)

これも TASP-N2 や TASP-N3 と大きな差はない。

(5) 気体成分の濃度変化 ; Fig 5.4 (7)

酸素濃度はスプレ噴射により 3% から約 1% まで減少し、TASP-N2 や TASP-N3 とほぼ類似の結果となった水素濃度はスプレ完了後、約 10,000 ppm まで増加している。

湿分濃度の測定については、本試験では極めて高い湿分濃度条件下での試験であり、雰囲気各部の初期温度に近い露点温度を持つ。容器内ライナ温度より低い露点温度になるよう湿分濃度を調整していたが、温度計測を行っていないセル外の湿分濃度測定系で局所的に露点温度より低くなっている部分があったらしく、この部分に一部水分が凝縮していることが後に判明した。このため湿度データは有効には測定できなかった。しかしナトリウムスプレ噴出時間は1分間のオーダーであり、湿分濃度測定系のような細管の一部に存在した凝縮水がスプレ燃焼に直接影響したとは考え難く、無視して良いとみなせる。

次に水素濃度の挙動についてであるが、TASP-N3 から予測された知見から見て水素濃度はかなり高い。TASP-N3 では水分がすべてナトリウムと反応し水素を発生するとしたときの値より1桁小さい水素濃度となっていたが、本試験では理論最大濃度の約 1/2 となっている。すなわち初期湿分濃度が高い程、水素の発生する割合が

大きくなる。現時点では確かなことは言えぬが、Na 酸化物が水分を吸収することがH₂発生を抑制していると考えれば、TASP-N3 と比べ湿分濃度に対し相対的には酸素濃度が低いため、Na 酸化物の発生量も相対的に小さくなり、吸収効果も小さくなる。したがってH₂発生抑制効果も小さくなっていることが一原因と考えられる。

(6) 試験後の開放点検結果；

エアロゾルの堆積量、付着量等につきTASP-N3 と比べ顕著な差はみとめられなかった。

5.1.5 TASP-N5 (液滴径効果試験)

TASP-N1 ~ N4 および後述のTASP-A1, A2ではスプレノズルとしてBノズルを用いた。本TASP-N5実験ではBノズルよりも液滴粒径の大きなDノズルを用いた。さらに本実験ではナトリウムを加圧する高温タンクのカバーガス圧力をセル内圧力上昇に合わせて上昇せしめ、すなわち、差圧を一定に近くなるように調節し、噴出流量を極力一定にするようにした。初期雰囲気ガスは酸素濃度 = 3%, 湿分濃度 = 8,000 ppmである。

(1) 噴射経過；Fig 5.5(1)

スプレ噴出後、セル内圧力が上昇し出す為、高温タンク圧力を人為的に上昇せしめることにより45~50 l/minの比較的安定した流量を得ることができた。噴出継続時間は約59秒、又、噴出ナトリウム温度は約520℃程度である。

(2) ガス圧力；Fig 5.5(2)

本ケースを含め、TASP実験シリーズではスプレ噴射完了直前の時点でガス圧力はほぼ定常圧力になっていることがみとめられるが、これは言い換えれば、スプレの燃焼および顕熱とライナ等周囲への放熱量とがバランスした状態を意味している。したがって、いわ

ゆるピーク圧力はこの状態の圧力に対応しており，周囲への放熱がこれに大きな影響を与える。一方，スプレ噴射直後からの過渡的な圧力上昇については，スプレの燃焼および顕熱移動が大きなウェイトを占め，周囲への放熱の影響は比較的小さい状態となっている。TASP-N5のピーク圧力は約 0.62 kg/cm^2 であり，TASP-N4のピーク圧力とほぼ同じである。ピーク圧力だけを比べると液滴径のちがうBノズルとDノズルの差が余り見られなかったことになるが，これは前述のように周囲への放熱の影響が強いため，直接，スプレのちがいをしていることにはならないためと思われ，むしろ噴射直後から定常に至るまでの過渡圧力を比較すべきと考えられる。Fig 5.4(1)およびFig 5.5(1)を比較して分るように，TASP-N5の方が噴出流量が大きいにもかかわらず，圧力上昇はTASP-N4より明らかに緩慢なものとなっている。これより液滴径による差異は実験データに充分表われていると解することができる。

(3) 空間温度分布；Fig 5.5(3)~(5)

50秒経過後の温度分布をFig 5.5(3)に示しているが，同じ50秒経過後のTASP-N4と比べスプレゾーン内の温度分布をみると，TASP-N5の方がやや高い温度を示している。しかし，その反面，スプレゾーン外のガス温度やライナ温度はTASP-N5の方がかなり低い温度となっている。

50秒経過後はほぼ定常的な圧力となっており，前述したように定常になるまで過渡状態のちがいがこのような差をもたらしたと考えべきであろう。すなわち，温度分布についても液滴径のちがいが表われており，相対的に反応の急激な方が，ガスやライナにはやく熱が伝えられ，温度が上昇し易い反面，スプレゾーン部での酸素濃度減衰も大きいため，スプレゾーンでの温度が相対的に低くなるものと考えられる。

(4) 受皿温度 ; Fig 5.5 (6)

受皿温度については , TASP - N 4 と大差ない。

(5) 気体成分の温度変化 ; Fig 5.5 (7)

TASP - N 4 と比べ酸素濃度の低下が緩慢なことがみとめられ , 又ブール燃焼になってからもかなり反応が継続していることもみとめられる。

水素濃度については約 500 ppm まで上昇している。初期の湿分濃度が約 8,000 ppm であったので , この湿分がすべて Na と反応し H_2 に変わったとすると約 8,000 ppm の水素濃度になる筈である。しかし実際には TASP - N 5 でも , これと比べ 1 桁以上小さな水素濃度となっており , TASP - N 3 と類似の結果となっている。

(6) 試験後の開放点検結果 ;

エアロゾルの堆積量 , 付着量等につき , TASP - N 3 や TASP - N 4 と比べ , 顕著な差異はみとめられなかった。

5.1.6 TASP - A 1 (21% 酸素濃度 , 高湿分濃度試験)

TASP - A シリーズでは二次系ガス雰囲気 , すなわち空気雰囲気を対象とし実験を行なった。TASP - A 1 では高湿分雰囲気 (16,500 ppm) とし , TASP - A 2 では極低湿分雰囲気とした。

(1) 噴射経過 ; Fig 5.6 (1)

本空气中試験も高温タンク圧力も一定値にし噴出弁を開くことによりスプレ燃焼を生じさせた。なお , 前述したように噴出弁の弁座からの漏洩があったため , 本弁に直列に手動弁を設置し , 遠隔操作ハンドルにより手動で弁を開けた。空气中試験では反応が激しく , 圧力の急上昇とともにかなりの流量の減少が生じる。手動による弁開放操作のため , 最初の 1 ~ 2 秒程は流量がやや小さく , 安定性が悪い。しかし , すぐに安定した流量となり徐々に流量減少していき ,

最終的には $25 \ell/\text{min}$ のほぼ定常的流量となる。すなわち、スプレ燃焼部からの発熱と周囲ライナの放熱がバランスした状態を現出していることとなる。なお、天井部ののぞき窓よりスプレ噴射後の状況を 8 mm 映写機にて撮影したが、これを写真にし Fig 5.6 (8) に示す。写真から分るように、極めて激しい火炎反応が生じていることと、多量のエアロゾルの発生が充分みとめられる。

噴射時間については安全を期し、18秒間でスプレ噴出を終えている。噴出ナトリウム温度は、 512°C である。

(2) ガス圧力 ; Fig 5.6 (2)

ガス圧力はナトリウム噴出開始後急上昇する。しかし圧力上昇に伴ない、噴出流量も減少し、ガス圧力・流量とも一定値に落ちつく。すなわち前述したように、ナトリウム液滴の持込む熱量と周囲構造物の吸熱がバランスした状態を現出している。最高到達圧力は 1.16 kg/cm^2 である。又、初期の圧力上昇速度について換算すると、時定数は約 5.3 秒、上昇速度は $0.22 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ となった。これは TASP-N シリーズの圧力上昇速度よりかなり大きい。

(3) 空間温度分布 ; Fig 5.6 (3)~(5)

注目されるのは中心部付近の測定温度が 1000°C を越えていることであり激しく反応していることが窺える。又、スプレ噴射が完了してからも中心部付近のガス温度が周囲ガスよりもかなり高く、中央部に多く貯留したナトリウムがプール燃焼していることを示唆している。

(4) 受皿温度 ; Fig 5.6 (6)

受皿に落下したナトリウム温度は、やはり中心付近で高く、スプレ噴出後で 650°C 前後となっており、噴射ナトリウム温度よりも明らかに高くなっている。スプレ噴射中のプール燃焼効果を見無視すると、受皿に到達するナトリウム温度は 5.1.1 節で述べた方法で概算

でき、約 830℃と計算される。しかしプール燃焼効果も大きく、あくまで参考値であろう。

スプレ完了後にはプール燃焼となるので受皿温度は、その後も徐々に上昇する。プール燃焼時の受皿温度の上昇は、中心部のものよりむしろ中心から離れた所のものの方が大きくなっているが、これは熱電対が受皿底面に設置されているため、中心部から離れた所のようにナトリウム液深が浅いものの方が表面の火炎温度の影響を受易いためと推察される。

(5) その他の温度；

天井ライナでは最高 70℃まで温度上昇し、TASP-N シリーズよりも高い温度となる。側壁ライナについても 50～60℃まで温度上昇する。しかし床ライナ、コンクリート温度はほとんど変化していない。

(6) 気体成分の濃度変化； Fig 5.6(7)

高湿分濃度試験であるが、水素の発生はみとめられなかった。すなわち高酸素濃度であるので反応により火炎を生じ、この部分が高温化されるので、たとえ湿分とナトリウムが反応し水素が発生しても酸素と簡単に結合する条件が整っていると考えられる。

次に酸素濃度であるが、スプレ噴射時間が短かかった為か、スプレ噴射後の濃度は約 18%となっている。

湿分濃度については 50 分後の到達濃度で約 2000 ppm であり、スプレ、プール燃焼期間を通じ減少する。

二酸化炭素濃度についても実験前およびナトリウム噴射後 12 分、40 分、100 分のときにガスサンプリングし、濃度を分析した結果、いずれも 300 ppm 以下（大気中の CO₂ 濃度）になっていることが確認された。

(7) 試験後の開放点検結果；

TASP-N シリーズと比べ、エアロゾルの堆積、付着量はかなり多い。床受皿にはエアロゾルは2~5 mm程度堆積していた。定量的データについては5.2節にて後述する。

5.1.7 TASP-A2 (21%酸素濃度, 極低湿分濃度試験)

本試験では極低湿分濃度を達成するため、ドライN₂ガスにドライO₂ガスを混合させ、いわゆる人工空気とした。スプレ噴射開始直前O₂濃度は20.4%、湿分濃度は410 ppmとなった。

(1) 噴射経過；Fig 5.7(1)

TASP-A1と比べ、噴射時間を長くとり約57秒とした。

TASP-A1でも見られたように、噴射流量がガス圧力上昇とともに減少していき、約20秒経過時点で定常値になり22ℓ/minとなっている。なお、噴射ナトリウム温度は512℃である。

(2) ガス圧力；Fig 5.7(2)

ガス圧力についても定常状態を示し、これが最高圧力となっており、1.25 kg/cm²であった。初期雰囲気ガス条件、例えばガス温度、大気の圧力等の条件のちがいを勘案すれば、TASP-A1との差異は顕著には現れていないと判断される。

(3) 空間温度；Fig 5.7(3)~(5)

TASP-A1と同じく中心部の測定温度が1000℃を越えるものがある。噴射初期の10秒後には、測定最高温度は容器高さ方向のほぼ中央あたりであったものが、噴射がすすみプール状にナトリウムが貯まり出すと、今度は容器高さ方向の下部付近に最高温度が見られる。プール状に燃焼するナトリウムの影響のあることが示唆される所である。

なお、ガス空間測定温度の最高値は1200℃を越えた。

(4) 受皿温度 ; Fig 5.7 (6)

TASP-A1で見られた種々の傾向がより顕著にみとめられる。

例えば、ブール燃焼時の受皿温度は中心より少し離れたものの方が高い温度を示す等の結果がみとめられる。

(5) その他の温度 ;

TASP-A1よりも試験時間が長いため、天井ライナは100℃まで温度上昇した。

(6) 気体成分の濃度変化 ; Fig 5.7 (7)

スプレ噴射完了後に酸素濃度は約12%まで低下する。その後は、ブール燃焼に移行し、徐々に酸素濃度は低下していく。

(7) 試験完了後の開放点検結果 ;

一連の試験を通じ、本TASP-A2がもっともエアロゾルの堆積、付着量が多かった。床面へのエアロゾル堆積厚さは5~10mm程度にまでなっている。開放したときの写真をFig 5.7 (8)に示す。

5.2 エアロゾルに関する測定結果

各実験ケースに対し、エアロゾルに関し測定した結果を本節に示す。

5.2.1 試験容器内エアロゾル濃度推移

エアロック式エアロゾルサンプラを用い、捕集したナトリウムエアロゾル量を中和滴定又は原子吸光法により求めた。これより算定したエアロゾル濃度推移の代表例をFig 5.8(1)～Fig 5.8(3)に示す。

いわゆるサンプリング分析法の場合、いくつかのプロセスを経て測定値が出される為、誤差が介在し易いことや、サンプリングによる測定が間欠になるとともに、通常、種々の制限からサンプリング点数を数多くとれない為、データのバラつきの大きいものもある。

今回光学式エアゾル濃度計を使用したか、本連続計測とサンプリング分析とを併用すれば合理的な測定が可能である。

Fig 5.8(2)の中にエアロゾル濃度計による測定結果を併せて示す。これより次のことがみとめられる。

- (1) 初期1時間前後までの濃度減衰率は大きいが、それ以降は濃度減衰率が小さくなる。すなわち大半のエアロゾルは初期に減衰する。この濃度減衰の主因は後述するように床へのエアロゾルの沈降によるもので、粒子径の大きなもの程、沈降速度が大きく、時間経過とともに沈降速度の小さい小粒径のものが残っていくためとみなせる。実際には粒子間の衝突による粒子の合体や壁面へのエアロゾルの付着等が絡み、これらを考慮した解析コードによりデータを評価する必要がある。
- (2) エアロゾル濃度については空気中試験、3%酸素濃度試験、0%酸素濃度試験の順に小さくなっており、定性的に妥当な結果である。
しかし、初期にはそのような順になっていても、前述したように濃度減衰が著しく、空気中試験の濃度は1時間辺りを経過すると3%酸素濃度試験データと変わりなくなる。
高エアロゾル濃度であればエアロゾル粒子間の衝突合体が促進され、それだけ減衰率が大きくなるためと考えられる。
- (3) スプレ噴射完了時のエアロゾル濃度をFig 5.8の外挿より推定する

とおおよそ次のオーダである。これは 6.3 節で後述する沈降，付着総量から求めた最大エアロゾル濃度にオーダ的に一致する。

3%酸素濃度試験：10 g/m³のオーダのエアロゾル濃度

空気雰囲気試験：100 g/m³ "

(4) Fig 5.8 (2)に示すようにエアロゾル濃度計の較正データを得た。

今後の適用に極めて有効と考えられる。なお，光学式エアロゾル濃度計は T A S P - A シリーズ実験では初期に濃度が高すぎるときには作動しなかった。側方散乱現象を利用しているので過負荷時には使用できないことが判明した。しかし，今後，エアロゾルの希釈調整法を改善することによりこの問題は解決可能である。

5.2.2 エアロゾルの沈降量測定結果

エアロゾルの沈降量の測定には 3.2.2 節で説明したように，スプレ完了後から試験終了までの期間に沈降する総量を測定するものと，沈降量の経時変化を測定するものの二種類がある。

(1) 沈降総量の測定

ナトリウムスプレが噴射中にはナトリウム液滴自体が沈降サンプル内に入る恐れがあるので，スプレ噴射中にはサンプルに蓋をしておき，スプレ噴射完了後に遠隔操作により蓋をとって試験終了まで測定を行った。

T A S P - N シリーズの代表的なもの，T A S P - A シリーズの結果を対比し，Fig 5.9 に示す。図から分ることは以下の通りである。

(a) T A S P - N 3 実験と T A S P - N 4 実験とでは顕著な差はみとめられない。すなわち，湿分濃度による差異ははっきりとはみとめられない。

(b) T A S P - A 1 と T A S P - A 2 実験では T A S P - A 2 の方が沈降総量が多い。これは後者の方がスプレ噴射時間がかかり長かったことが主因と考えられ，スプレ噴射中にエアロゾルが多量放出されることを物語っている。

- (c) T A S P - N シリーズと T A S P - A シリーズでは明らかに後者の方が沈降総量が多い。すなわち空気中の実験の方がエアロゾルが放出され易い。
- (d) 容器半径方向に沈降量分布データを採るようにしたが、分布パターンはまちまちで傾向的なことは言えない。むしろ、半径方向の分布は余り生じていないとみなすのが妥当のようである。

(2) 沈降量の経時変化測定

エアロック式沈降量測定装置を試験途上任意の時間に密器内に挿入し、エアロゾル沈降量の経時変化を概略把握できるようにした。

T A S P - N シリーズの代表的なもの、および T A S P - A シリーズの結果を対比し、Fig 5.10 に示す。図から次のことがみとめられる。

- (a) エアロゾル沈降量は時間経過とともに急激に小さくなっていく。これはエアロゾル濃度の測定結果より類推される事実によく符合する。
- (b) T A S P - A シリーズすなわち空気中実験データの方が沈降量が多い。又、T A S P - A 2 データの方が T A S P - A 1 データよりも沈降量が多い、これらの大小関係は沈降総量の測定結果の傾向と一致する。

5.2.3 エアロゾルの壁面への付着量測定結果

エアロゾルの壁面への付着量測定に関しても、付着総量と付着量の経時変化の二種類を求めた。

(1) 付着総量の測定

測定結果を Fig 5.11(1) に示す。又、T A S P - N 3, N 4, N 5 および T A S P - A 1, A 2 については単位面積あたりの床面平均沈降量に対する各壁面への単位面積あたりの付着量の割合を算出し、Fig 5.11(2) に示す。

- (a) 高さ方向への単位面積あたりの付着量分布については傾向的な差は見出だせない。サンプリング、分析誤差等を勘案すればほぼ一

定値であると考えられる。

(b) 各実験ケースの付着量の大小関係については、酸素濃度の無視できる T A S P - N 1 データがもっと付着量が小さく、次いで酸素濃度 = 3 % の T A S P - N 2 ~ T A S P - N 4 データが小さく、そして空気雰囲気中の T A S P - A シリーズの付着量が多い。この大小関係は定性的に考えて妥当な結果とみなせる。

(c) T A S P - N 2 ~ T A S P - N 4 を比較すると、T A S P - N 2, T A S P - N 3, T A S P - N 4 の順に明らかに付着量が小さくなっている。これは初期湿分濃度と関係があるようであり、湿分濃度が大である程、付着量は小さいとの興味ある実験結果となった。この原因は現時点では不詳であるが、この三ケースの実験でエアロゾル濃度、温度分布等の空間ガス条件は大差がないので、エアロゾルそのものの物理的性質のちがいに起因することが推測される。

後述のように壁面への付着要因の大半は熱泳動によるものと考えられ、6.3 節で示す (6.25) 式からも判るようにたとえばエアロゾル粒子の熱伝導が大であるほど熱泳動速度は小さくなる。高湿分濃度の実験ではナトリウム酸化物のエアロゾルが NaOH に転換され易く、NaOH の熱伝導率はナトリウム酸化物のそれより桁ちがいに大きいゆえ、熱泳動速度も小さくなったことがひとつの可能性として挙げられる。この辺りについて明確にするには今後、エアロゾルの化学組成がどのように変遷するかについて調べなければならない。

(d) T A S P - A 1 と T A S P - A 2 では T A S P - A 2 データの方が付着量が大きくなっている。この実験ケース間でも湿分濃度はかなりちがうが、湿分に比べて酸素が圧倒的に多く存在するので、湿分が影響したとは考え難い。むしろ、既に述べたようにスプレ噴射時間のちがいに起因し、空間ガス中エアロゾル濃度が T A S P - A 2 の方が高かったため、付着量の差が生じたと考え

るのが妥当であろう。

但し、Fig 5.11(2)に示すようにTASP-A1とA2の床面沈降量に対する付着量の割合という量を定義し、これについて比較すると、TASP-A1とA2で大きな差はない。又、TASP-N5よりTASP-A1、A2の方がこの付着量割合は小さくなる。これは、空气中試験の方が沈降エアロゾルが多くなるためであろう。

(2) 付着量の経時変化測定

本測定においてもエアロック式付着量測定装置を試験途上適宜外部より挿入し、エアロゾル付着量の経時変化を把握できるようにした。側壁への付着経時変化をFig 5.12に又、天井への付着経時変化をFig 5.13に示す。図より次のような点がみとめられる。

- (a) いずれの実験ケースも時間経過とともにエアロゾル付着速度は急激に小さくなっている。換言すれば初期に大半のエアロゾルが付着していることとなる。
- (b) 空气中実験のTASP-Aシリーズの付着速度は初期では1桁以上TASP-Nシリーズより大きい。
- (c) TASP-N2, TASP-N3, TASP-N4の側壁への付着速度を比較するとこの順に付着速度が小さくなっており、付着総量測定結果と傾向が一致する。天井への付着量はTASP-N3とTASP-N4について測定を行ない、やはりTASP-N4の方が付着速度が小さかった。
- (d) TASP-A1とTASP-A2の比較でも付着総量測定結果と傾向が一致し、TASP-A2の方が付着速度が大である。
- (e) 側壁と天井への付着量の差異については、これを議論するような顕著な差はないとみなせよう。

5.2.4 エアロゾル粒径分布の測定結果

一般エアロゾルの測定に古くから用いられているカスケードインパクトはナトリウムエアロゾルの測定にも有効なことはいくつかの文献⁽⁶⁾⁽⁷⁾でも述べられている。本実験でも Andersen 3371モデルを用い、エアロゾル粒径分布を求めることを試みた。カスケードインパクトは言うまでもなく、多段多孔ノズルを用いた慣性衝突分離方式を基本原理としている。本インパクトは8段の分級捕集板で構成されている。本インパクトにエアロゾルを含むガスを一定流量で吸引すると各段での衝突流速が下段になる程増大していくので分級捕集されることとなる。各段に捕集されるエアロゾル粒子の50%有効カット径は次式により表わされる。

$$D_{P50} = \sqrt{\frac{18\mu\phi N\pi D_c^3}{4CQ\rho_p}} \dots\dots\dots (5.6)$$

ここに

- D_{P50} ; エアロゾル粒子の50%有効カット径 (cm)
- μ ; 粘性係数 (Poise)
- ϕ ; 慣性パラメータ (-)
- N ; ジェットプレートの1段あたり穴数 (個)
- D_c ; ジェットプレートの穴径 (cm)
- C ; カニングムの補正值 (-)
- $(= 1 + \frac{2A\lambda}{D_p})$
- λ ; 気体分子の平均自由行程 (cm)
- A ; 気体の種類等により決まる定数 (-)
- Q ; ガス吸引流量 (cm³/sec)
- ρ_p ; エアロゾル粒子の密度 (g/cm³)

平均自由行程 λ や定数 A は例えば次の式を用いることができる。

$$\lambda = \frac{\mu'}{0.499 P} \sqrt{\frac{\pi R T}{8 M}} \quad \text{-----} \quad (5.7)$$

$$A = 1.25 + 0.42 \exp(-0.87 D_p / 2 \lambda) \quad \text{-----} \quad (5.8)$$

ここに

R	; 普偏気体定数	(erg/mol/°K)
P	; 圧力	(g/cm ²)
T	; 絶対温度	(°K)
M	; ガスの分子量	(—)
μ'	; ガスの粘性係数	(g·sec/cm ²)

本カスケードインパクトの慣性パラメータ ϕ は 0.14 とされており、以上の諸式より 50% 有効カット径を計算できる。

各インパクトの計算で用いた主な数値を Table 5.2 にまとめて示す。しかし、(5.6) 式の計算式においてもっとも問題となるのはエアロゾルの密度 ρ_p としてどのようなデータを用いるかということである。厳密にはエアロゾルの真の化学組成なり、実際のエアロゾルの顕微鏡写真等のデータを集積の上、評価していく必要がある。しかし、文献(6)、(7)等でナトリウムプール燃焼時に発生するエアロゾルについての研究が成されてきており、カスケードインパクトで得られたデータより粒径を算定する際には密度 = 1.0 g/cm³⁽⁶⁾ や 1.32 g/cm³⁽⁷⁾ 等の値が提唱されている。

ここでのデータ整理としてはエアロゾルの密度として 1 g/cm³ を用いた。得られたデータの代表ケースを対数確率紙にプロットして示すと Fig 5.14(1)~Fig 5.14(3)の通りである。統計的議論をするには点数が少ないが、完全な対数正規分布関数とはみし難いデータも一部存在する。しかしおおむね、対数正規分布関数に近い。点数が少ない為、概略値とならざるを得ないが、本図より代表ケースにつき幾何標準偏差を概算し、これの経時変化を Fig 5.15 に示す。又、Fig 5.16 に

は累積頻度 = 50% での粒径すなわち質量中央粒径の経時変化を示す。
以上の各図よりみとめられる点をまとめると以下の通りである。

- (a) 質量中央エアロゾル粒径は時間経過とともに小さくなる傾向がみとめられるが、その範囲は $1 \sim 4 \mu\text{m}$ である。
- (b) 空气中試験と低酸素濃度中試験の質量中央粒径経時変化特性の差は明瞭にはみとめられない。
- (c) 幾何標準偏差も時間経過とともに小さくなっていく傾向がみとめられる。又、エアロゾル発生が他の実験ケースよりも多かった空气中試験の T A S P - A 2 では他の実験と比べ、標準偏差値は大きいことがみとめられる。粒径の時間変化については、粒径の大きなものから順次床へ沈降していく過程が、エアロゾル粒子同志の合体過程よりも支配的であることを意味しており、又、幾何標準偏差の時間変化については大きな粒子の沈降と小さな粒子の壁面への付着が併行してすすんでいることを意味していると考えられる。
- (d) 高々湿分濃度実験の T A S P - N 4 では対数正規分布よりかなり離れ、小粒径部では対数確率紙上で大きな勾配の累積カーブとなり、大きな粒径部では小さな勾配となっているものが時間経過とともにみとめられるようになる。これは大きな粒子の沈降に比べ小さな粒子の減衰が余りすすんでいないことを意味している。すなわち、5.2.3 節で示したように T A S P - N 4 では壁面への付着量が他の実験と比べ少なかった事実と定性的に合致する。
この辺りについては今後の興味ある課題と言えよう。なお、文献(8)でも高湿分濃度下で Na エアロゾルの粒径分布が対数正規分布より外れる事例が報告されている。

5.3 その他の実験結果

5.3.1 試験容器のリークレート

ナトリウム燃焼により発生したエアロゾルが試験容器外に漏れるかどうか、あるいは容器各部のリーク孔にエアロゾルが推積して、閉塞するのかどうかを調べるのは、ひとつの重要課題と考えられる。言うまでもなく、これを系統的に調べるためには、別途試験が必要であるが、ひとつの目安を得る目的で、ナトリウム燃焼実験前後のセルの容器のリークレートを実測した。結果を Table 5.3 にまとめて示す。次のことがみとめられる。

- (1) T A S P - N 3 ~ T A S P - N 4 実験を除き、燃焼実験前に比べ実験後には明らかにリークレートが小さくなり、リーク孔へエアロゾルが詰まってきていることを示唆した。
- (2) T A S P - N 3 ではリークレートはやや増加し、T A S P - N 4 および N 5 では約 2 倍までリークレートが増加した。これら実験に共通して言えることは低酸素濃度で、高湿分雰囲気と言う点であるが、現状の所、このようになる原因は不明である。今後の研究に待つ所が多い。
- (3) エアロゾルにより完全閉塞し、リークレートが零になるようなことはみとめられなかった。しかし実機と比べれば容器の大きさが格段に小さいため、5.2 節で示したようにエアロゾル濃度の減衰が極めて速く、高エアロゾル濃度条件下にさらされていた時間は極めて短かい、実機ではエアロゾル濃度の減衰は遅いので、この結果を実機に適用し議論をするのは早計と考えられる。

なお、目視では容器外にエアロゾルと思われる煙が出るようなことは観察されなかった。

5.3.2 試験容器の点検結果

各スプレ燃焼実験が終了し、温度が下がると、CO₂安定化処理プロセスを経てから、容器のマンホールを開き、その内部に異常がないかどうかを点検した。

その結果、すべての実験ケースともライナ壁他の構造物に何らの異常はみとめられず、過酷なナトリウムスプレ燃焼条件下でも容器の健全性に特に問題のないことが示された。

6. 検討, 考察

6.1 ナトリウム液滴燃焼, 温度, 圧力応答の検討

6.1.1 水とナトリウムの相関性について

本研究ではフルコーンスプレノズルを用い, 予め水による予備実験でノズルの諸特性を求めた上, ナトリウム実験に同ノズルを使用した。したがって, 水実験で得たデータがナトリウムにどのように適用されるかを検討する必要がある。厳密にはスプレノズル個々の特性があるので, ひとつひとつのノズルについて異種液体間の実験データを得る必要があるが, 本実験には標準の遠心型加圧フルコーンスプレノズルを用いたので, 既存の文献等の知見がいくつかあり, これよりナトリウムへの適用性を検討する。

遠心型加圧スプレノズルについては例えば次に示すような実験式⁽⁹⁾がある。

$$\bar{D}_P \propto d_0^{1.35} \cdot G^{-1.0} \cdot \sigma^{0.62} \cdot \eta^{0.26} \dots\dots\dots (6.1)$$

ここに

\bar{D}_P	; 液滴代表径	(m)
d_0	; ノズルのオリフィス孔径	(m)
G	; 流 量	(kg/sec)
σ	; 表面張力	(kg/m)
η	; 粘性係数	(kg · sec/m ²)

流体の物性に関連するものとして上式では表面張力と粘性係数があるが, Table 6.1に示すように粘性係数については530℃のナトリウムは常温水の約4.4分の1, 又, 表面張力についてはナトリウムは水の約2倍となっている。使用ノズルにより表面張力や粘性係数のべきの数値が若干異なるが, (6.1)式を例にとると同一ノズル, 同一流量ではナトリウムの D_P は水のその約0.8倍程度であり, 粒径に対するナトリウムとの差異は比較的小さいことが予想される。

又, (6.1)式に含まれる物性値のうち表面張力が影響因子として大きく, これに関係する無次元数として次のウェーバ数 We がひとつの支配

因子になることが言われている。

$$We = \gamma u^2 d_0 / \sigma g \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

ここに γ ; 流体の比重量 (kg/m³)
 u ; ノズル先端のオリフィス部での平均流速 (m/sec)
 g ; 重力加速度 (m/sec²)

本試験で用いたノズルに対し、ウェーバ数と平均粒径との関係を Fig 6.1 に示す。又、同図に T A S P 実験シリーズでのウェーバ数範囲も併せて示す。水試験とナトリウム試験のウェーバ数範囲が極端に逸脱し合うものでないことと、測定範囲ではほぼ一定の平均粒径であることをかんがみれば、水試験で得られた平均粒径等をそのままナトリウムに適用しても充分良い近似であると考えられる。

なお、ナトリウムについて粒径分布を測定した例は文献(10)に示されているが、遠心型加圧スプレノズルを用いたこの実験の結果も、水とナトリウムのウェーバ数が大きく逸脱しない限り、粒径分布は両者ではほぼ一致することを示している。

以上、粒径については水で得られたデータをそのままナトリウムに採用して充分良い近似を与えるとの推定を示したが、スプレの拡がり角についても 5.1.1 節(7)項で示したように受皿への分散が水とナトリウムではほぼ相似であったことから、水のデータをナトリウムに流用しても問題はないと考える。

なお、以降の試計算等の例では測定値のうち目標噴出圧力に近い所でのデータとして次の平均径を採用のこととする。

Bノズル ; 平均質量径 = 0.8 mm , 平均表面積径 = 0.7 mm

Dノズル ; 平均質量径 = 1.5 mm , 平均表面積径 = 1.3 mm

6.1.2 ナトリウム液滴燃焼のパラメータサーバイ

(1) 基礎式の導出

ナトリウムスプレ燃焼解析については A I 社の S P R A Y コード⁽³⁾ が良く知られているが、このコードでも熱、物質伝達の部分は従来からの油滴燃焼解析に用いられてきた次の Ranz - Marshall の式を用いている。

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \dots\dots\dots (6.3)$$

$$Sh = 2 + 0.6 Re^{1/2} Sc^{1/3} \dots\dots\dots (6.4)$$

ここに	Nu	;	マッセルト数 ($= \frac{\alpha d}{\lambda}$)	(-)
	Re	;	レイノルズ数 ($= \frac{u d}{\nu}$)	(-)
	Pr	;	プラントル数	(-)
	Sh	;	シャーウッド数 ($= \frac{k d}{D}$)	(-)
	Sc	;	シュミット数 ($= \frac{\nu}{D}$)	(-)
	α	;	液滴周囲熱伝達率	(kcal/m ² h ² C)
	d	;	液滴径	(m)
	u	;	液滴の相対落下速度	(m/h)
	k	;	物質移動係数	(m/h)
	D	;	拡散定数	(m ² /h)
	ν	;	ガスの動粘度	(m ² /h)
	λ	;	ガスの熱伝導率	(kcal/mh ² C)

本パラメータサーバイでの解析では、その基礎式の中で、多成分系 Fick の式を立てる際に、輸送項 (下式右辺の $Y_i (N_o + N_N + N_N)$ に対応) に全成分のモル流束を入れるように配慮したものとしている。特に湿分の量が酸素の量と比べ無視し得ない程多い場合には、この部分を簡単化しないで取扱うことが重要であり、基礎式をこのように厳密な形に立てた。なお、この基礎式については文献 (11) に詳述されている。

(a) 火炎内面の Fick の式

$$N_{Na} = Y_{Na} (N_{Na} + N_N) - CD_{Na} \frac{dY_{Na}}{dr} \dots\dots\dots (6.5)$$

(b) 火炎外面の Fick の式

$$N_i = Y_i (N_O + N_H + N_N) - \frac{Sh_i}{2} CD_i \frac{dY_i}{dr} \dots\dots\dots (6.6)$$

(i = H, O)

ここに N ; モル流束 (kmol/m²h)
 Y ; モル濃度 (-)
 C ; ガスのモル密度 (kmol/m³)
 r ; 半径方向長さ (m)

添字 ; Na, O, H, N: ナトリウム, 酸素, 湿分, 窒素

(c) 質量保存側

各成分の保存則より次式が成立つ。

$$\frac{d}{dr} (r^2 N_i) = 0 \dots\dots\dots (6.7)$$

(i = Na, H, O)

(d) 境界条件

$$\begin{aligned} r = r_A & ; N_N = 0 \\ r = r_B & ; N_i = 0 \end{aligned} \dots\dots\dots (6.8)$$

ここに r_A ; Na 液滴半径 (m), r_B ; 火炎半径 (m)

(e) 火炎内面の解

以上各式より火炎内面の N_{Na} を解くと次の通り。

$$N_{Na} = CD_{Na} \frac{1/r^2}{1/r_A - 1/r_B} \ell_n \frac{P}{P - P_{Na,A}} \dots\dots\dots (6.9)$$

ここに P ; 系統全圧 (kg/m²)
 $P_{Na,A}$; $r = r_A$ でのナトリウム蒸気分圧 (kg/m²)

ナトリウム蒸気のもル流 W_{Na} (kmol/h) は次のように表わせる。

$$W_{Na} = 4\pi r_A^2 N_{Na,A} = \frac{4\pi r_A \cdot r_B}{r_B - r_A} CD_{Na} \ell_n \frac{P}{P - P_{Na,A}} \dots (6.10)$$

なお, $P_{Na,A}$ はナトリウムの飽和蒸気圧 P_{sat} に対し次の関係がある。

$$P_{Na,A} = P_{sat} \quad \dots\dots\dots (6.11)$$

前記SPRAYコードでは $P_{Na,A}$ は P_{sat} よりも若干低い圧力になるような補正も行なっているが、ここでは(6.11)式を用いる。

(f) 火炎外面の解；

以上の各式より火炎外面について酸素および湿分のモル流

W_O (kmol/h), W_H (kmol/h) は次のように表わされる。

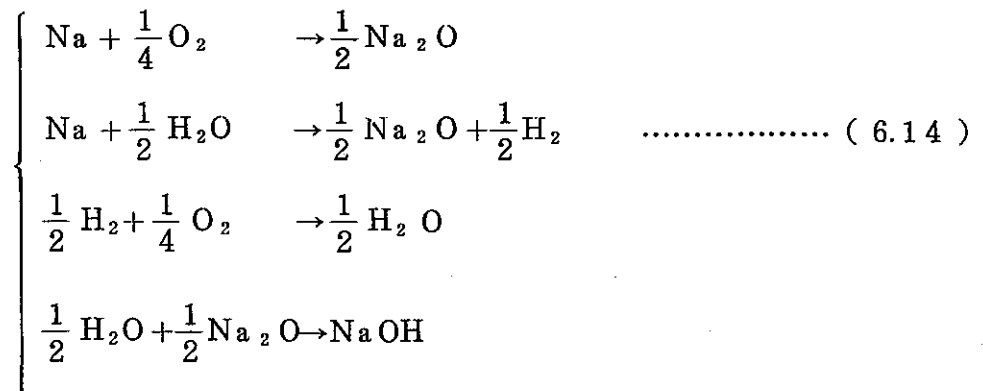
$$W_i = -4\pi C_i \quad (i = O, H) \quad \dots\dots\dots (6.12)$$

$$C_i = \frac{Y_{i,c}(C_H + C_O)}{1 - \exp\left\{\frac{C_H + C_O}{\frac{Sh}{2} CD_i r_B}\right\}} \quad \dots\dots\dots (6.13)$$

ここに $Y_{i,c}$: 無限遠でのモル濃度 (—)

(g) 反応モル比；

本検討では次の反応を仮定する。

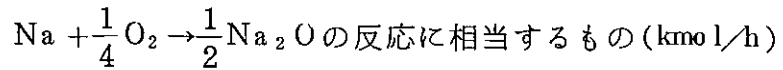


上記反応を仮定したのは5.1.2節で述べたようにナトリウム酸化物エアロゾルによる吸水反応が予想されたためである。

さて、上記反応を仮定すると各成分のモル流については次の各関係が成立する。

$$\left\{ \begin{array}{l} W_O = (W_O)_1 + (W_O)_2 = -4\pi C_O \\ (W_{Na})_O = 4(W_O)_1 \quad \dots\dots\dots (6.15) \\ (W_{Na})_H = 2W_H = -8\pi C_H \\ (W_O)_2 = \frac{1}{2} W_H = -2\pi C_H \end{array} \right.$$

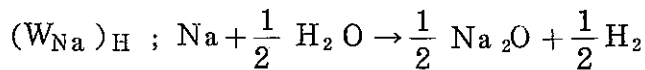
ここに $(W_O)_1$; 酸素モル流のうち



$(W_O)_2$; 酸素モル流のうち



$(W_{\text{Na}})_O$; $\text{Na} + \frac{1}{4} \text{O}_2 \rightarrow \frac{1}{2} \text{Na}_2\text{O}$ の反応に使われる Na のモル流 (kmo l/h)



の反応に使われる Na のモル流 (kmo l/h)

(6.15) 式の最後の式については (6.14) の 2 項目の式より発生 H_2 と反応する O_2 のモル数が Na と反応する H_2O のモル数 $\frac{1}{2}$ になっていることを意味している。

Na の全モル流 W_{Na} は (6.15) 式より次のようになる。

$$\begin{aligned} W_{\text{Na}} &= (W_{\text{Na}})_O + (W_{\text{Na}})_H \\ &= 4 (W_O)_1 + 2 W_H \\ &= 4 (W_O - (W_O)_2) + 2 W_H \\ &= 4 (W_O - \frac{1}{2} W_H) + 2 W_H \\ &= 4 W_O \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6.16)$$

因みに $\text{Na} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \frac{1}{2} \text{Na}_2\text{O}_2$ 反応となるときには W_{Na} は次のようになる。

$$W_{\text{Na}} = 2 W_O + W_H \quad \dots\dots\dots (6.16)'$$

(h) 火炎半径 r_B ;

(6.16) 式の場合、火炎半径 r_B は次のように表わされる。

$$\frac{1}{r_B} = \frac{1}{r_A} + \frac{CD_{\text{Na}} \ell_n \left\{ \frac{P}{P - P_{\text{Na},A}} \right\}}{4 C_o} \quad \dots\dots\dots (6.17)$$

以上の各基礎式を連立させると W_{Na} , W_O , W_H , r_B 等を求めることができる。

(2) パラメータサーベイ

上記より W_{Na} を求め、これよりナトリウム液滴の燃焼率を求める。

なお、本検討では次の条件は一定値とした。

- ・ナトリウム温度 = 530°C
- ・周囲ガス温度 = 30°C
- ・系統内圧力 = 760 mmHg

(a) 液滴落下速度の影響 ; Fig 6.2(1)参照

Fig 6.2(1) に計算結果をまとめて示す。落下速度の影響は極めて大きく、高落下速度ほど燃焼率が高い。しかし、実際のケースでは仮に初速度が大きいと、床面に早く到達し、滞留時間が短くなるため空間ガスへの影響は単純ではない。但し、室の高さが充分高い場合には終末速度に至るので、初速の影響は小さくなる。

本TASP実験の場合には落下初速度範囲は6~17 m/secで、空高さは約3 mである。Bノズルの平均質量粒径0.8 mm、およびDノズルの平均質量粒径1.5 mmに対しては次のような終末速度となる。又、初速度=0のときに3 mの落下点では次の速度となる。なお、ガスは静止しているものと仮定した。

- ・ Bノズル :
 - ・ 終末速度 = 15.8 m/sec
 - ・ 初速 = 0 のとき, 3 m 落下点での速度 = 6.5 m/sec
- ・ Dノズル :
 - ・ 終末速度 = 55.4 m/sec
 - ・ 初速 = 0 のとき, 3 m 落下点での速度 = 7.3 m/sec

上記の例から分るように本実験での室高さ3 mは終末速度に至る程には高くない。

しかし6.1.4.1節で後述するようにこの系ではガスピーク圧力に初速度は余り影響しないとの結果となっており、みかけ上は初速度の影響は小さいことが示されている。

(b) 液滴径の影響 ; Fig 6.2(1)参照

言うまでもなく、液滴径の影響は非常に大きい。しかし、液滴径

が大きくなるに従い燃焼率の径に対する低下割合はなまってくる。即ち、小粒径のもの程、わずかの径のちがいが燃焼率に大きく影響する。

(c) 酸素濃度の影響 ; Fig 6.2 (2)参照

酸素濃度が大である程、燃焼率は大であり、酸素濃度にはほぼ正比例している。

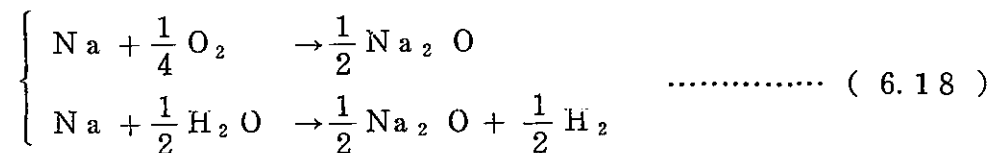
(d) 湿分濃度の影響 ; Fig 6.3 (1), (2)参照

(6.14) 式で示したような反応を仮定すると、ナトリウム液滴へ拡散してきた酸素 W_O がすべてナトリウムとの反応に費されるのではなく、一部の $(W_O)_2$ は Na と H_2O の反応により生成する H_2 との結合反応に費される。

この $(W_O)_2$ は Na との反応に必要な水分のモル流 W_H の $\frac{1}{2}$ になっている。高湿分の場合には Na と H_2O の反応が加わるため、ナトリウム燃焼率が酸素のみの場合よりもかなり大きくなるように思われがちであるが、上記の関係より判るように拡散酸素がすべて Na と反応しないようになる為、実際には Na 燃焼率はさほど大きくならない。

(6.14) の反応式の場合の結果を Fig 6.3 (1) に示す。図より、かなり高湿分濃度下でも燃焼率はさほど大きくないことが分る。

一方、発生 H_2 の酸素との結合を考えない反応モデルでの例は文献(1)に示されている。すなわち次の反応式による場合を扱っている。



結果を Fig 6.3 (2) に示す。この反応を仮定した場合、高湿分濃度のときに Na 燃焼率はかなり大きくなるが、この傾向は低酸素濃度条件下の方が顕著であるが、高酸素濃度条件では、燃焼率に与

える湿分濃度の影響は大変小さいことを示している。

以上のことより、高酸素濃度条件下では反応式モデルにかかわらず湿分はNa 燃焼率に余り大きな影響を与えず、又、低酸素濃度条件下では H_2 の O_2 との結合やエアロゾルの吸湿をベースとしたモデルの場合、やはり湿分はNa 燃焼率にほとんど影響しないことが推察される。

又、言うまでもないが、概してスプレ燃焼時の燃焼率はプール燃焼時のそれを比べかなり大きなものとなる。

6.1.3 実験データ解析モデルの概要

前節で示した燃焼に対する基礎モデルに加え液滴運動や既存のプール燃焼モデル等に加え，実験データとモデルとの照合を行なう。本節でこのデータ解析モデルの概要を示す。

(1) モデルの特徴：

本モデルは燃焼，熱伝達に関しては6.1.2節で示した基礎式を又，液滴モーション，自然対流についての基礎式はA I社のSPRAYコード⁽²⁾に採用されているものを用い，さらにプール燃焼についてはSOFIRE-IIコード⁽¹⁾の基礎式を用いたものである。以下に主な特徴を示す。

- (a) 本実験体系に適したよう受皿にナトリウムが貯まるモデルとしており，プール燃焼とスプレ燃焼の混合取扱いが可能である。
- (b) データ解析用としてパラメータサーベイができるよう種々の配慮を行なっている。例えば液滴平均径の定義による差量のサーベイ，反応式，燃焼基礎式等のサーベイを行なえるようになっている。
- (c) スプレ噴出開始，終了の過渡状態をモデルに入れている。すなわち時間=0でいきなり空間全域にスプレが拡がるモデルとはしていない。セル高さの大きいときには有効である。

(2) 計算の仮定，条件

次の仮定を置いた。

- (a) 単一液滴径モデルとし，球形であるとする。但し，液滴モーションの平均粒径と燃焼熱伝達に関する平均粒径とを別個に入力条件として与えられるようにする。
- (b) 液滴の運動についてはStokesの式等に従うとする。但し初速度を任意に与えられるようにする。
- (c) 液滴周囲の熱，物質移動については6.1.2節に示した基礎式に従うとする。
- (d) ガスの自然対流モデルはSPRAYコードのものを用いることとする。

- (e) ナトリウムプール表面の熱，物質伝達については S O F I R E - II のモデルに従うものとする。
- (f) 床面には受皿を有する構造とする。
- (g) 反応式は基本的には 6.1.2 節で示したものとする。但し，インプットにより自由に選択できるようにする。
- (h) その他系の熱伝達経路は Fig 6.4 に示すものを考慮する。
又，壁面の熱伝達率はスプレ噴射時には S P R A Y コードに用いられているものを，スプレ完了後には S O F I R E - II に用いられているものを用いる。

(3) 計算方法

Fig 6.3 に示す熱，物質伝達および液滴，ガスのモーションに対し Explicit な時間差分により，各タイムステップでは準定常状態を仮定し解く。

計算の概略流れ線図を Table 6.2 に示す。

6.1.4 実験データと解析との比較検討

前節で述べたデータを用い，得られた実験データのうち代表的なものと比較検討する。

6.1.4.1 T A S P - N 5 データとの比較

T A S P - N 5 では高温タンク圧力を可変とし，極力噴出流量を一定にした実験ケースである。スプレノズルは D ノズルであり平均粒径は 4 章にて示した通りである。

解析は次の 3 ケースを実施した。なお反応式は Na_2O 生成反応としている。

(ケース 1) (1) 燃焼モデル； 6.1.2 節で示したモデル

(2) 粒径；液滴運動には平均質量粒径 (1.5 mm)
；熱，物質伝達には平均表面積粒径 (1.3 mm)
を用いる。

(3) 落下初速度；ノズルオリフィス径より計算される初速度を用いる。(約 6 m / s c e)

- ケース 2 (参考ケース)
- (1) 燃焼モデル ; ケース 1 と同じ
 - (2) 粒 径 ; ケース 1 と同じ
 - (3) 落下初速度 ; 参考ケースとして 0 m/sec とする。

- ケース 3 (参考ケース)
- (1) 燃焼モデル ; ケース 1 と同じ
 - (2) 粒 径 ; 液滴運動, 熱物質伝達とも面積平均粒径 (約 2.5 mm) を用いる。
 - (3) 初 速 度 ; ケース 1 と同じ

以上の各ケースの計算結果と実験データとの比較をガス圧力に対し Fig 6.5 に示す。次のことがみとめられる。

- (1) ガス圧力に対してはケース 1 がもっともデータに良く一致する。
- (2) 参考ケースとして実施したケース 2 のガス圧力は思いのほかケース 1 の結果に近い。これについては 6.1.3 でもふれたように流速の小さいものは熱物質伝達率が小さい反面, ガス空間への滞留時間が長くなるため相殺し合うためであろう。
- (3) 参考ケースとして実施したケース 3 のように大きな粒径をインプットすると予想されるようにガス圧力はかなり小さくなる。液滴径に対し大変敏感であることを如実に示している。

6.1.4.2 TASP-N₂ データとの比較

TASP-N₂ は低酸素濃度下で B ノズルを用いた実験である。なお, 噴出流量が時間とともに変っているので, これを考慮したインプットとした。しかし初速度は一定値しか現在の所取扱えないので, 平均流速をインプットした。初速度による差異は比較的小さなものであることは前に述べた所である。

解析は次のものとした。

- (1) 燃焼モデル ; 6.1.2 節で示したモデル
- (2) 粒 径 ; 液滴運動には平均質量径 (0.8 mm) を, 熱物質伝達には平均表面積径 (0.7 mm) を用いる。
- (3) 初 速 度 ; 11.6 m/sec

ガス圧力に対し計算値と実験値の比較を Fig 6.6 に示す。

次のことがみとめられる。

○ 圧力の立上りおよび圧力ピーク値とも比較的良く一致している。圧力ピークと言ってもほぼ定常圧力とみなしうるような圧力パターンである。立上り時は壁への放熱は余り効かないが、定常時は放熱とのバランスにより圧力が決るのでガスからライナ壁への放熱に対する熱伝達率の評価が大きく影響する。この例では放熱の評価が妥当であることを示している。

なお、本例の場合でナトリウムプールの燃焼率計算値はスプレの燃焼率より約2桁小さく、本実験体系ではガス圧力に与えるプールの燃焼効果は思いのほか小さい。

6.1.4.3 TASP-A2 データとの比較

TASP-A2 は空気雰囲気にて B ノズルを用いた実験である。流量や初速度の与え方は 6.1.4.2 節のものと同じである。なお、反応は Na_2O 生成反応が生じると仮定した。

計算は次のケースに対して行なった。

- (1) 燃焼モデル ; 6.1.2 節で示したモデル
- (2) 粒 径 ; 6.1.4.2 のケースと同じ
- (3) 初 速 度 ; 8.3 m/sec

ガス圧力に対し計算値と実験値の比較を Fig 6.7 に示す。

又、ケース1については噴出15秒後の温度分布につき Fig 6.8 に示す。これらの図より次のことが言える。

- (1) ガス圧力の立上りおよび最大圧力値に対しても大変良い一致を示す。しかし実験データは最大値になってからはスプレ噴射完了まではほぼ一定の圧力を示すのに対し、計算値の方はかなり降下してしまう。やはりライナ壁への放熱の評価が重要な因子と思われる。
- (2) 温度分布の比較では火炎温度で $1000 \sim 1200^\circ\text{C}$ と計算され、実測データがナトリウム温度と火炎温度の平均的なものを指示していることをかんがみればオーダ的に充分良い一致を示していると考えられる。

なお、本解析モデルではナトリウム温度が余り上昇していないときは火炎長さが極めて短かく、この場合反応熱は一旦ナトリウム液滴の温度上昇に費され、そして液滴から周囲ガスへ顕熱として放出される。しかしNa温度が上昇してきて火炎の長さが発達してくると反応熱は火炎から周囲ガスへ放熱されるものと火炎からNa液滴へ熱伝達が起こりNaの温度上昇に費されるものの二者に分割される。本モデル計算ではこの二者の伝熱量はほぼ同じ程度となった。すなわち反応熱のうち約半分が周囲ガスへ顕熱として放出される結果となったことを付言する。

6.1.5 スプレ発火条件について

6.1.2節では物質移動にのみ着目し単一液滴の燃焼率についてパラメータサーベイを行なった。実際の現象ではこれに液滴のモーションや熱伝達が絡む。A Iでは単一落下液滴の発火条件を調べる実験が成されている。(cf Fig 3.2)前述の解析モデルを用い、このA Iの実験に対応するインプットを代入し、発火条件を調べることにした。類似のことは文献(4)でも実施されているが、この文献では反応熱がすべて液滴に吸収されること、落下液滴は周囲ガスに対して断熱であるとの仮定により簡単化しているため、発火温度はナトリウムの沸点に一致すると結論付けている。しかしながら、液滴から周囲ガスへの顕熱移動を無視するのはかなりの誤差と考えられ、実際の発火温度は沸点よりもかなり低くなるものと思われ、本節で検討した。

A Iの代表実験ケースに対し落下方向の温度分布、当然これが温度経時変化に対応するが、これをFig 6.9に示す。A Iの実験では発火した高さが各ケースに対し測定されており、完全発火開始時のナトリウム温度はおおよそ600℃位になっていることが分る。

なお、文献(4)によるとナトリウムプール燃焼の場合も600℃を越えると表面の酸化物がない状態でいわゆる蒸気相燃焼になることを実験により示している。すなわち600℃の温度でも発火条件になっているこ

とを意味している。もっともプール燃焼の場合は表面酸化物クラストが液中に沈む効果が絡んでいることが言われているが、落下液滴の場合どのようなプロセスにより酸化物が除去されるかは詳しくは分っていない。

6.2 気体成分濃度変化についての検討

本実験シリーズでは湿分濃度を変化させた実験を中心に行なっているが、これは水素ガスの発生の有無についての確認データを得るための実験である。この点について若干の検討を行なう。

(1) 問題の背景

ナトリウム燃焼時の水素の発生に関する極端な実験の例として米国 HEDL で行なわれた F-1 実験⁽⁴⁾での気体濃度の変化を Fig 6.10 に示す。

本実験はコンクリート受皿中でナトリウムがプール燃焼を起こしている場合の実験で、ナトリウムとコンクリートの反応により水素が多く発生する実験である。しかし比較的高い濃度の酸素がガス中にあれば水素が発生しても酸素と再結合するらしく、ガス中の水素濃度は上昇してこない。しかし、酸素が消費し尽されると水素ガスが発生し出すことが判る。すなわち「ナトリウムプール燃焼では酸素が含有される限り水素はガス中に放出されない。」との事実を示している。一方スプレ燃焼ではこのようなことが実験的に証明されていないし、ガス中に含まれる湿分に対してもプール燃焼と比べ格段にナトリウムが接触し易い形態であるので水素ガス発生について次のような知見を得ることが必要である。

- (a) ナトリウムスプレ燃焼でも比較的高濃度の酸素が含有される限り水素ガスは発生しないことの実証。
- (b) 低酸素濃度下で初期湿分濃度が含有されるとき、スプレ燃焼の発生によりどの程度の水素が発生するかの実験知見。
- (c) 酸素がない状態では初期湿分とナトリウムとの反応でどの程度の水素が発生するかの実験知見。

本実験シリーズは上記の各点に着目した実験となっている。

(2) 実験結果の検討

前記各点について実験結果から言えることを以下に示す。

(a) 比較的高酸素濃度下のナトリウムスプレ燃焼での H_2 発生；

T A S P - A 1 実験により初期が空気雰囲気るときには、相当高湿分濃度下でも水素は発生しない。

(b) 低酸素濃度下のナトリウムスプレ燃焼での H_2 発生；

T A S P - N 3 で見られたように実機一次系で想定される最大湿分濃度下（約 15,000 ppm）でも化学量論的に予測される水素発生量よりも 1 桁程度少ない。

さらに高い湿分にしていくと化学量論的に予測される水素発生量に近づいていくことは T A S P - N 4 実験の示す所である。

(c) 酸素のない条件下のナトリウムスプレ燃焼での H_2 発生；

T A S P - N 1 実験が示したよう化学量論的に予測される水素が発生する。

(d) 初期湿分濃度が大である程、又、初期酸素濃度が小である程、 H_2 ガスが発生し易い。本 T A S P 実験の範囲では Fig 6.11 に示すように初期湿分濃度と酸素濃度の比が 0.1 のオーダー以上になると H_2 が発生している。

5.1 節で述べたように上記結果になる大きな要因としては Na_2O エアロゾル又は Na_2O_2 エアロゾルが湿分を吸収し、 $NaOH$ に変わることが考えられる。このことについては酸化 Na と水分との反応に対する平衡 H_2O 分圧を算出すると Fig 6.12 のようになり平衡論的には、ごくわずかの湿分濃度（500°C では 0.01 ppm オーダー）でも反応が生じ得る。反応速度については反応過程中の化学組成変化等の複雑な様相も絡むが、一般的には極めて反応速度は速いとの報告がある。⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾ 以上より、酸素とナトリウムの反応により発生したエアロゾルがガス中の湿分を速やかに吸収することはかなり可能性の高いことが窺える。

6.3 ナトリウムエアロゾル挙動についての検討

エアロゾルに関し得られたデータについて若干の検討を行なう。

6.3.1 エアロゾル最大濃度

スプレ燃焼時およびその後につづくプール燃焼によりガス空間に放出されたエアロゾルは究極的には床に沈降したり、壁や天井に付着するのでこれら沈降、付着量の総和からエアロゾル放出量を推定することができる。又、エアロゾルがすべて酸化物になると仮定すると実際に反応しうるナトリウム量を化学量論的に求めうる。今、エアロゾルの放出割合を次のように定義する。

$$\text{エアロゾルの放出割合} = \frac{\text{エアロゾルとなって空間へ放出されるナトリウム量}}{\text{化学量論的に求まる反応ナトリウム量}} \quad \dots\dots\dots (6.19)$$

以上のエアロゾル最大濃度およびエアロゾル放出割合を求めたものを Table 6.3 にまとめて示す。

又、以前に実施したプール燃焼実験で得られたデータ⁽²⁾も同表に併せて示す。但しプール燃焼実験では床への沈降量の測定データによっている。

なお、エアロゾルの放出割合は Na_2O 生成反応と Na_2O_2 生成反応の両者による場合をそれぞれ計算し、それを範囲で表現している。同表よりみとめられることは次の通りである。

- (1) TASP-A2 のように比較的漏洩時間の長い実験ではエアロゾル濃度はもっとも高く、可能最大濃度は 163g-Na/m^3 である。
- (2) エアロゾルの放出割合は漏洩時間の短かいものを除けば 20~40% となりプール燃焼の場合よりもかなり大きい。

6.3.2 エアロゾルの床への沈降と粒径の関係

Fig 5.10 にエアロゾルの床への沈降率の時間推移を示したが、沈降率は時間とともに急激に減少し、おおよそ次の式で表わせる。

$$W \propto t^{-2.61} \dots\dots\dots (6.20)$$

ここに

W ; 沈 降 率 (kg-N a / m² h)

t ; 時 間 (h)

一方、沈降に対するストークスの法則より 1 ~ 10 μm オーダの粒子の落下速度、 V_t は次のようになる。

$$V_t \propto dp^2 \dots\dots\dots (6.21)$$

ここに

V_t ; 落下終末速度 (m / h)

dp ; エアロゾル粒子径 (m)

セルの高さを h とすると床までに粒子が到達する時間 t_f は次の通り。

$$t_f = \frac{h}{V_t} \dots\dots\dots (6.22)$$

エアロゾル粒子 1 ケの重量 W は dp^3 に比例するので床への沈降率 W は次の関係となる。

$$W = \frac{W}{t_f} \propto dp^5 \dots\dots\dots (6.23)$$

粒径分布をもつ各粒子にこれが適用できると考えると、沈降率の時間推移データより粒径の時間推移傾向を類推することができる。

(6.20), (6.23) 式より粒径の時間推移を求めると次の通り

$$dp = C_0 t^{-\frac{2.61}{5}} = C_0 t^{-0.52} \dots\dots\dots (6.24)$$

Fig 5.16 にカスケードインパクトによって求めた重量平均粒径の時間推移を示すがおおむね (6.24) 式に傾向が一致しており、エアロゾルの沈降と粒径の時間推移に密接な関係のあることが改めて確認された。

6.3.3 エアロゾルの付着速度について

エアロック式付着量測定装置により得た付着率 $\dot{\omega}_d$ のデータより次の式によりいわゆるエアロゾルの物質移動係数 k を求めうる。

$$k = \dot{\omega}_d / C \quad \dots\dots\dots (6.25)$$

ここに

- k ; 物質移動係数 (m / h)
- $\dot{\omega}_d$; エアロゾル付着率 (kg-Na / m²h)
- C ; エアロゾル濃度 (kg-Na / m³)

代表的な実験ケースについて k を求めるとおおよそ次の程度である。

- T A S P - N 2 0.5 時間後にて $k = 0.067 \text{ m/h}$
- T A S P - N 3 " $k = 0.046 \text{ m/h}$
- T A S P - N 4 " $k = 0.011 \text{ m/h}$

粒径が判っているのでBrownian Diffusion を仮定し、 k を求めると 10^{-5} m/h のオーダーとなり桁ちがいに小さい。

熱泳動によるエアロゾルの付着速度は、概略次式で求められる。⁽¹⁷⁾

$$K_t \doteq \frac{3\nu}{2T} \cdot \frac{2\lambda_g}{2\lambda_g + \lambda_p} \cdot \frac{dT}{dx} \quad \dots\dots\dots (6.26)$$

ここで

- K_t : 熱泳動による付着速度 (m / h)
- T : 温 度 (°K)
- dT/dx : 壁部での温度勾配 (°C / m)
- ν : ガス動粘性係数 (m² / h)
- λ_g : ガスの熱伝導率 (kcal / mh°C)
- λ_p : エアロゾルの熱伝導率 (= 0.65 kcal / mh°C)

ガス温度 100°C (= 373 K), 壁温 50°C の場合について概略値を求める。試験セル内は自然対流であり壁面への熱伝達率を $5 \text{ kcal / m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 程度とすると、境界層での温度勾配 $dT/dx = 9300^\circ\text{C / m}$ 程度となる。

各物性値を(6.26)式に入れて K_t を計算すると

$$K_t = \frac{3 \times 0.0857}{2 \times 373} \times \frac{2 \times 0.0269}{2 \times 0.0269 + 0.65} \times 9300 = 0.0245 \text{ (m/h)}$$

..... (6.27)

となる。この結果は実験値(0.0114 ~ 0.0667)とオーダ的に一致しており、壁への付着の主要因は熱泳動によるものと考えられる。

7. 結 論

平均質量径 1 mm 級, 530°C のナトリウムスプレを 3 m 高さ容器天井のフルコーンスプレノズルより噴射させる実験研究を行なった。本実験研究より得られた結論をまとめると以下の通りである。

- (1) ナトリウムスプレ燃焼時の温度, 圧力応答および燃焼については次の実験知見が得られた。
 - (a) 温度, 圧力応答に対する雰囲気ガス条件の影響については, 実験範囲では湿分濃度は余り効かず, 初期酸素濃度が支配的因子であることが判明した。
 - (b) 空気雰囲気では本実験容器でも激しい発火を伴うことが確認された。発火時のスプレゾーン中の熱電対は最高 1200°C を指示した。
- (2) Ranz-Marshall の式をベースとしたデータ解析モデルによる検討で次の結果が得られた。
 - (a) 低酸素濃度下での実験との比較ではガス圧力応答計算値は実験データに極めて良い一致を示す。
 - (b) 空気雰囲気実験との比較では圧力立上り部で計算値と実験データは良い一致を見せるが, 準定常圧力の挙動がやや異なる。しかし今後, 壁面への放熱評価精度を上げれば良い一致に至ることが予想される。
 - (c) 米国 AI 社で行なわれた単一落下液滴実験との比較から液滴の発火温度は約 600°C 位であることが推察された。
- (3) 初期雰囲気ガス中の湿分濃度がナトリウムスプレ燃焼時の水素ガス発生にどのような影響を及ぼすかを実験的に確認した所, 次の結果となった。
 - (a) 酸素濃度が零のときには化学量論的に予想される可能最大水素濃度とほぼ一致する水素が発生した。
 - (b) 一次系雰囲気に対応する酸素濃度 (2~3%) では化学量論的に予想される可能最大水素濃度よりもかなり低い水素濃度となった。これには, 発生したエアロゾルの湿分吸収がおおいに関係していると考えられる。
 - (c) 空気雰囲気の実験では比較的高湿分濃度下でも水素の発生は見られなかった。

- (4) スプレ燃焼時のナトリウムエアロゾル挙動について種々の有効な測定が成された。要点は以下の通りである。
- (a) 濃度減衰特性に対する定量的データを得た。容器高さが低いため、初期1時間以内での減衰率が極めて大きい。今後、エアロゾル解析コード検証等への応用が期待される。
 - (b) スプレ燃焼時の発生エアロゾル粒径に対する実験データを得た。今回実施の条件下では平均粒径の経時変化等に各実験ケース間で大きな差異は見られなかった。平均質量径は1～4 μm の範囲にあった。
 - (c) エアロゾルの沈降に対する定量的データを取得した。空気雰囲気中実験と低酸素濃度雰囲気実験では前者の方が沈降量はかなり多いことが実験的に示された。
 - (d) エアロゾルの壁面への付着特性に対する定量的データを得た。高湿分雰囲気時の方が壁への付着量が小さいことや、付着の主原因が熱泳動によるものであること等が実験的に示された。
 - (e) エアロゾルの沈降、付着データよりエアロゾルの最大濃度、エアロゾル放出割合を推定すると空气中スプレ燃焼実験では163 g/m^3 の濃度、20～40%の大きな値となった。又、以前に同一試験容器を開いて行なったナトリウムプール燃焼実験と比べエアロゾル最大濃度、エアロゾル放出割合は全般にスプレ燃焼時の方が大きいことが示された。
- (5) その他、次の諸知見を得た。
- (a) スプレ燃焼前後のセルのリークレートに対する参考データを得た。
 - (b) 本スプレ燃焼実験を通じ、コンクリートライナセルの試験装置に何らの異常はみとめられず、過酷なナトリウムスプレ燃焼条件下でも容器の健全性に問題ないことのひとつの実績を得た。
- 得られた結果は原型炉“もんじゅ”の検討に有効に応用されることが期待されるが、更に万全を期する為には、本R & Dをベースとし、今後、さらに大型セルでのナトリウムスプレ燃焼実験データを取得していくことが望ましい。

8. あ と が き

ナトリウムスプレ燃焼については我国では適当な規模での実験データがなかったため、解析コードの検証や、ナトリウムスプレ燃焼に付随する問題点の把握にバックグラウンドのはっきりした情報が不足していた。21 m³ のナトリウム燃焼試験容器にてスプレ燃焼実験を行なった結果、系統の温度、圧力のみならず、高湿分雰囲気下の水素ガス発生やナトリウムエアロゾルに関する種々の有効なデータが得られたと考えられる。温度、圧力データの詳細は本報告書の第2分冊にまとめられているので、今後、解析コードのベンチマーク等に有効に活用されることが期待される。

終りに本試験の遂行にあたっては動力炉・核燃料開発事業団高速増殖炉開発本部の関係各位に多大の御助言、御尽力を賜った。

特にプラント安全グループ宮原信哉殿には計画時の予備計算の実施、又、実験実施途上での評価計算の実施を通じ、本研究に常に適切かつ有益な御助言を頂いた。ここに記して深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) P. Beiriger et al. ; "SOFIRE-II User Report", AI. AEC-13055
(1973)
- (2) 八木, 長沼 ; 「一次収納構造健全性試験」, SJ222 77-08 (1977),
「 " (II) 」, SJ222 78-01 (1978)
- (3) P.R.Shire ; "SPRAY Code User's Report", HEDL-TME 76-94 (1977)
- (4) 佐川他 ; 「密閉容器内におけるナトリウム燃焼実験」, SJ202 76-06
(1976)
- (5) H.A. Morewitz et al. ; "Experiments on Sodium Fire and Their
Aerosols", Nuclear Eng. and Design, Vol 42 (1977)
- (6) 木谷他 ; 「ナトリウムエアロゾルの挙動に関する研究」, JAERI-4136
(1970)
- (7) J. Wegrazyn et al. ; NUREG/CR-099 (1979)
- (8) A.R. Sundararajan et al. ; "Effect of Relative Humidity on
Growth of Sodium Oxide Aerosols", J. of Nuclear
Sci. and Tech., Vol 19 (1982)
- (9) 化学工学便覧(改訂第三版), 丸善 (1968)
- (10) 佐川他 ; 「密閉容器内におけるナトリウム燃焼実験(2)」 SJ202 77-10
(1977)
- (11) S.S. Tsai et al. ; "The Effect of Humidity on The Burning Rate
of Sodium Droplet", Trans, of The ANS, Vol.26
(1977)
- (12) S.S. Tsai ; "Surface Oxidation Process Prior to Ignition of
a Sodium Droplet", Trans. of The ANS, Vol.27(1977)
- (13) R.N. Newman ; "The Role of Carbon Dioxide in the Combustion of
Sodium in Air", Proceedings of LMFBR Safety Meet-
ing Lyon (1982)
- (14) R.K. Hillard ; "Summary of HEDL Sodium Fire Tests", IAEA/IWGFR
Specialists' Meeting, Cadarache (1978)
- (15) W.S. Clough ; "The Behavior in the Atmosphere of the Aerosol
from a Sodium Fire", J. of Nuclear Energy, Vol.25
(1970)
- (16) S. Jordan ; "Experimental Result on Sodium Aerosol Transfor-
mation and Filtration", PNC SD082 81-02 (1982)
- (17) 高橋幹二 ; 基礎エアロゾル工学(第1版), 養賢堂(1972)

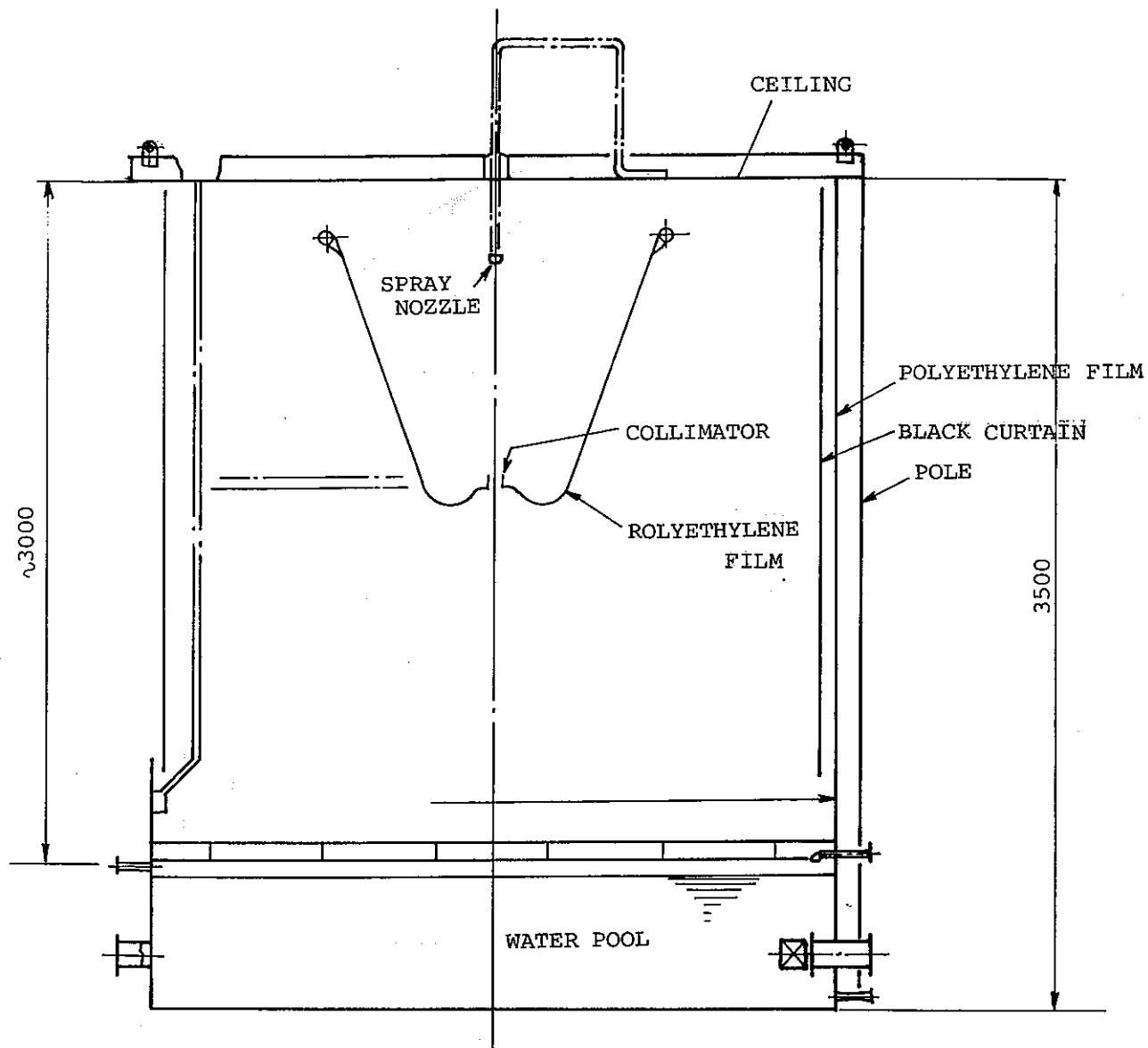


Fig.3.1 Equipment for Water Simulation Test

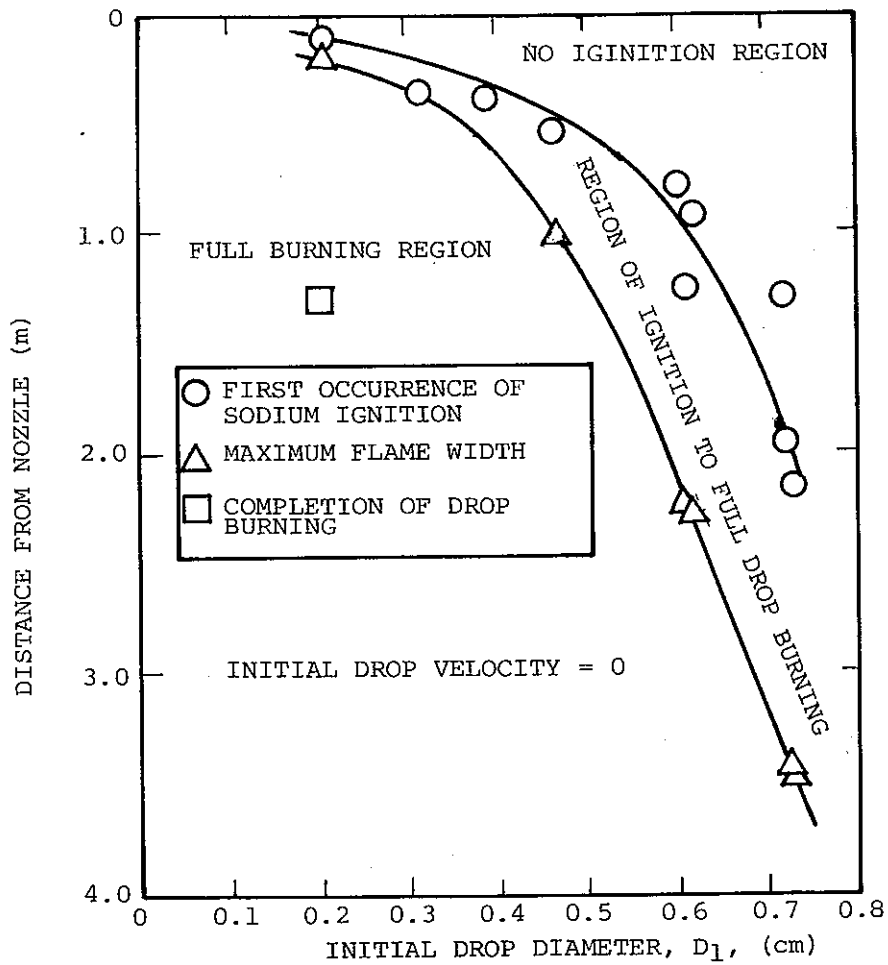


Fig.3.2 Burning Characteristics of Sodium Drops in Air (ref.(5))

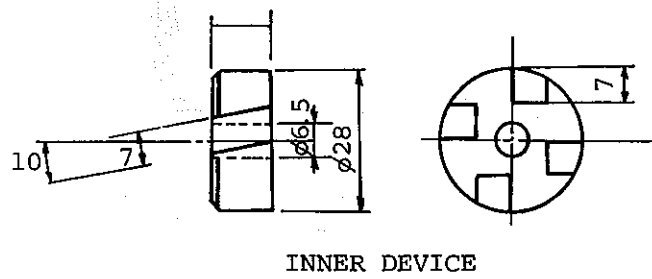
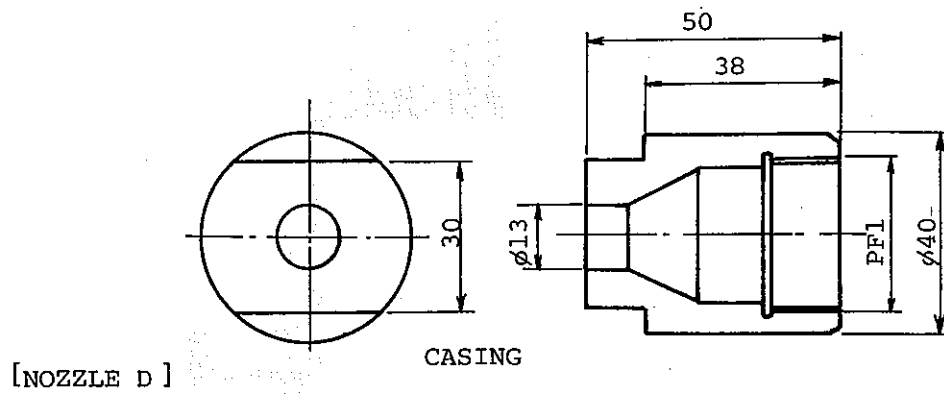
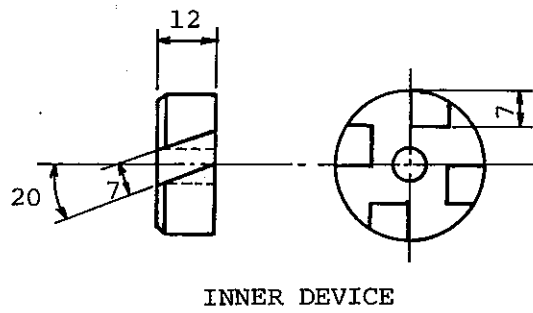
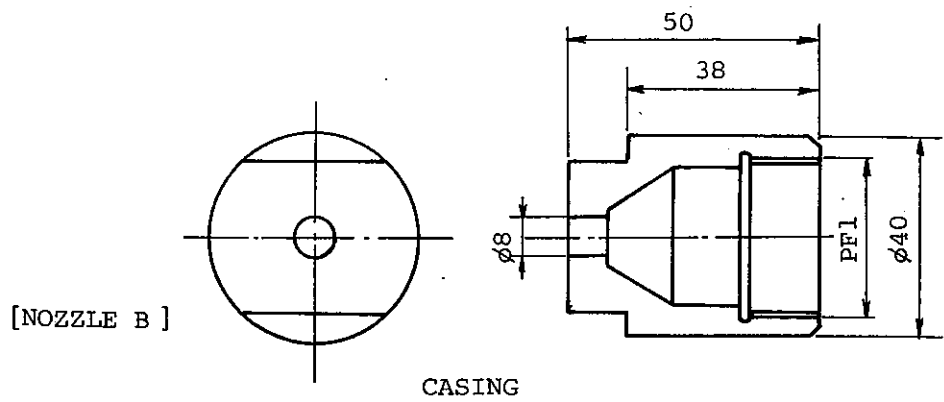
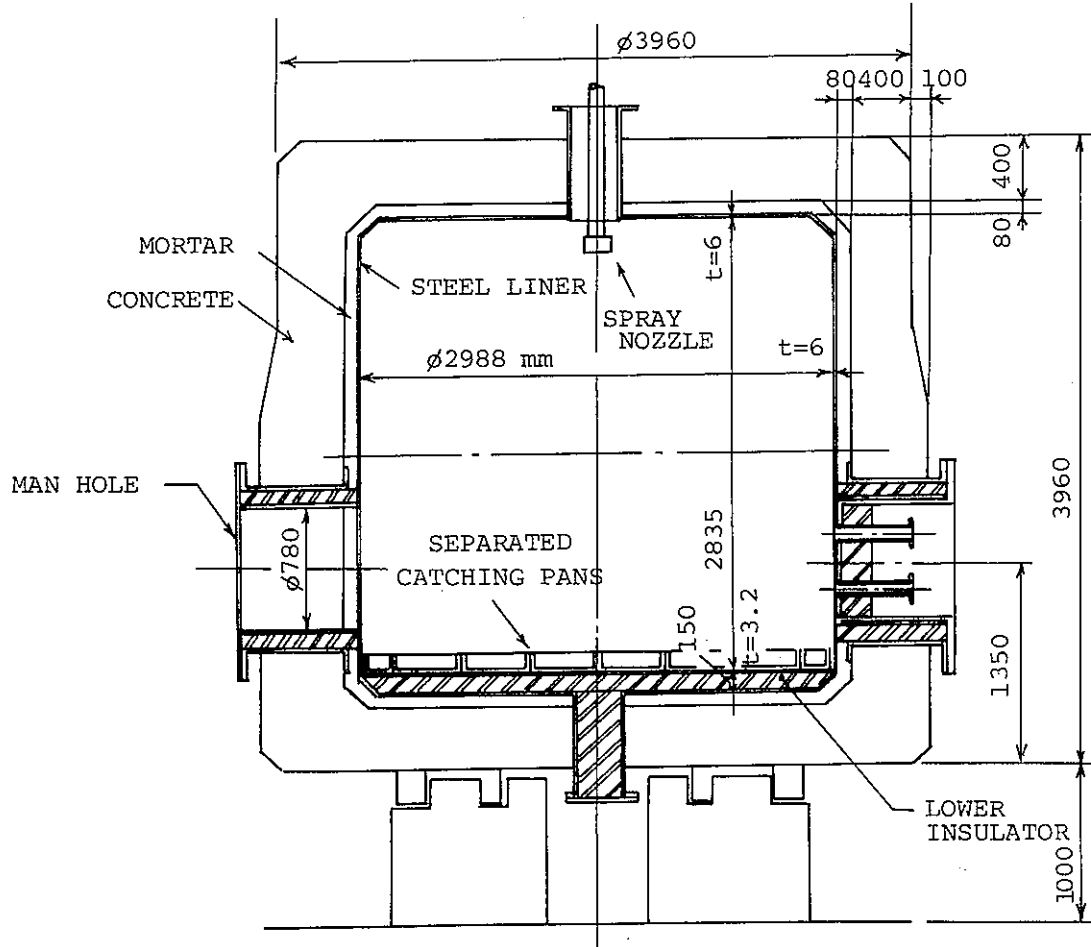


FIG.3.3 Full Corn Spray Nozzle



DESCRIPTION OF TEST VESSEL	
SIZE	: INNER DIA. = 3 m INNER HIGH. = 3 m
STRUCTURE	: STEEL LINED CONCRETE STRUCTURE
VOLUME	: 19.9 m ³ (NOT INCLUDING LOWER INSULATOR)
FLOOR AREA	: ABOUT 7 m ²
WALL AREA	: ABOUT 26.6 m ²
CEILING AREA	: ABOUT 7 m ²

Fig.3.4 Schematic Figure of Test Vessel

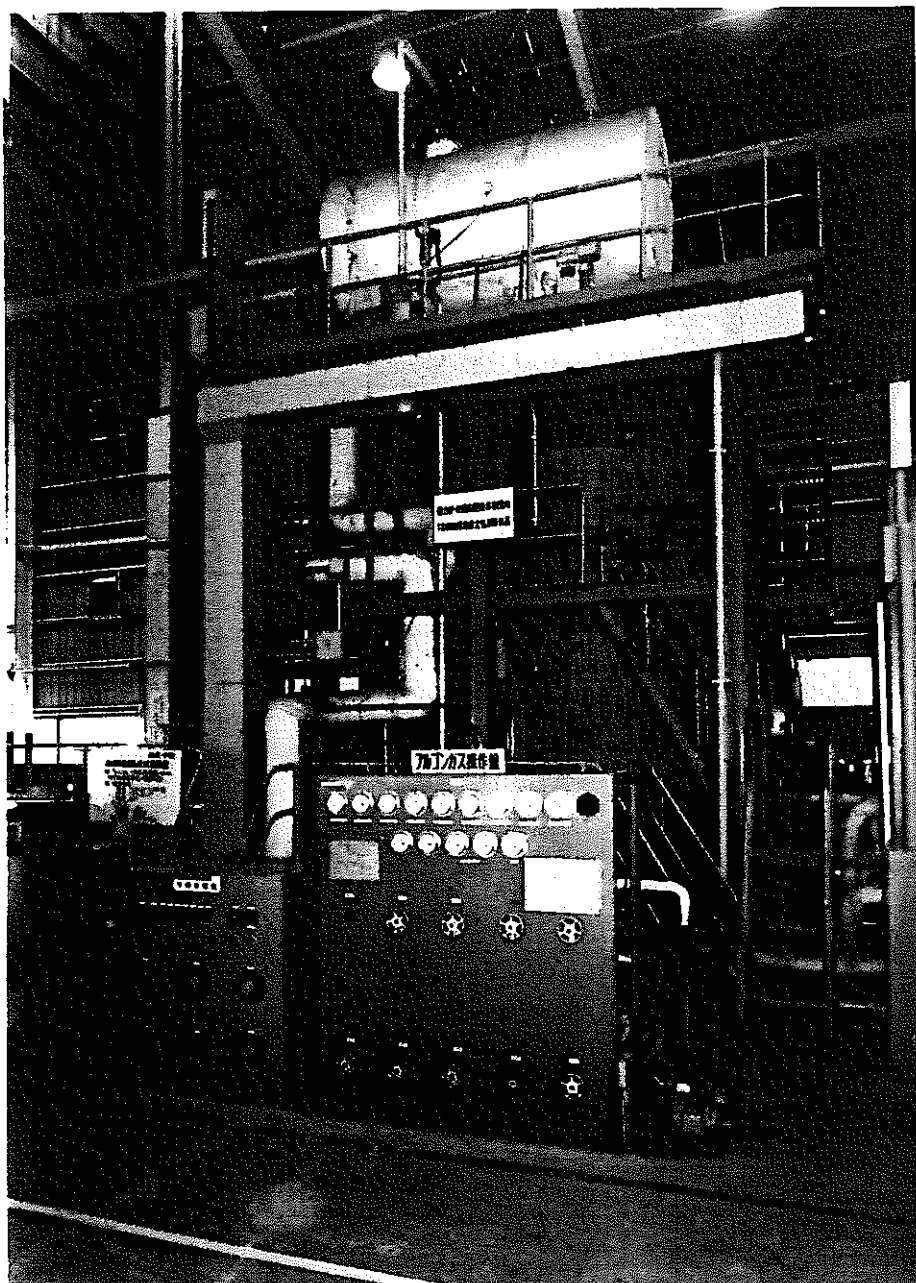
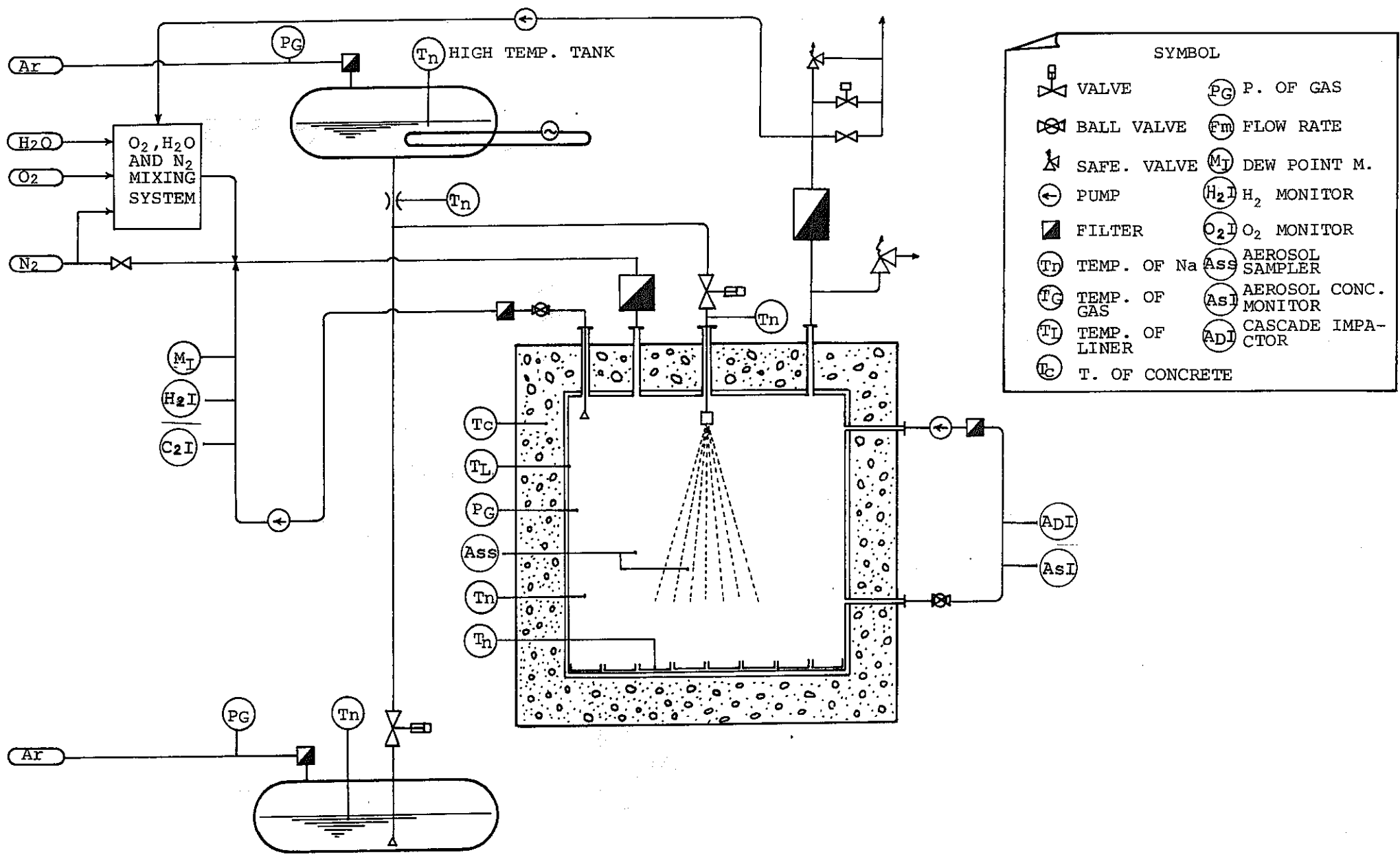
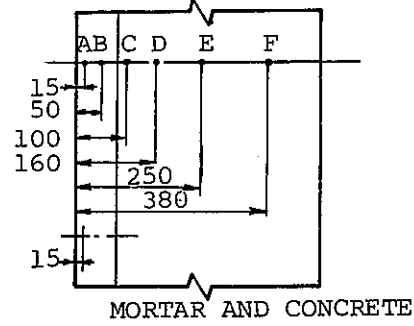
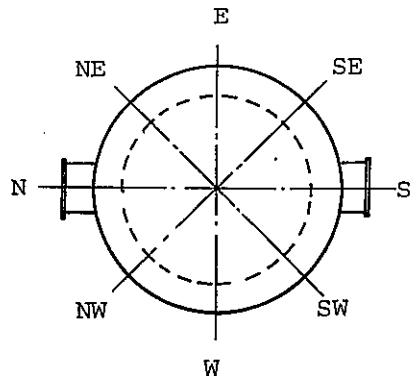


Fig.3.5 Photograph of Test Vessel



SYMBOL	
	VALVE
	BALL VALVE
	SAFE. VALVE
	PUMP
	FILTER
	TEMP. OF Na
	TEMP. OF GAS
	TEMP. OF LINER
	T. OF CONCRETE
	P. OF GAS
	FLOW RATE
	DEW POINT M.
	H ₂ MONITOR
	O ₂ MONITOR
	AEROSOL SAMPLER
	AEROSOL CONC. MONITOR
	CASCADE IMPACTOR

Fig.3.6 Flow Sheet of Test Facility



TAG NO	
○	TE3xx T. OF GAS
.	TE4xx T. OF CONCRETE
x	TE5xx T. OF LINER
◇	TE6xx T. OF CATCH. PAN
△	PIxxx PRESSURE

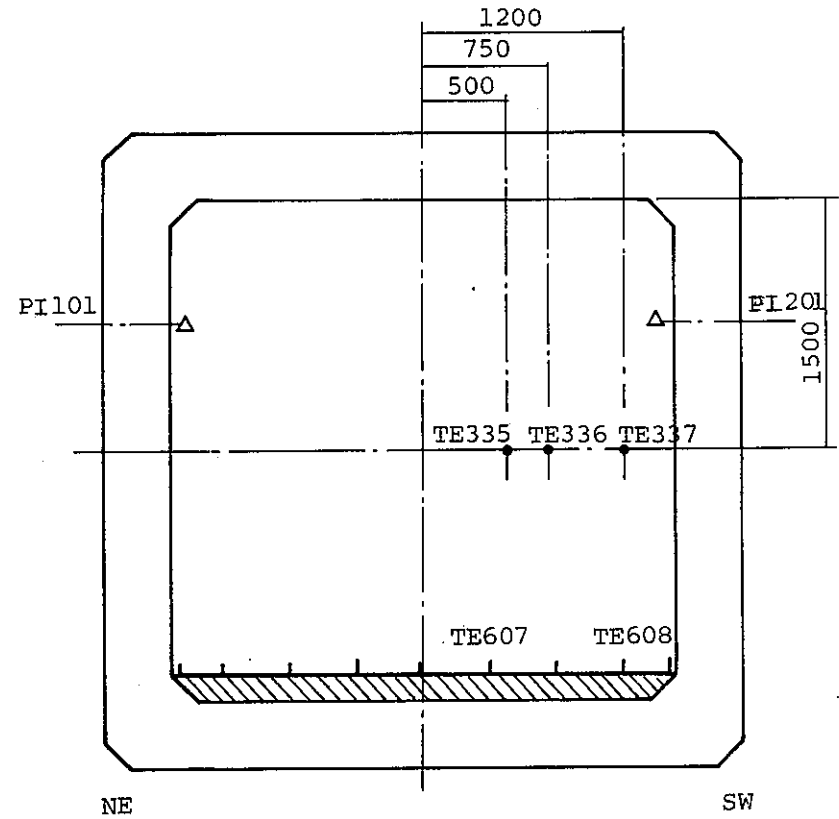
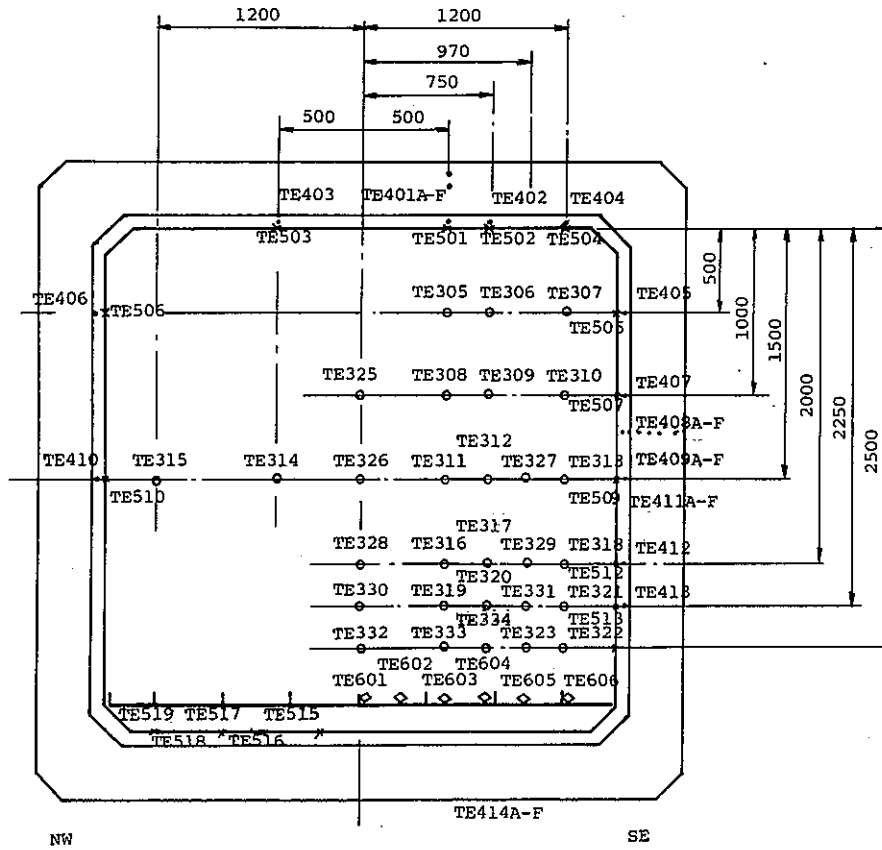


Fig.3.7 Position of Thermo Couple

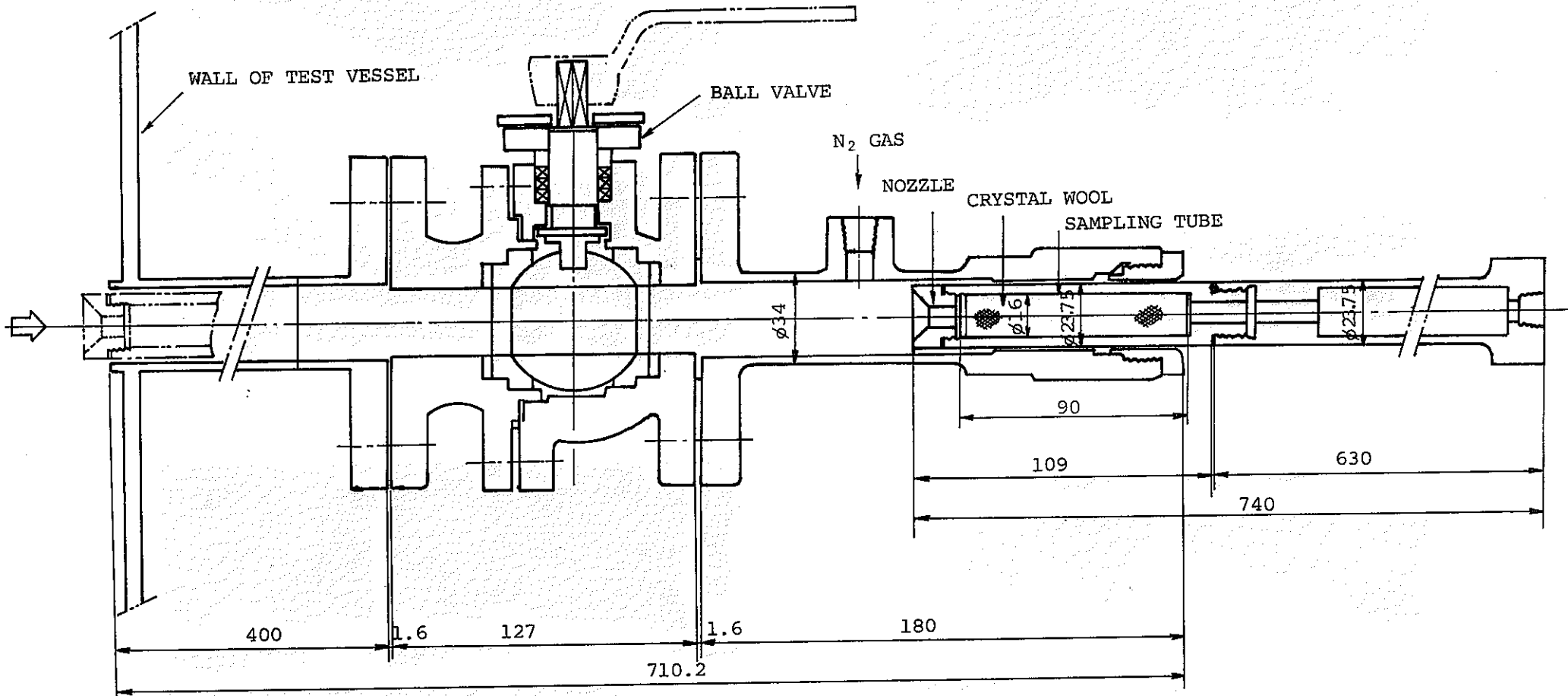
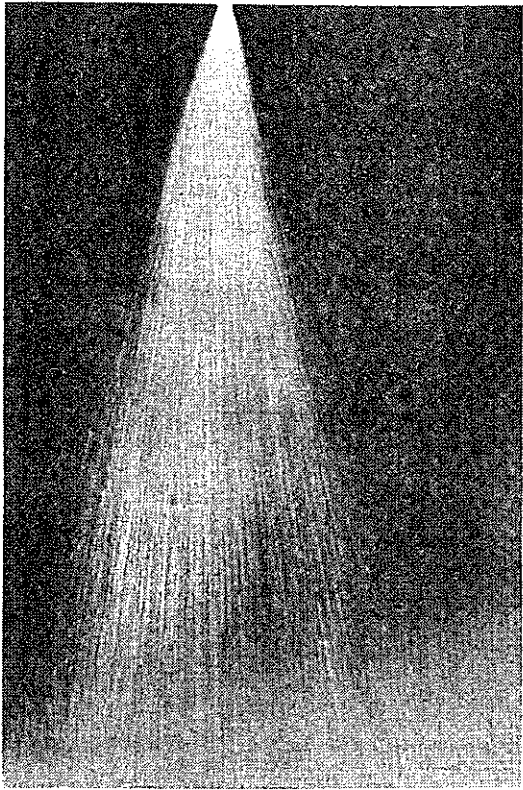
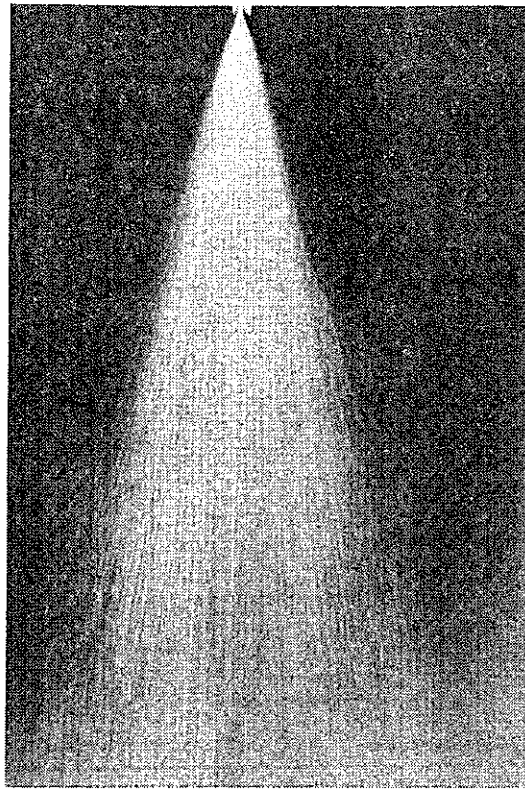


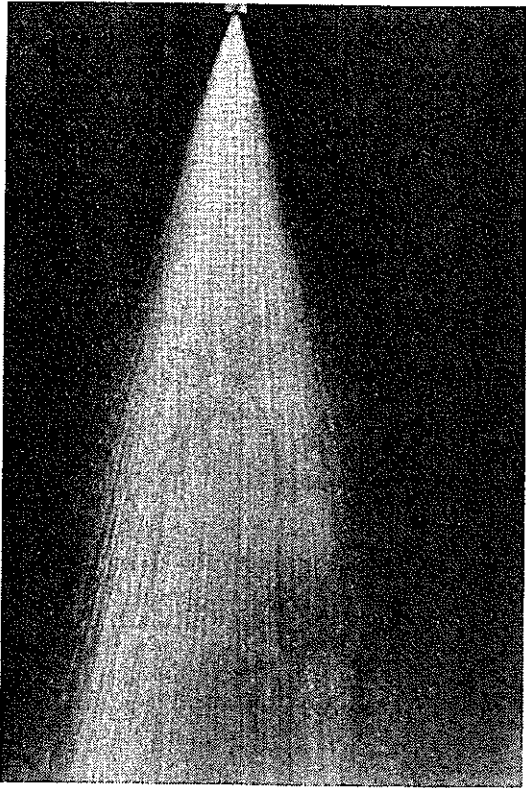
Fig.3.8 Sodium Aerosol Sampler



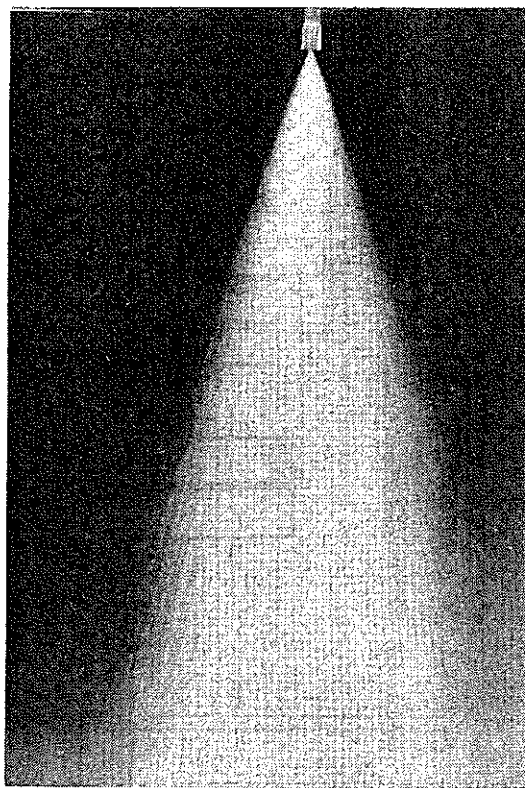
$P = 0.5 \text{ kg/cm}^2$



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



$P = 1.5 \text{ kg/cm}^2$

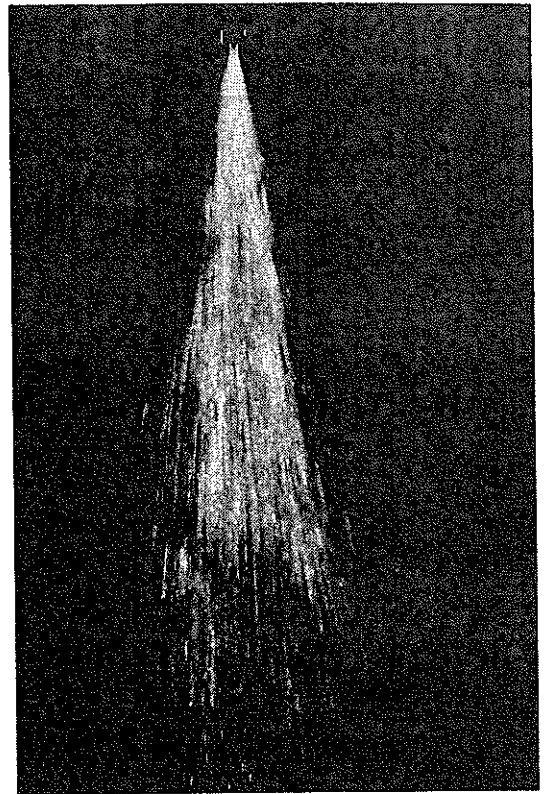


$P = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

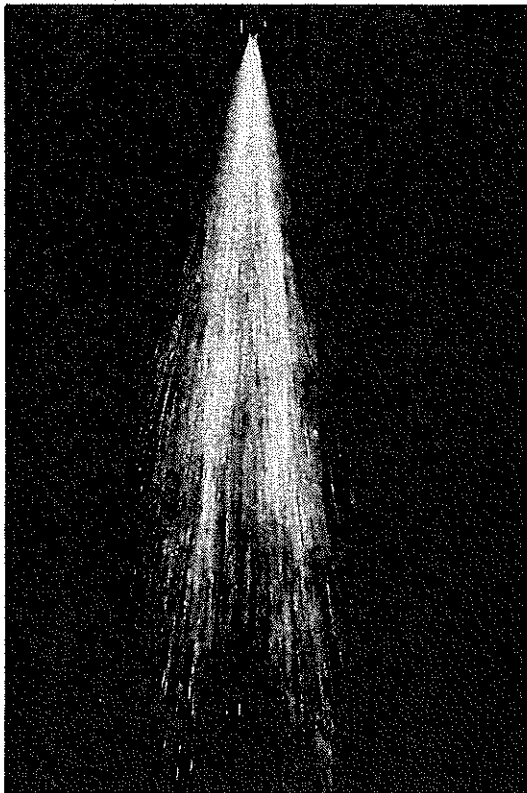
Fig.4.1(1) Photograph of Spray (B Nozzle)



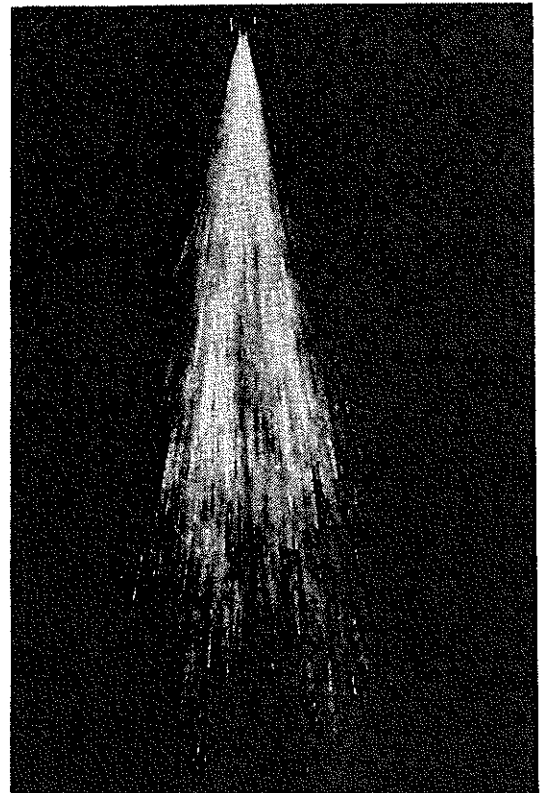
$P = 0.2 \text{ kg/cm}^2$



$P = 0.3 \text{ kg/cm}^2$



$P = 0.4 \text{ kg/cm}^2$



$P = 0.5 \text{ kg/cm}^2$

Fig.4.1(2) Photograph of Spray (D Nozzle)

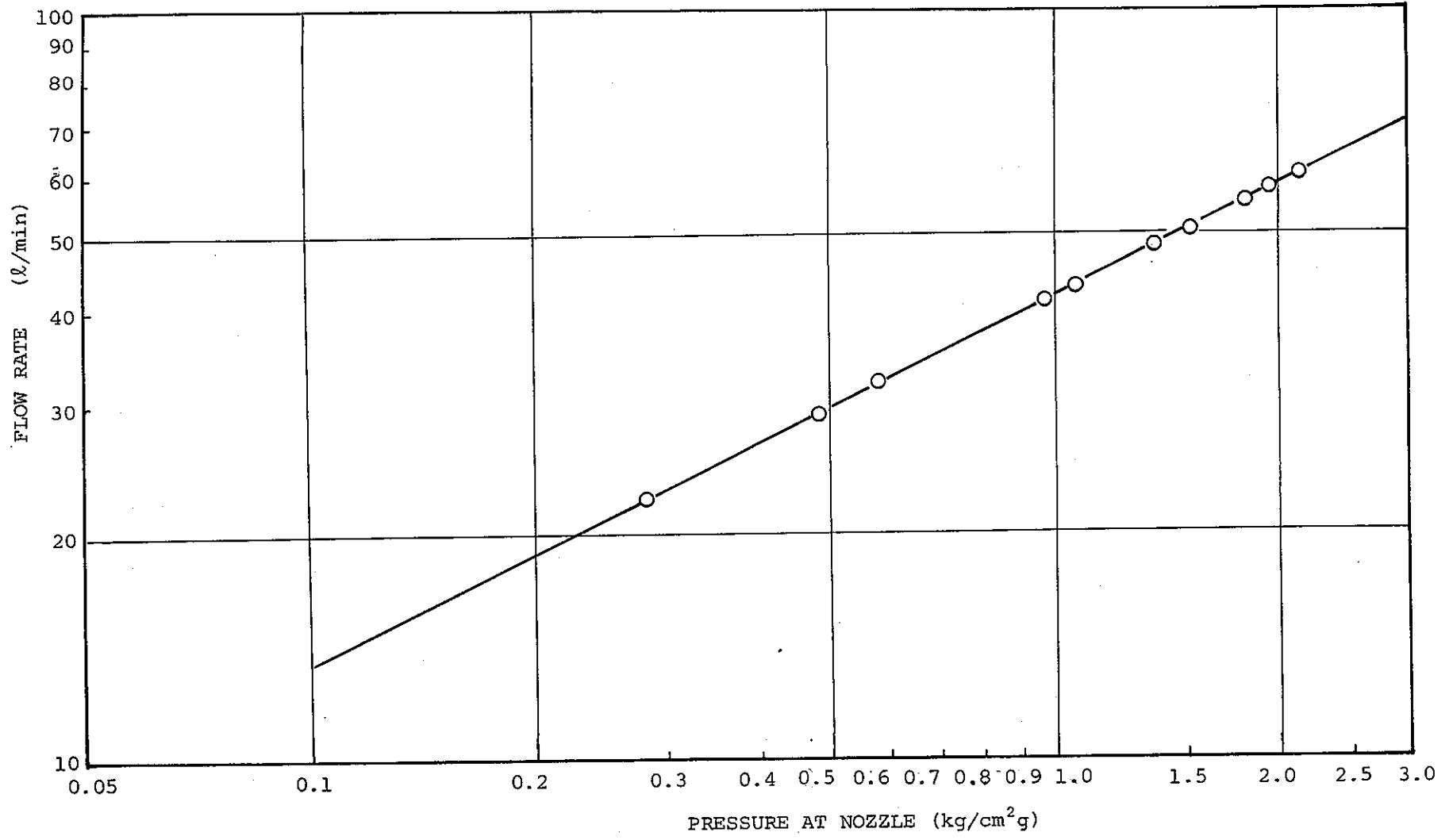


Fig.4.2(1) Flow Characteristics of Spray Nozzle (Nozzle B)

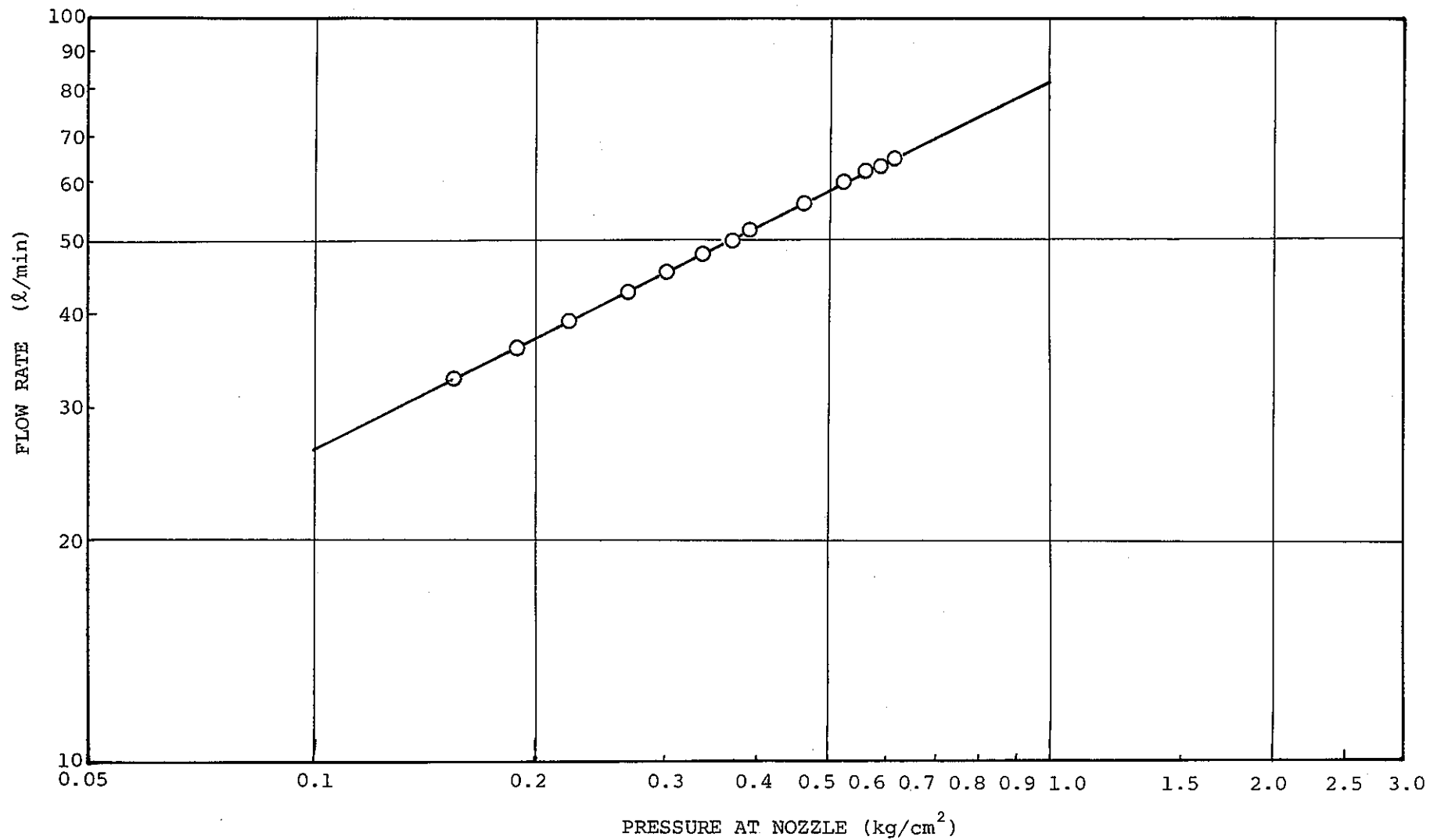


Fig.4.2 (2) Flow Characteristics of Spray Nozzle (Nozzle D)

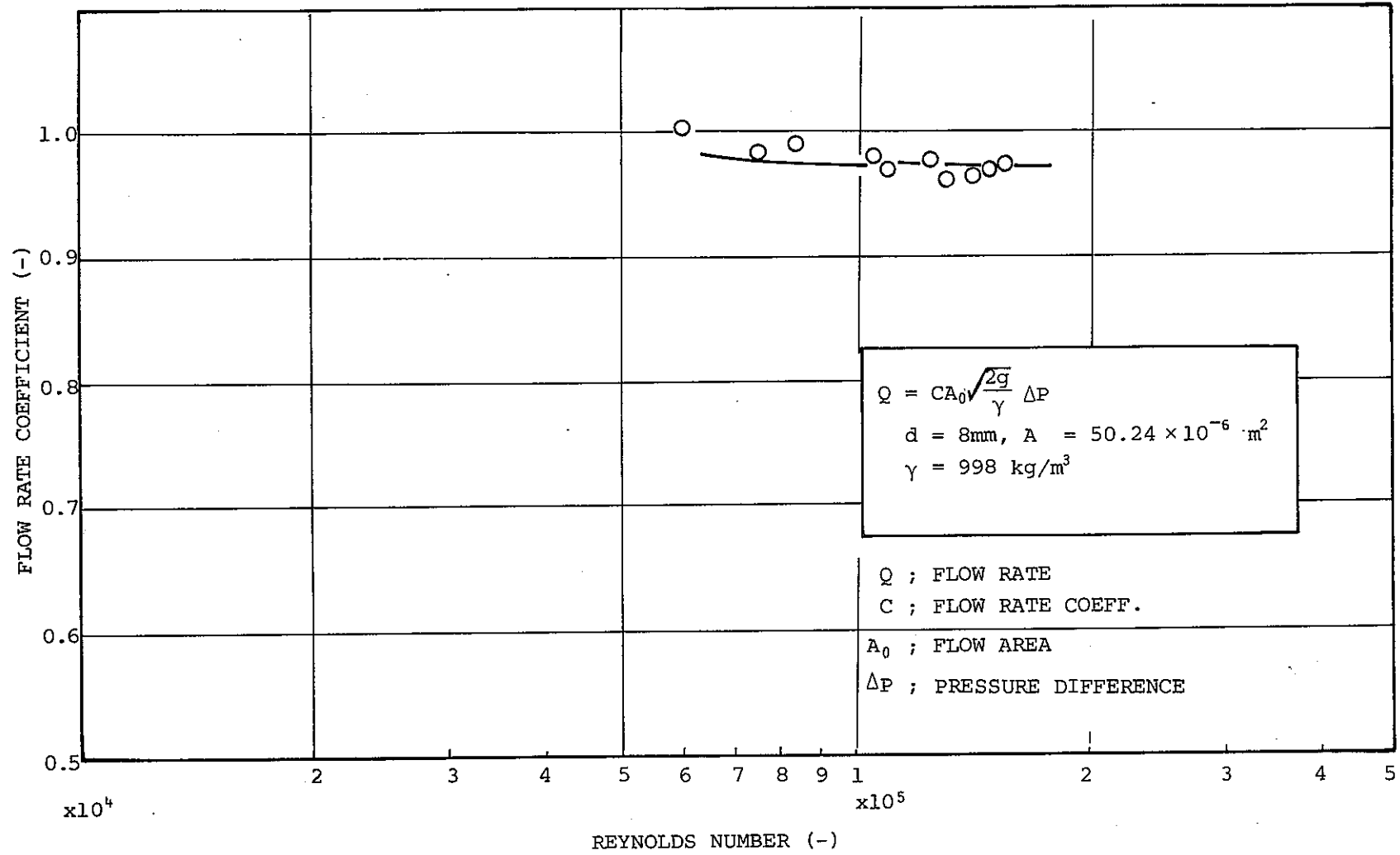


Fig.4.3 Flow Rate Coefficient Versus Reynolds Number (Nozzle B)

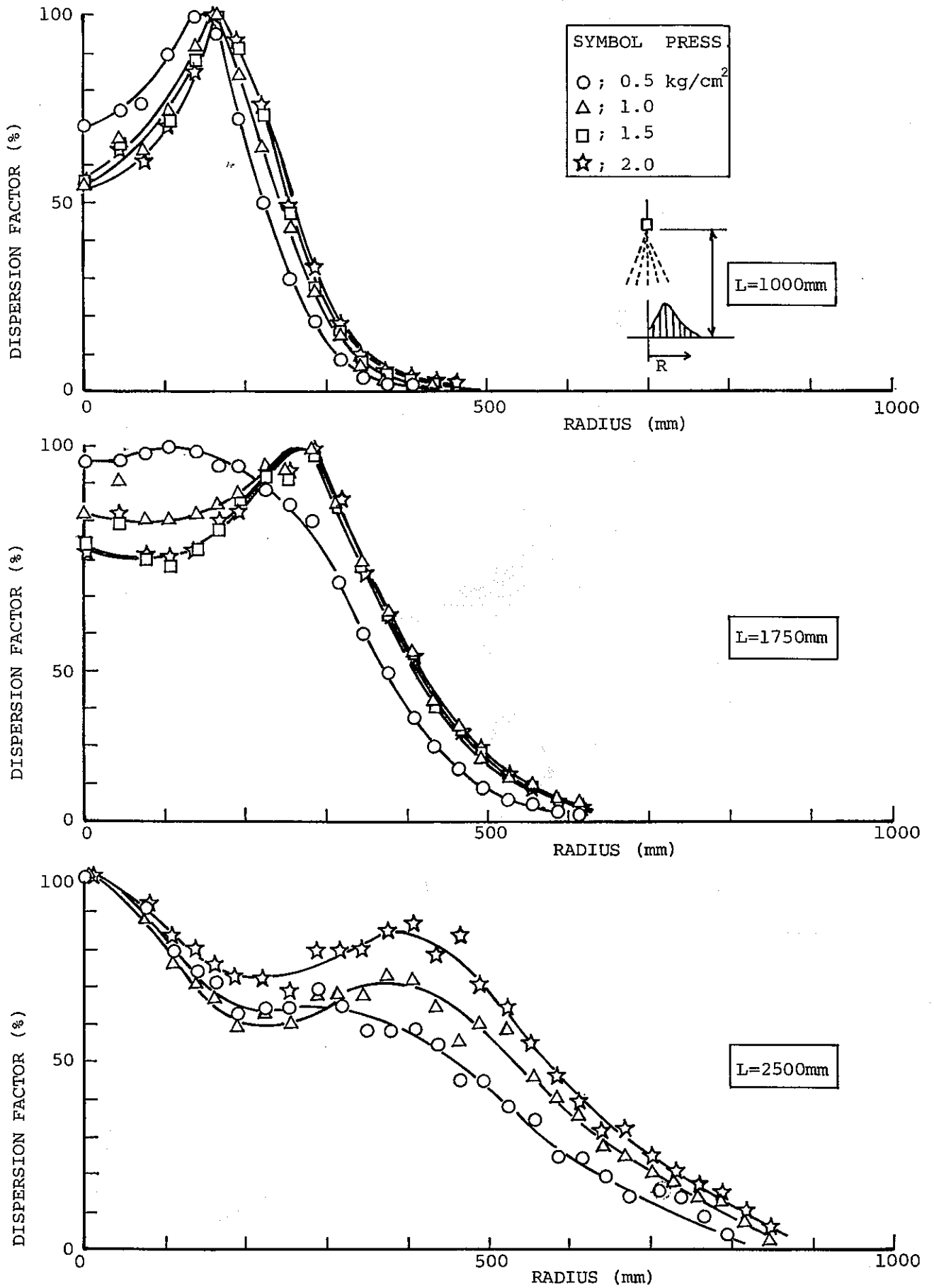


Fig.4.4(1) Dispersion Curve (Nozzle B)

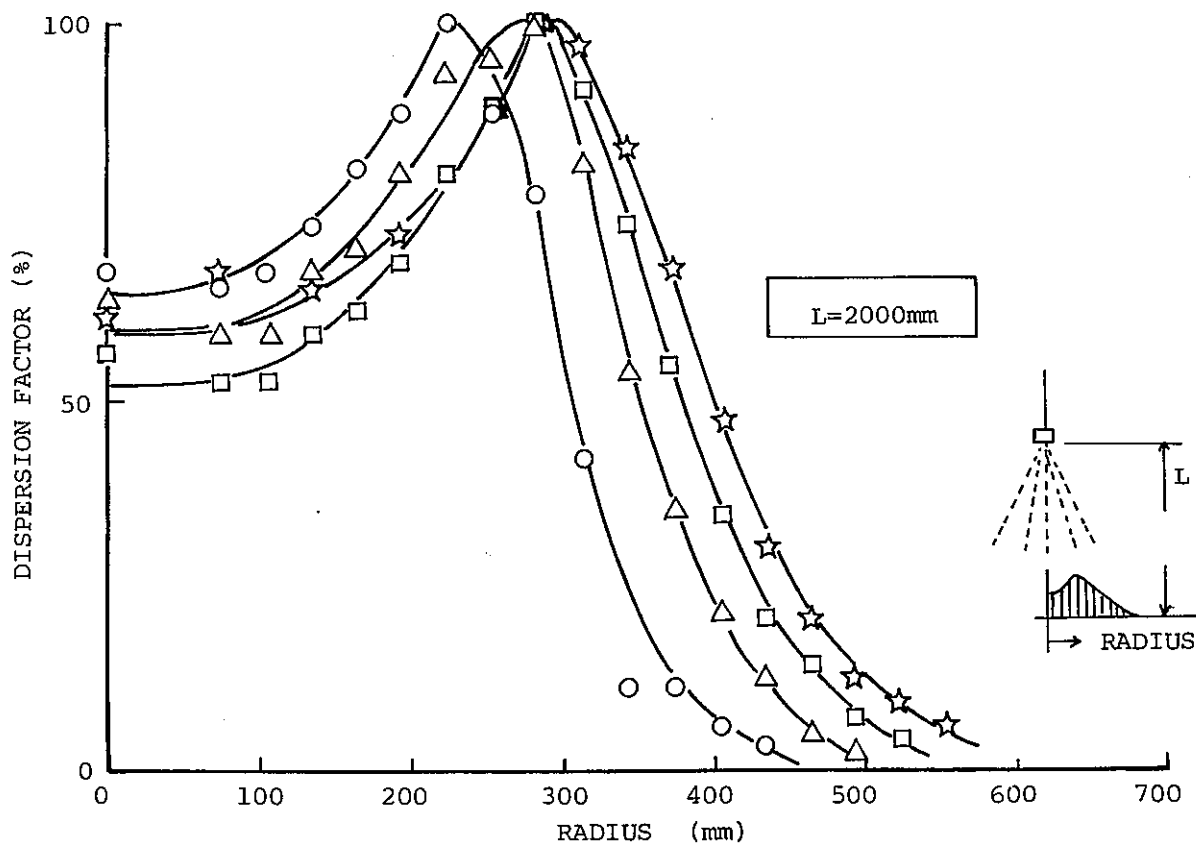
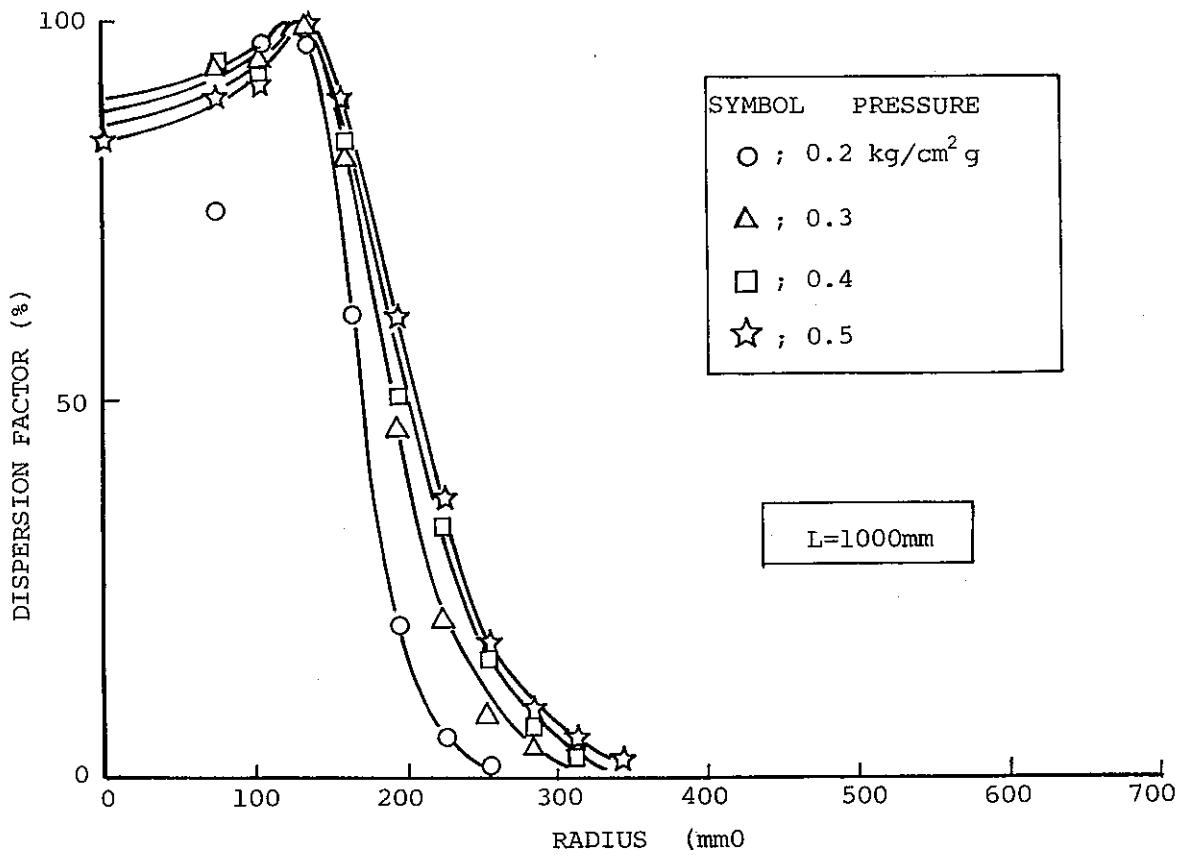


Fig.4.4(2) Dispersion Curve (Nozzle D)

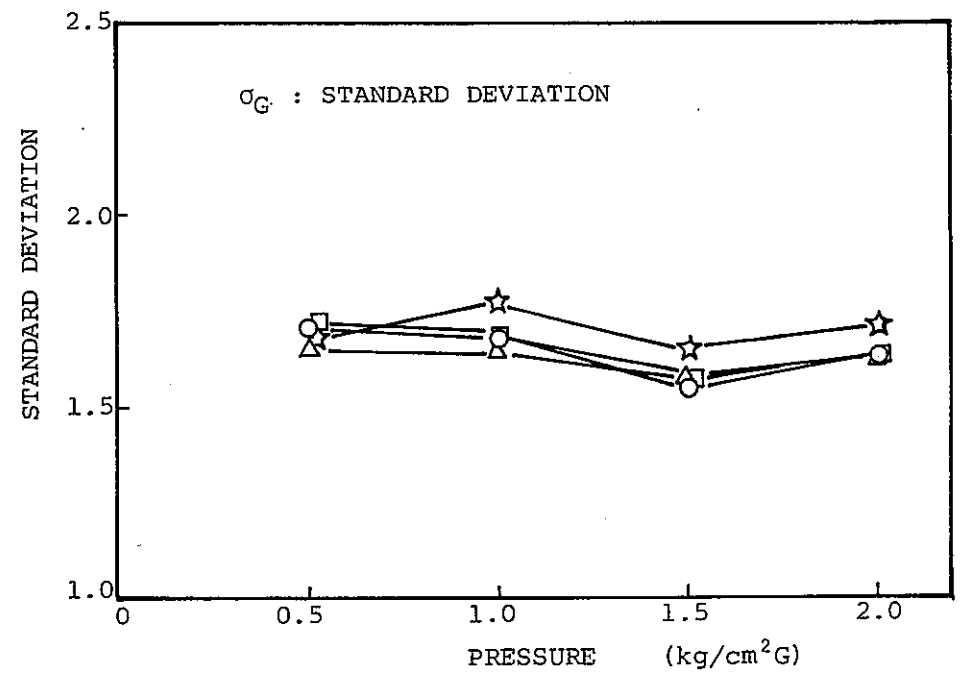
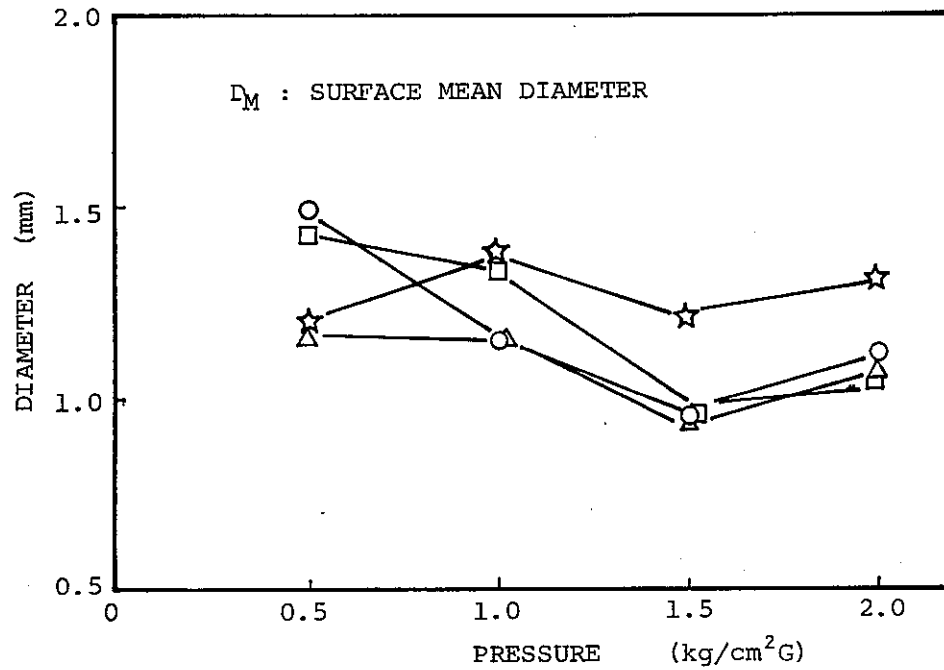
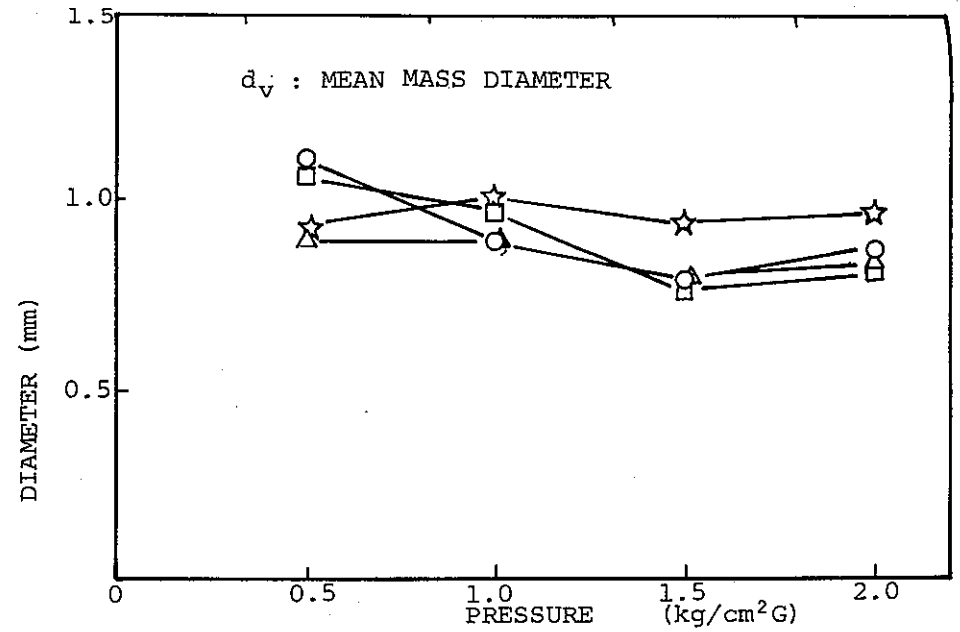
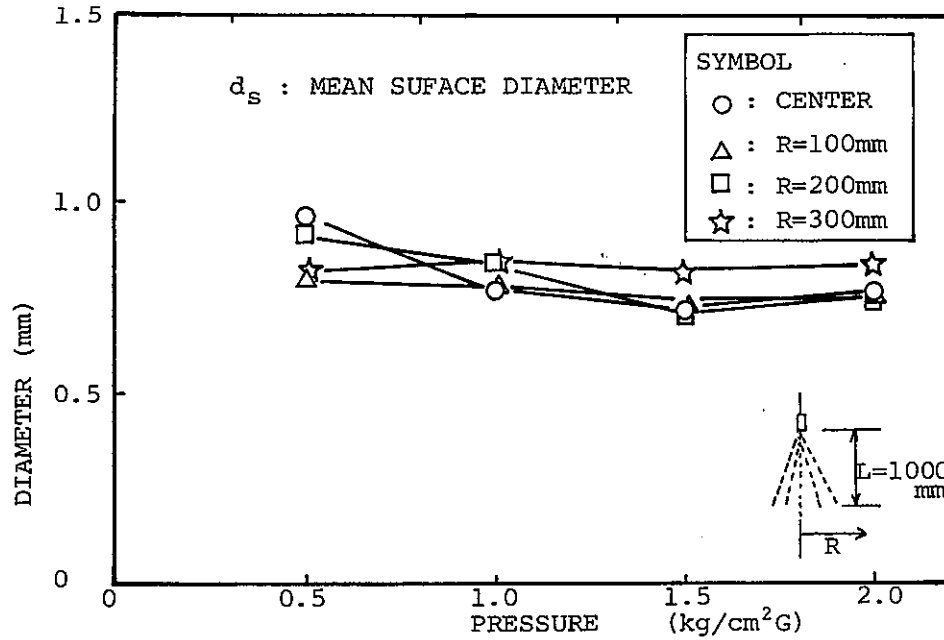


Fig.4.5(1) Mean Diameter and Standard Deviation (Nozzle B)

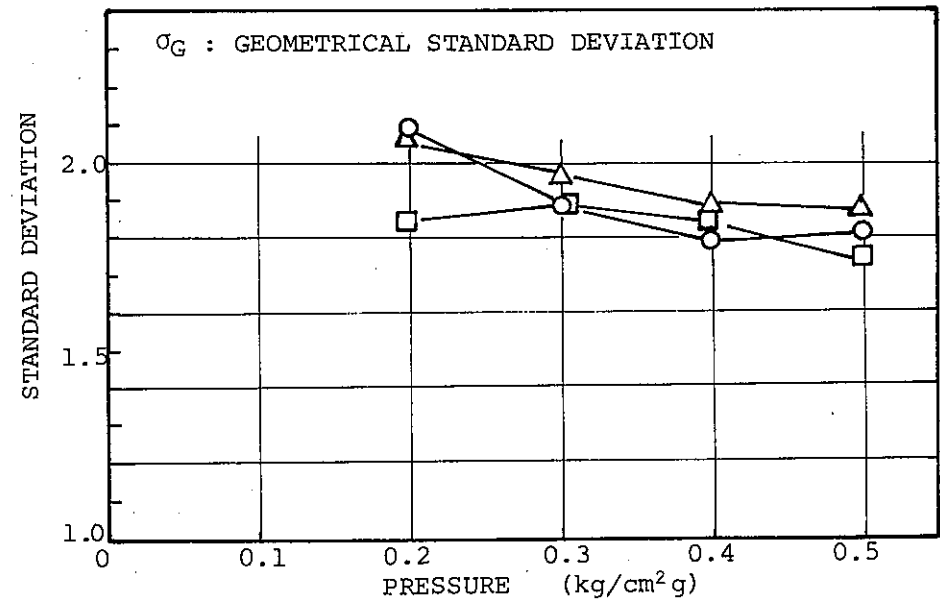
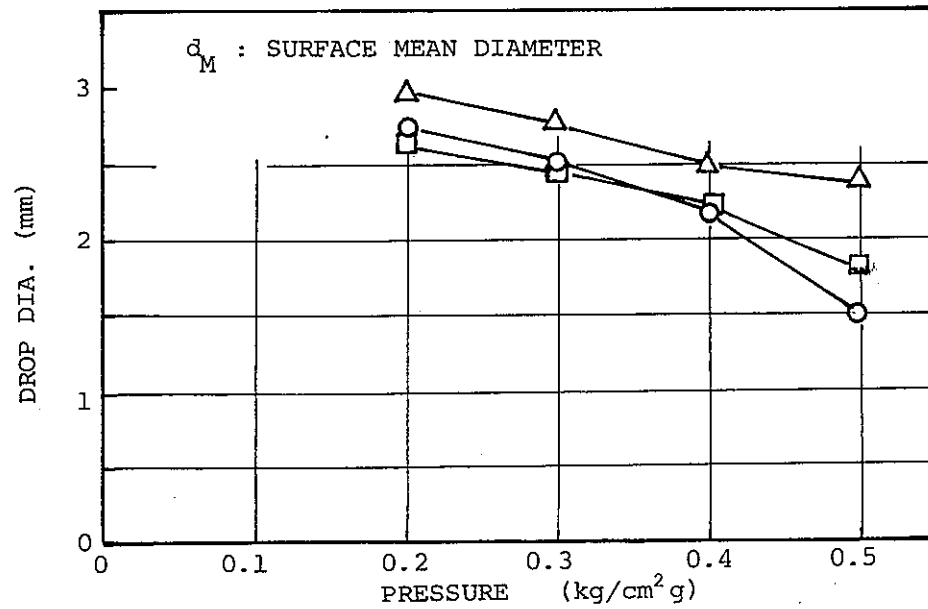
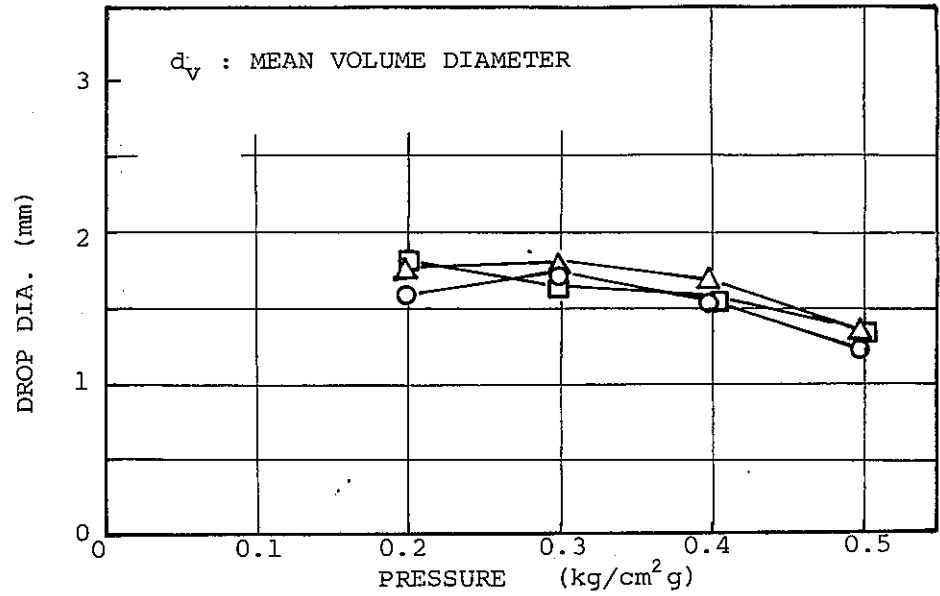
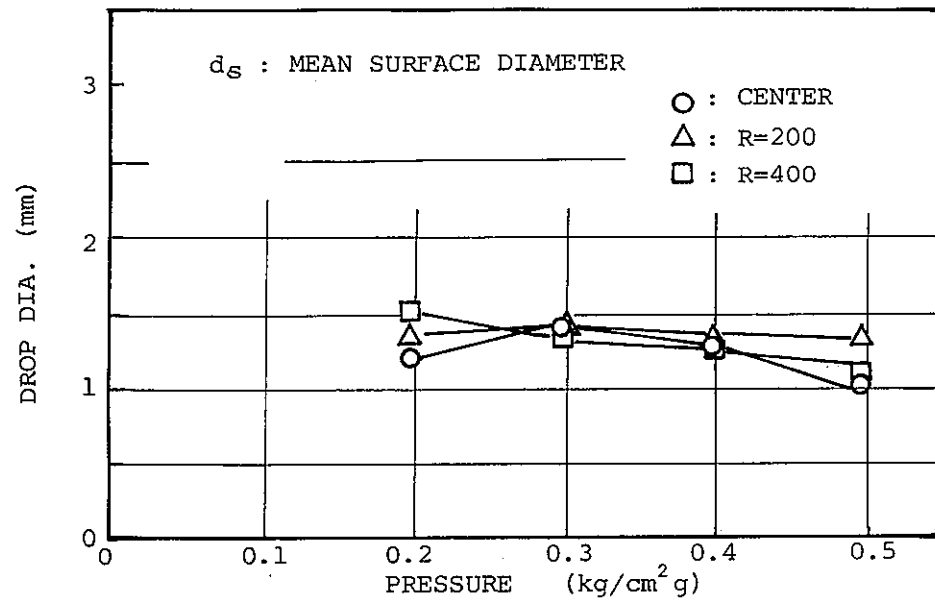
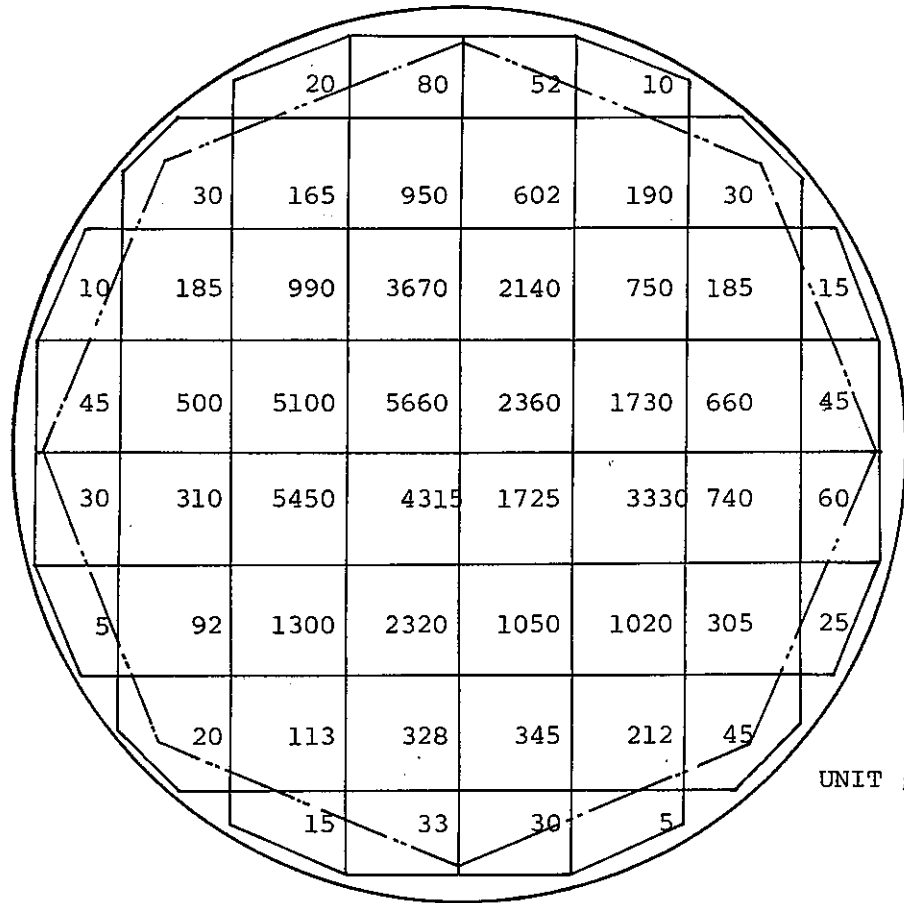
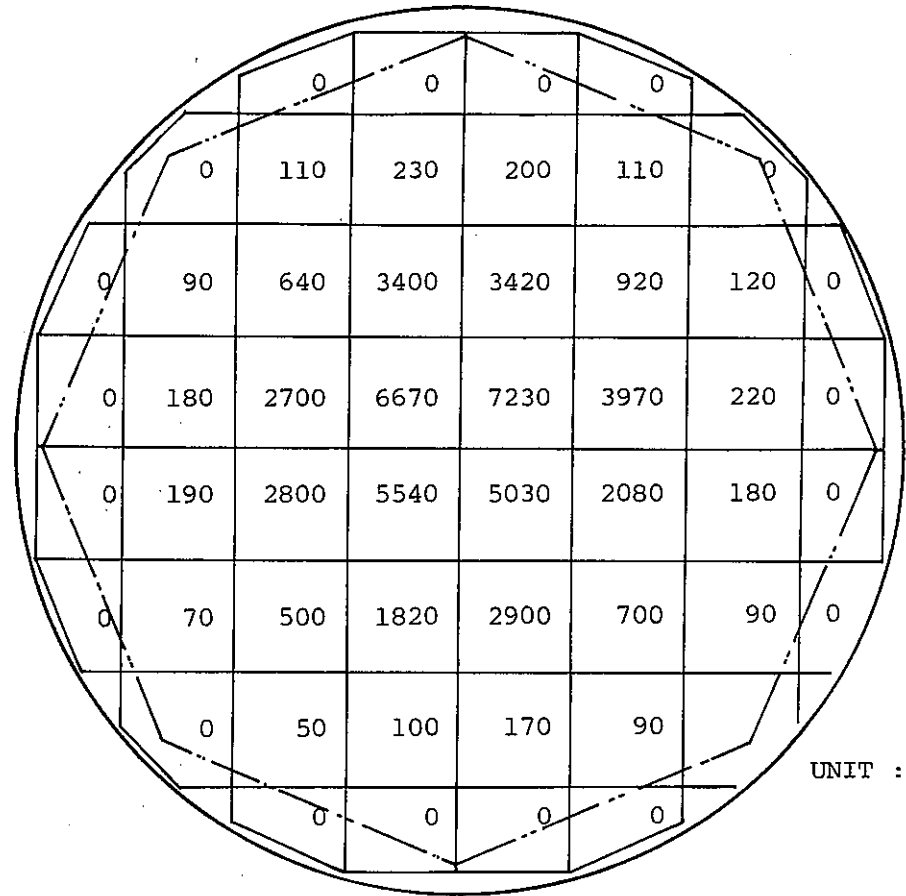


Fig.4.5(2) Mean diameter and Standard Deviation (nozzle D)



UNIT : CC

NOZZLE ; D
 PRESSURE ; 0.4 kg/cm²g
 FLOW RATE ; 52 l/min
 DURATION : 1 min



UNIT : CC

NOZZLE ; B
 PRESSURE ; 1.6 kg/cm²g
 FLOW RATE ; 52 l/min
 DURATION ; 1 min

Fig.4.6 Water Dispersion in The Catching Pan

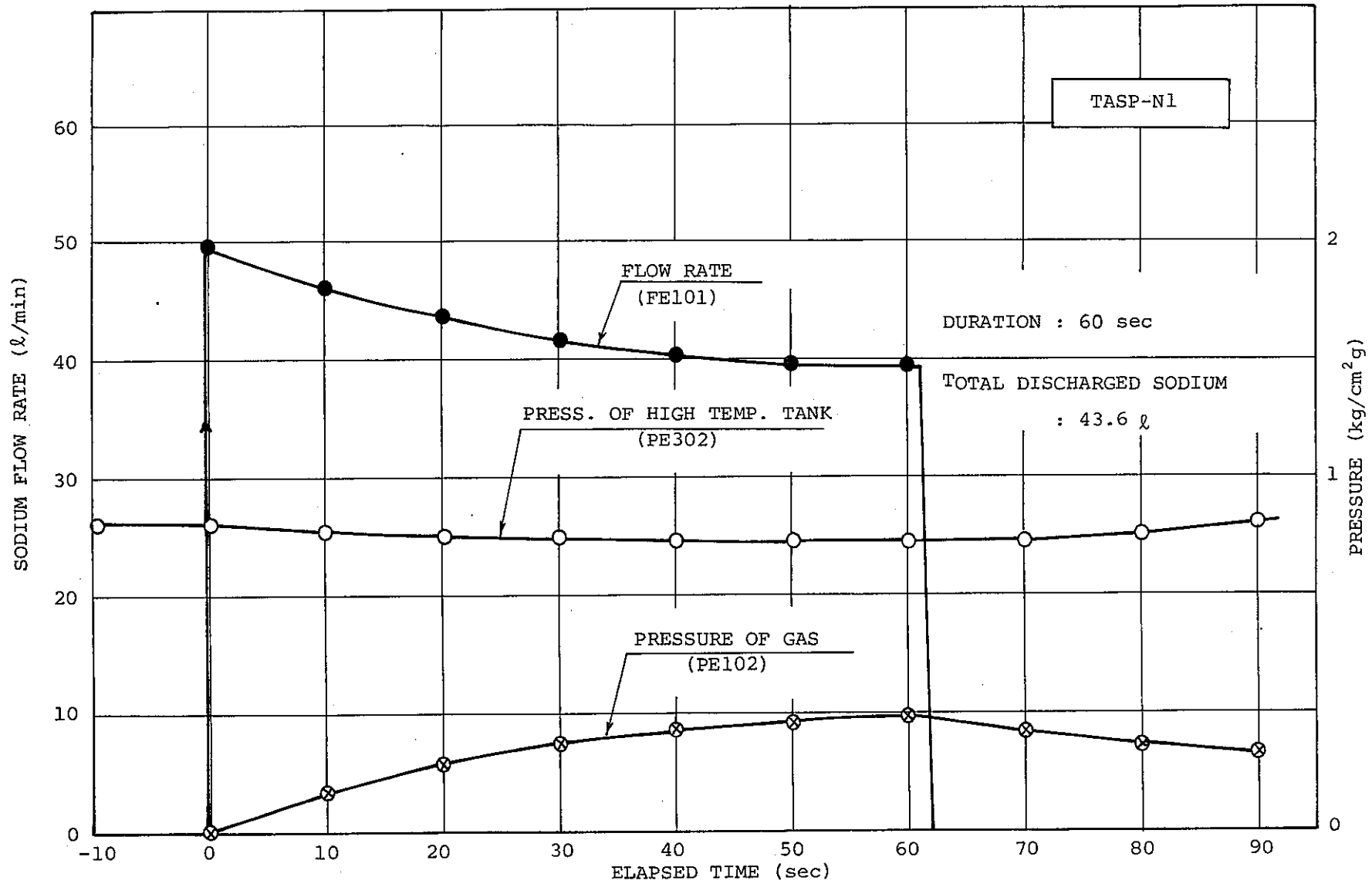
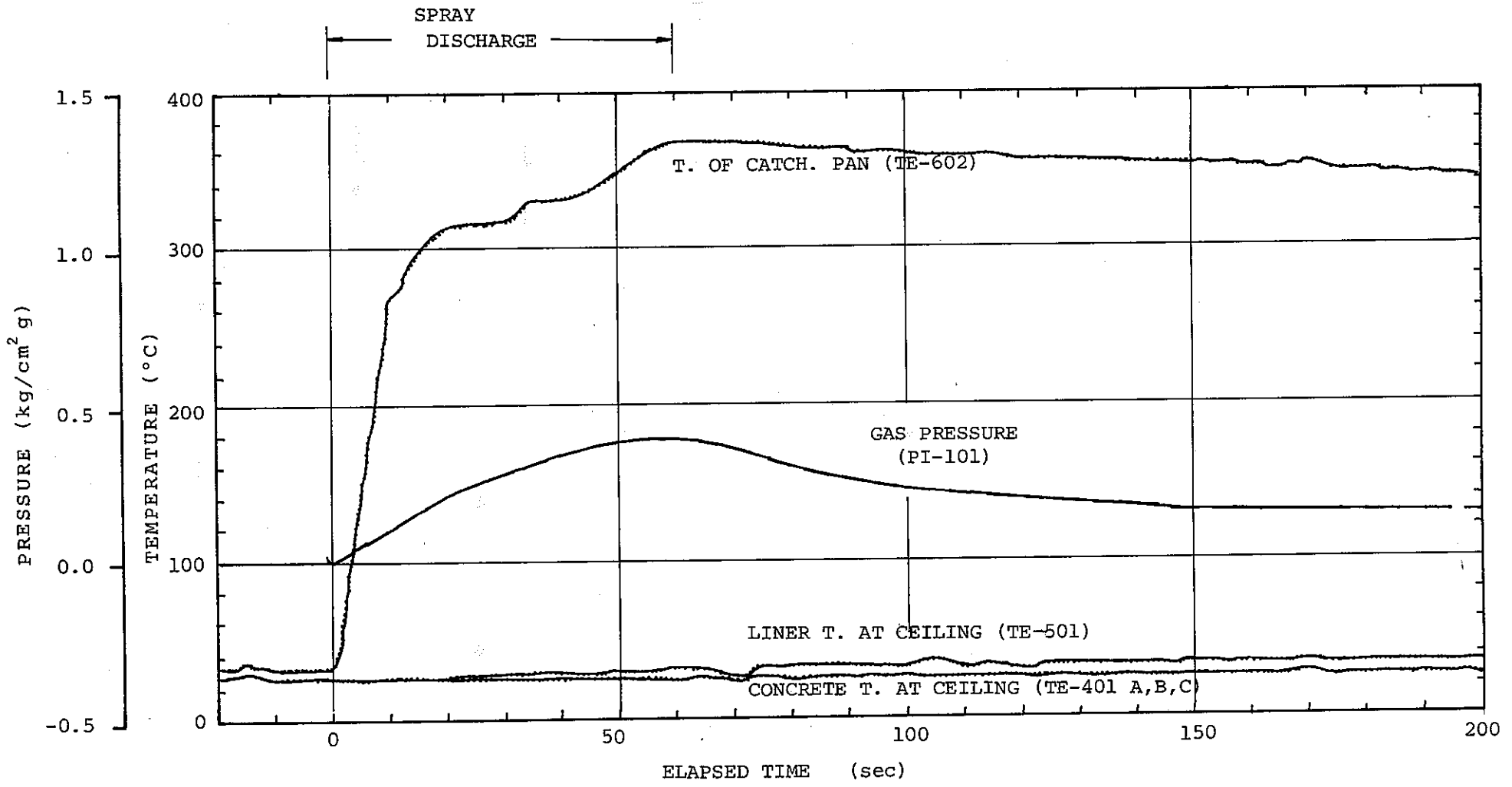


Fig.5.1(1) TASP-N1 Data ; Sodium Discharge Flow Rate

- 08 -



Fwg.5.1(2) TASP-N1 Data ; Pressure and Temperature Response

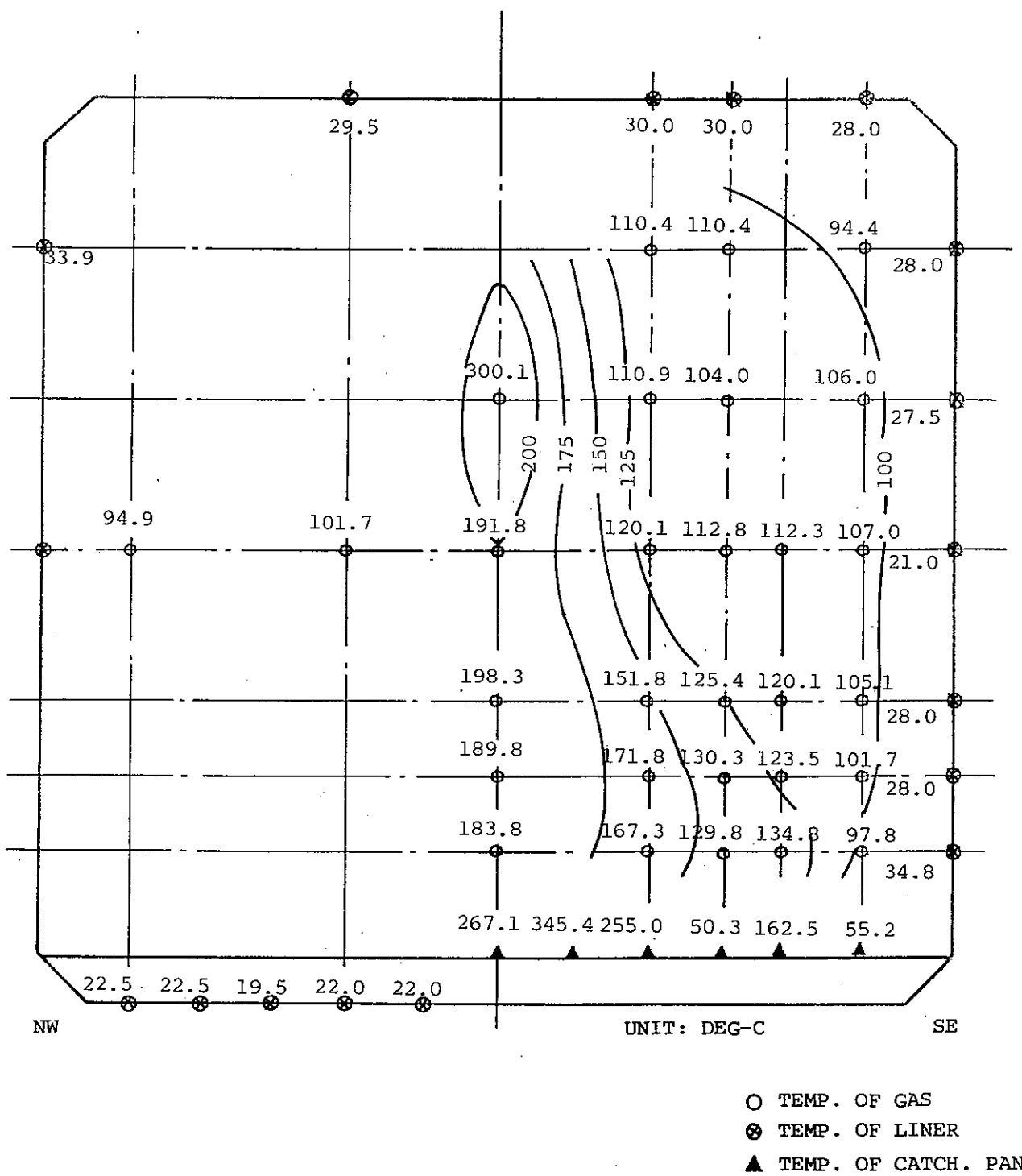


Fig.5.1(3) TASP-N1 Data ; Temperature Distribution

(Elapsed Time = 50 sec)

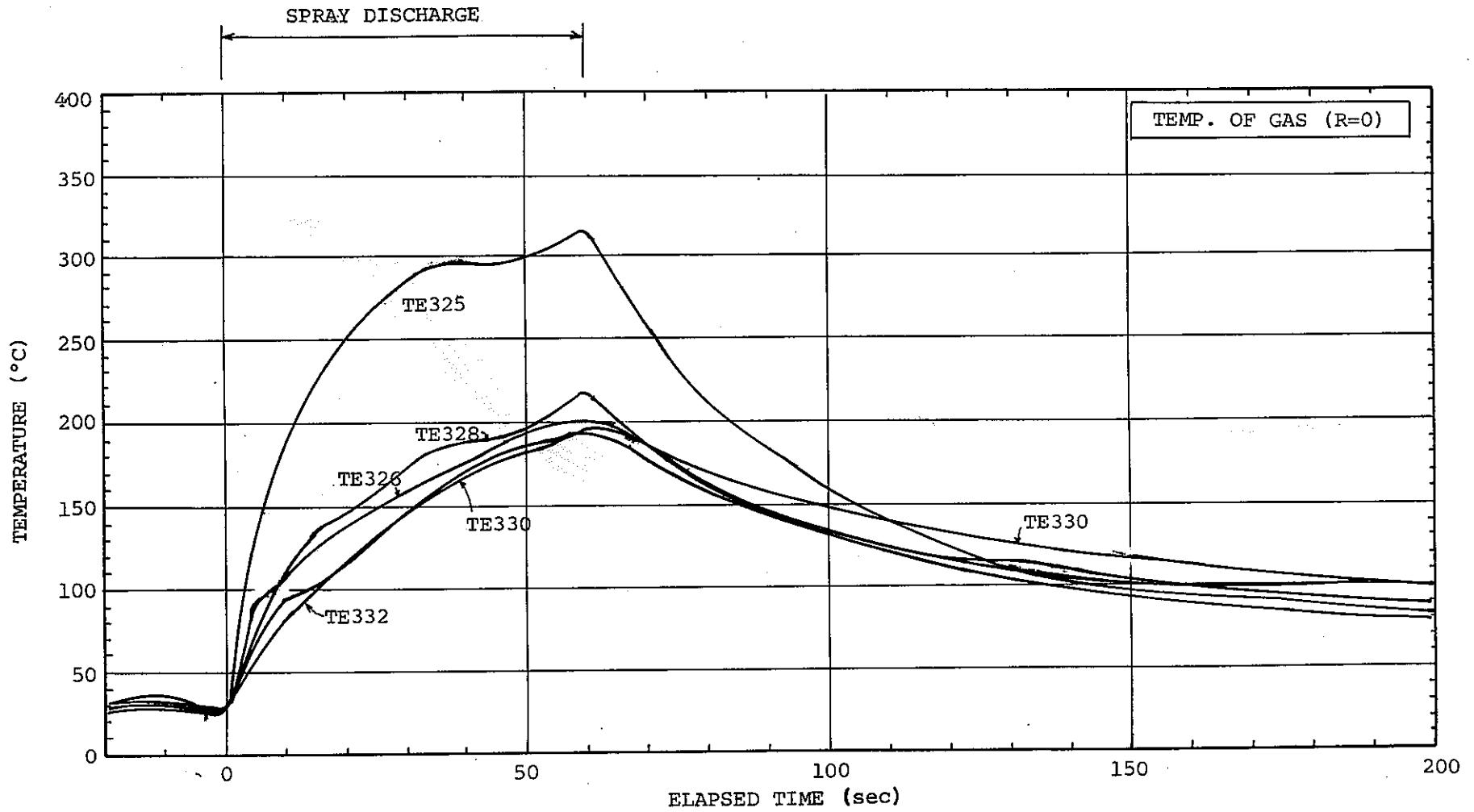


Fig.5.1(4) TASP-N1 Data ; Gas Temperature

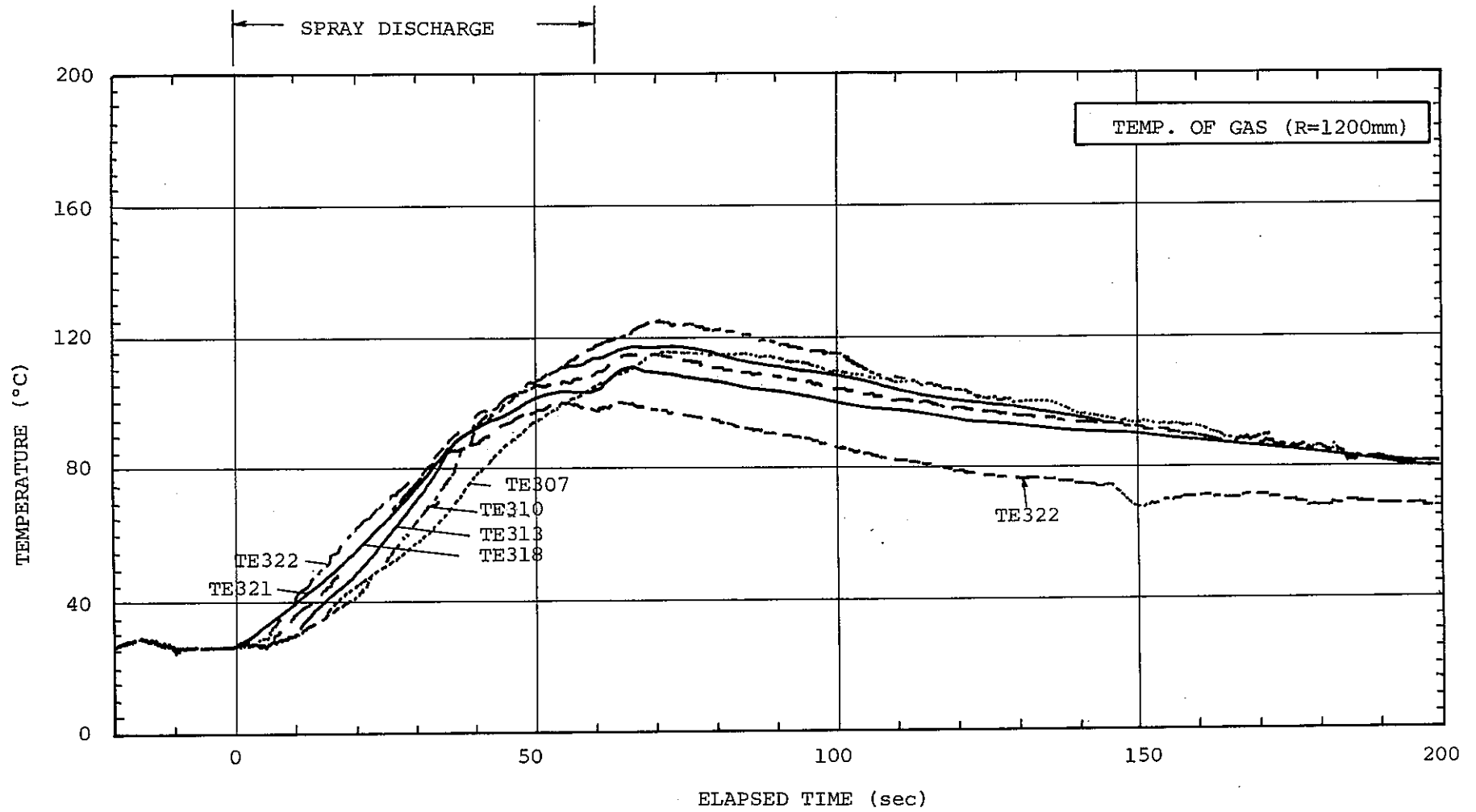


Fig.5.1(5) TASP-N1 Data ; Gas temperature

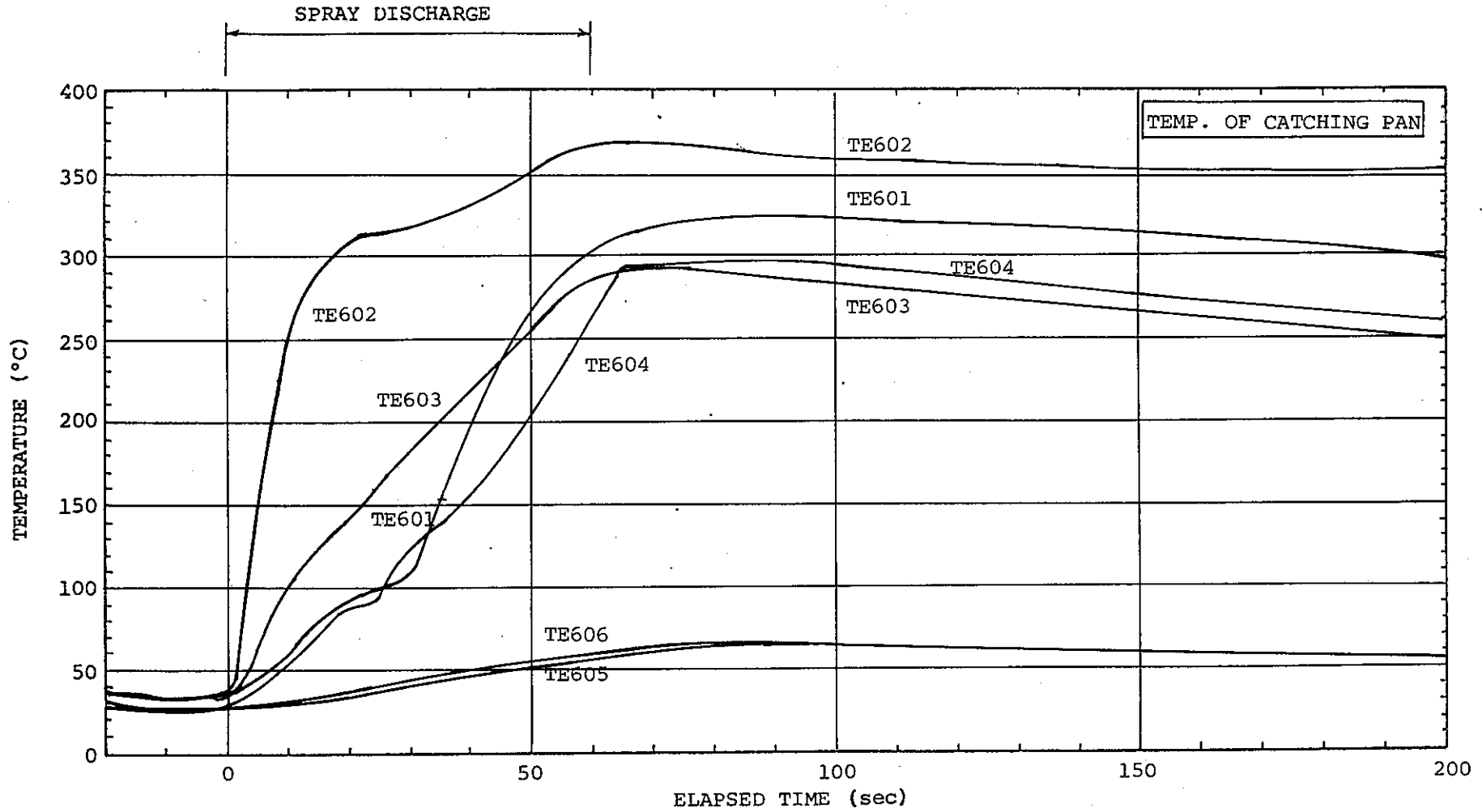


Fig.5.1 (6) TASP-N1 Data ; Temperature of Catching Pan

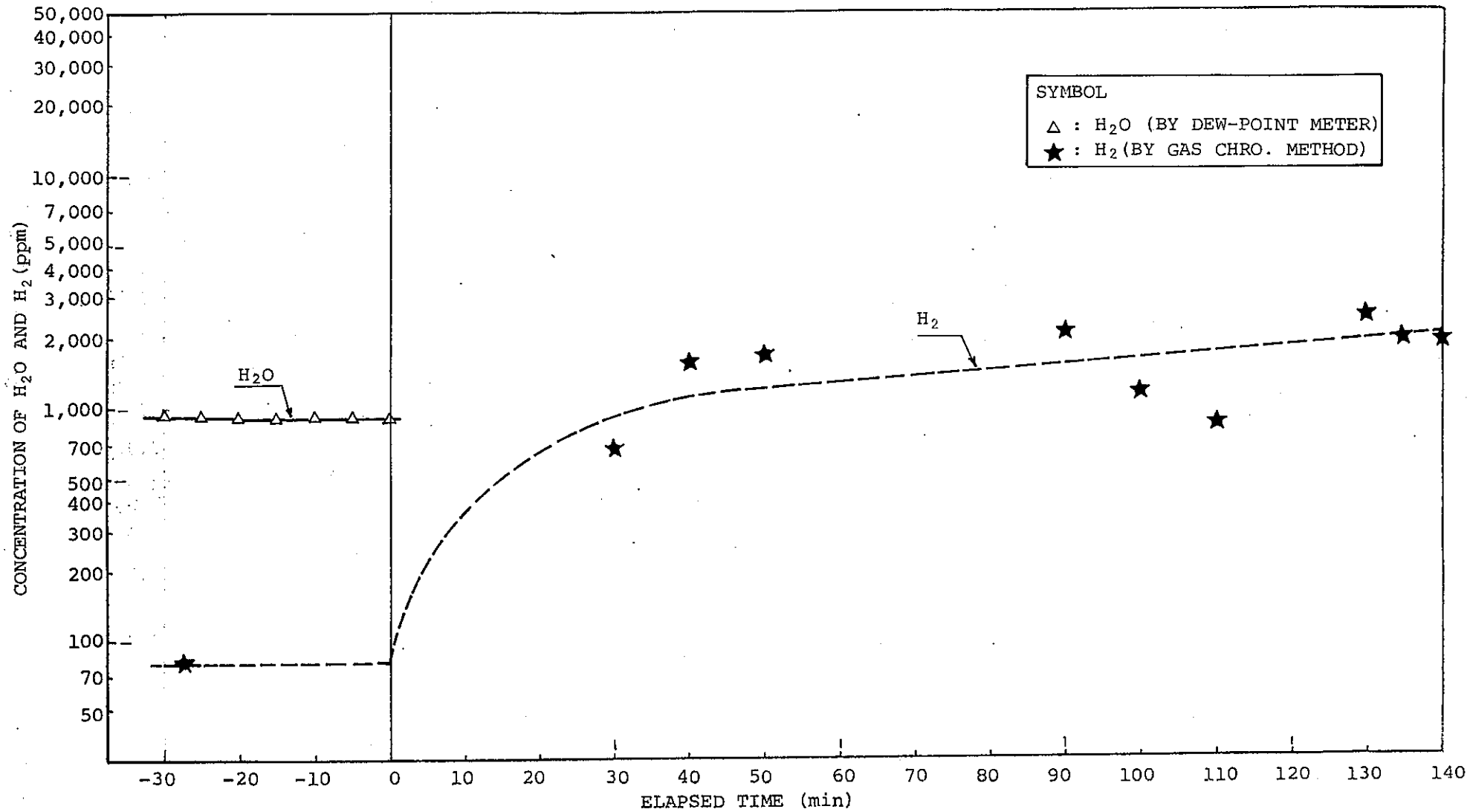
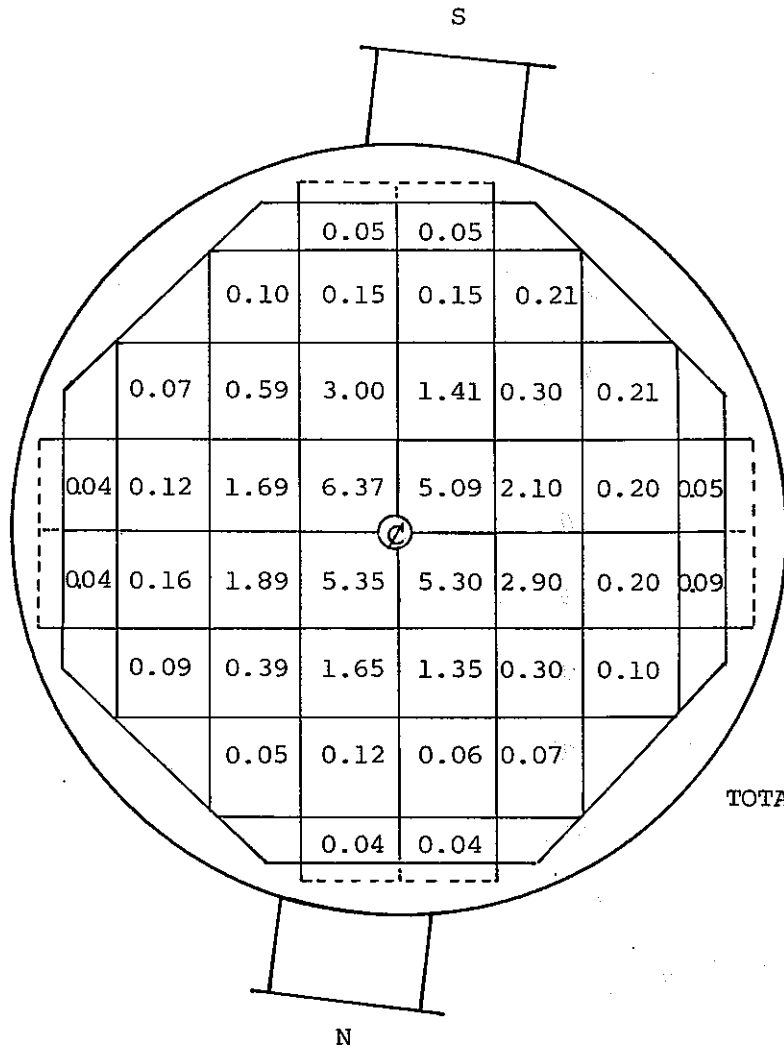


Fig.5.1(7) TASP-N1 Data ; Gas concentration



TOTAL WEIGHT : 42.05 kg

Fig.5.1(8) TASP-N1 Data ; Weight of Contents in Catching Pan After Test

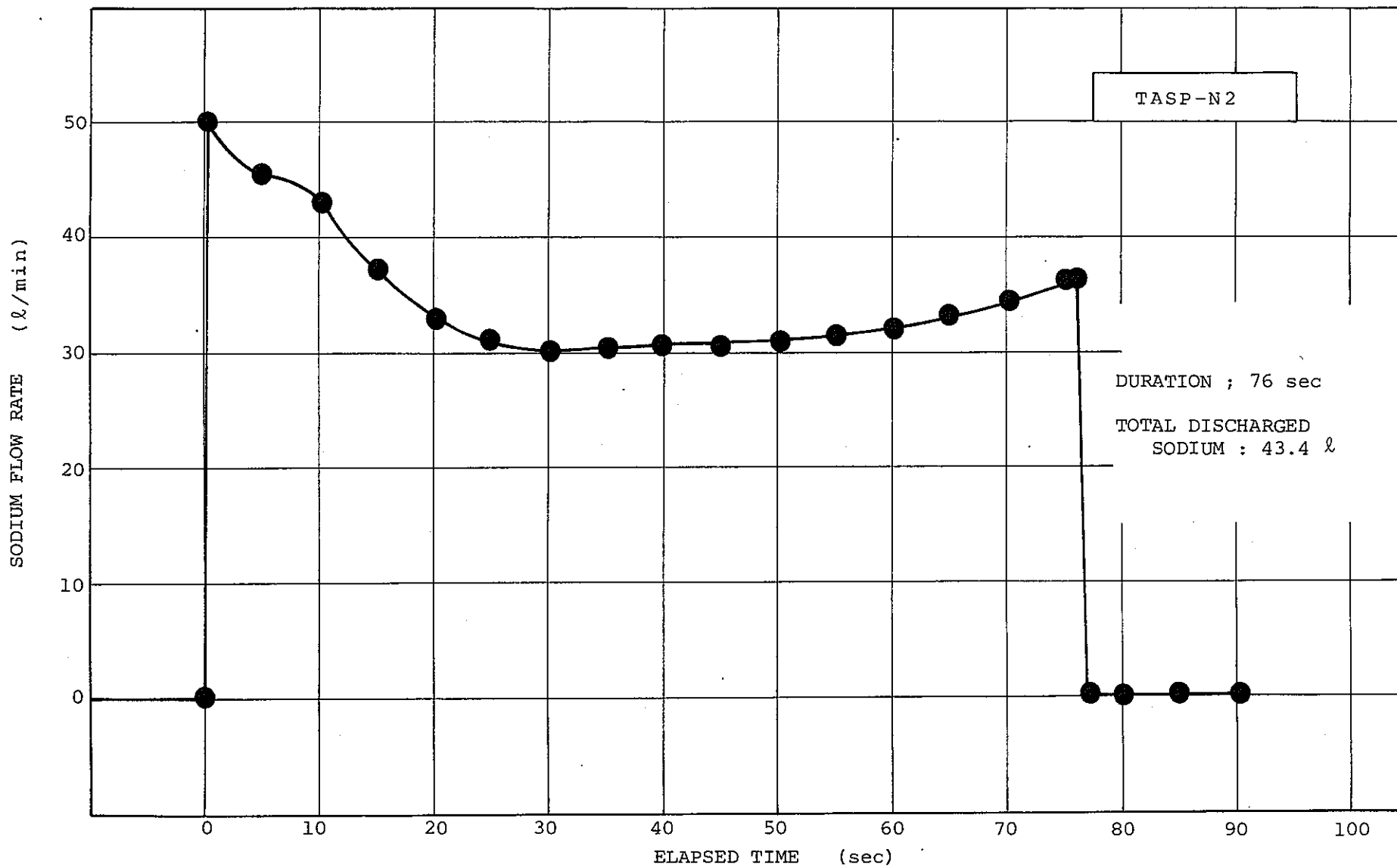


Fig.5.2(1) TASP-N2, Data ; Sodium Discharge Flow Rate

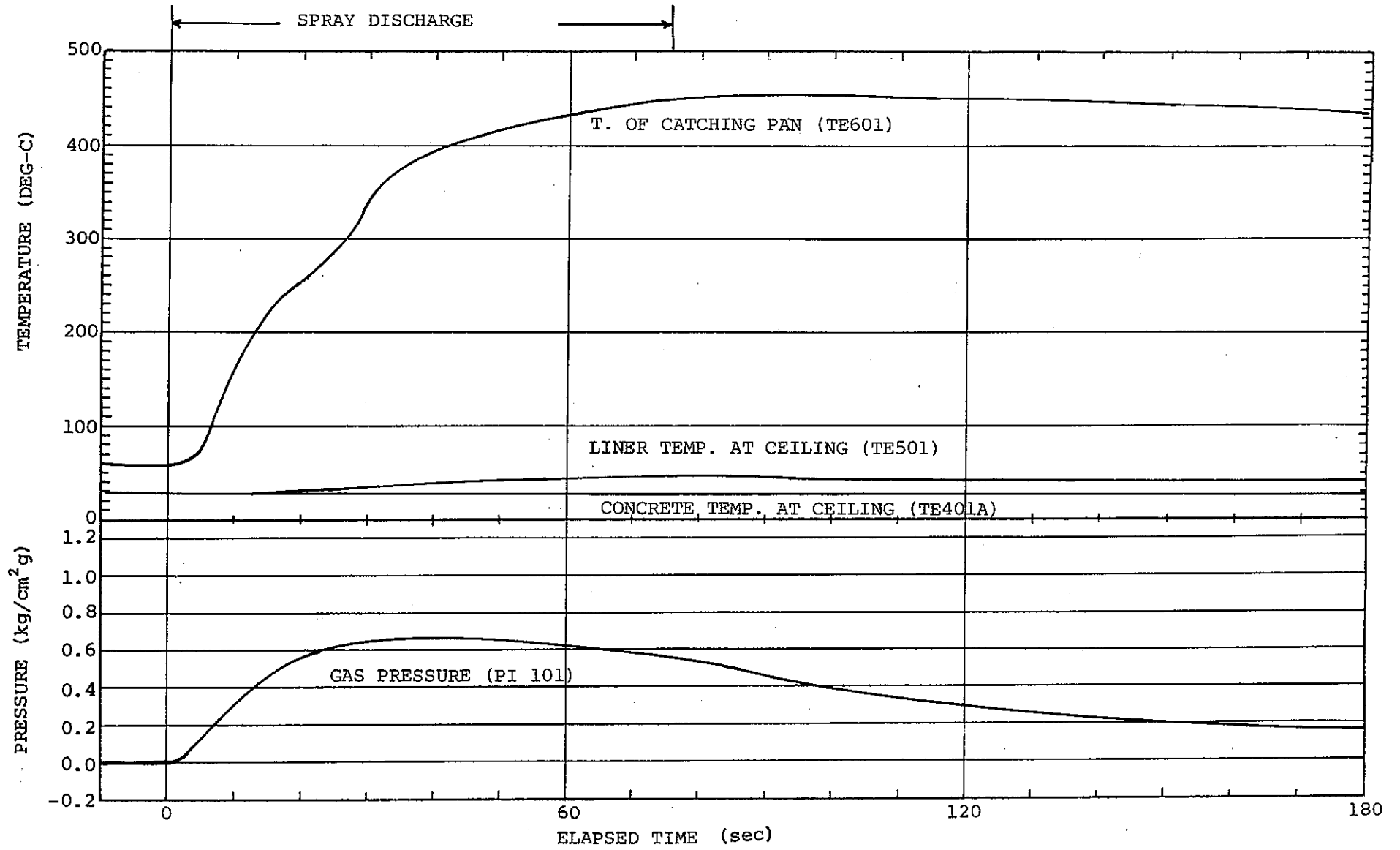


Fig.5.2(2) TASP-N2 Data ; Pressure and Temperature Response

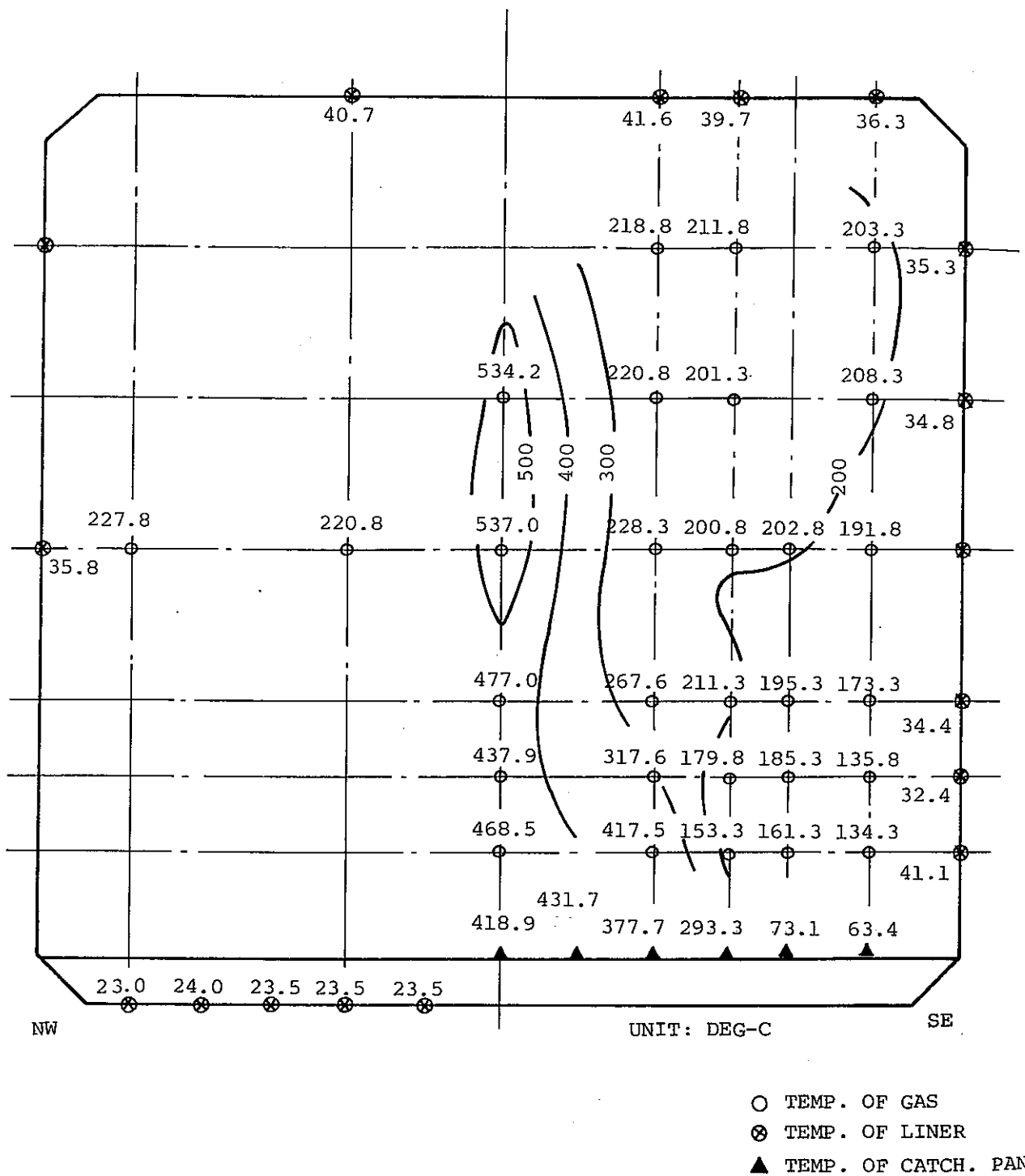


Fig.5.2(3) TASP-N2 Data ; Temperature Distribution
 (Elapsed Time = 50 sec)

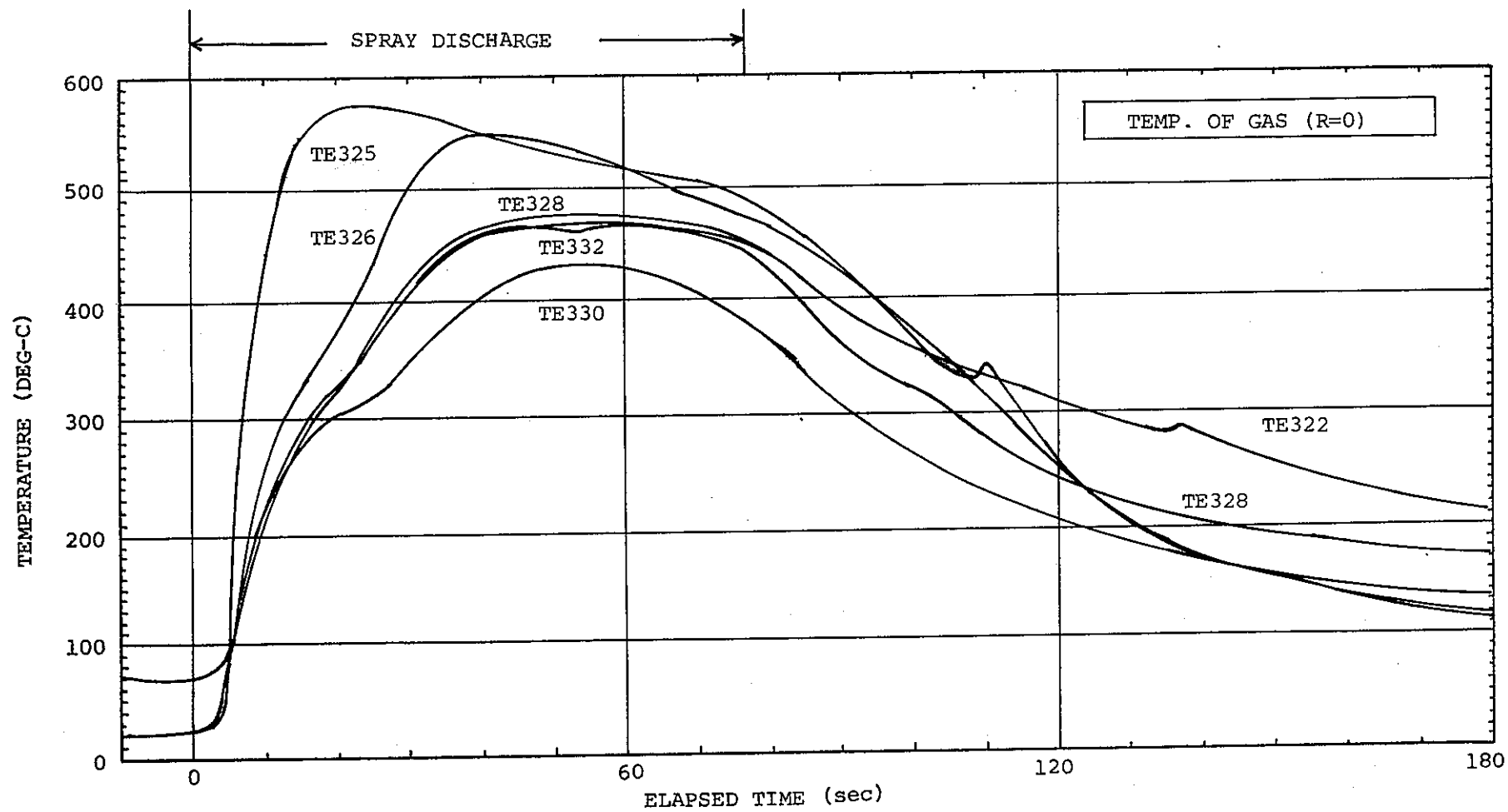


Fig.5.2(4) TASP-N2 Data ; Gas Temperature

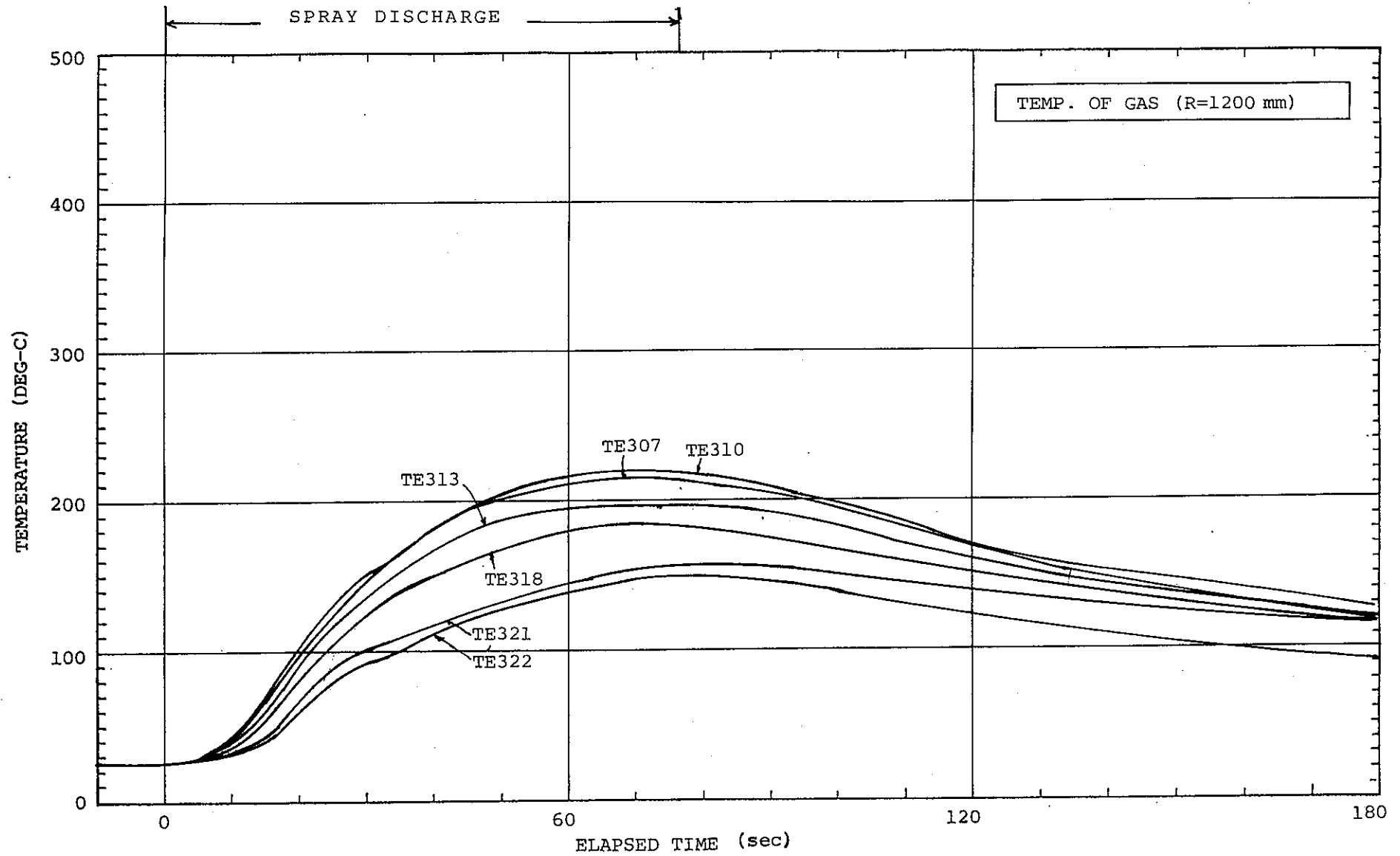


Fig.5.2(5) TASP-N2 Data ; Gas Temperature

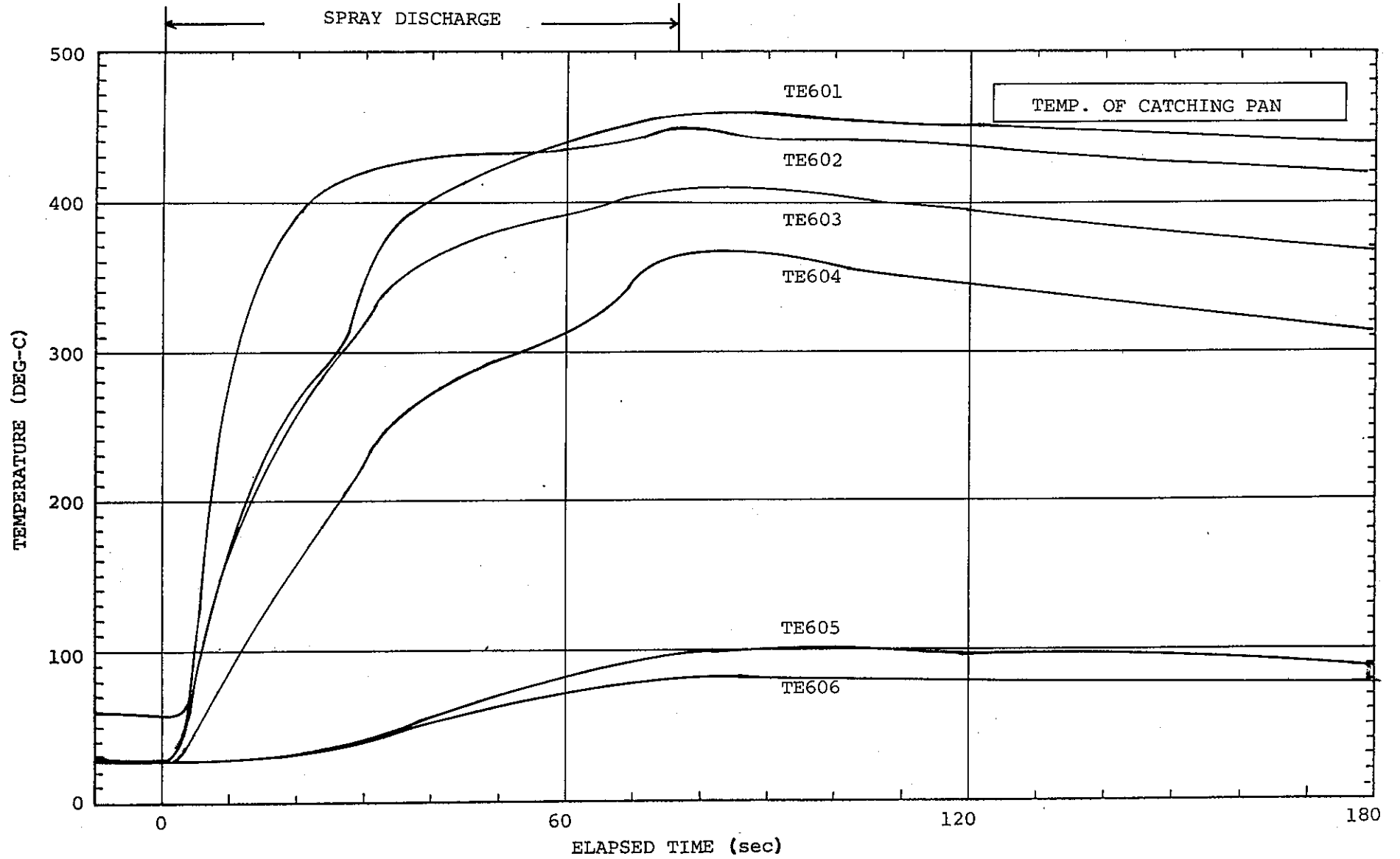


Fig.5.2(6) TASP-N2 Data ; Temperature of Catching Pan

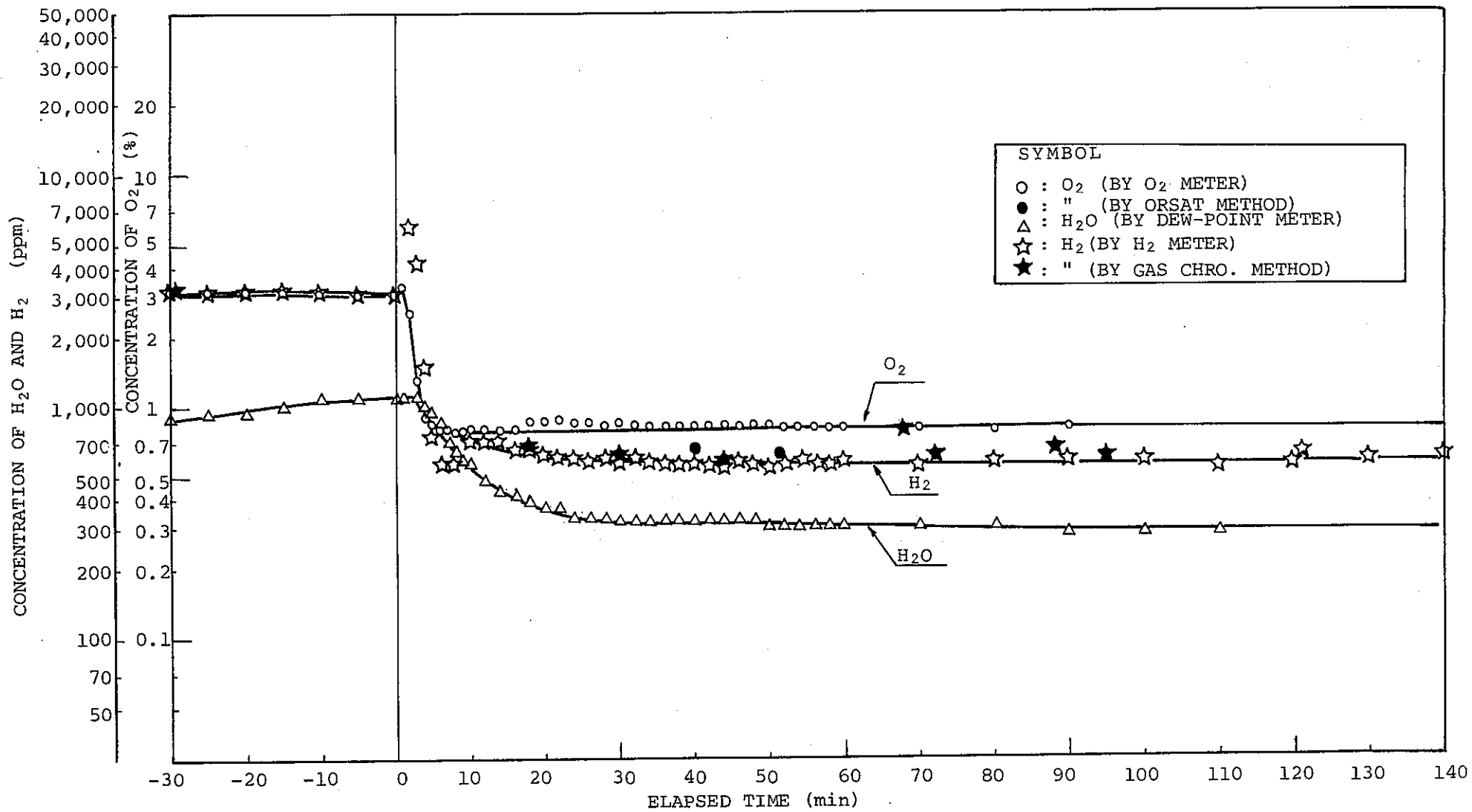


Fig.5.2(7) TASP-N2 Data ; Gas Concentration

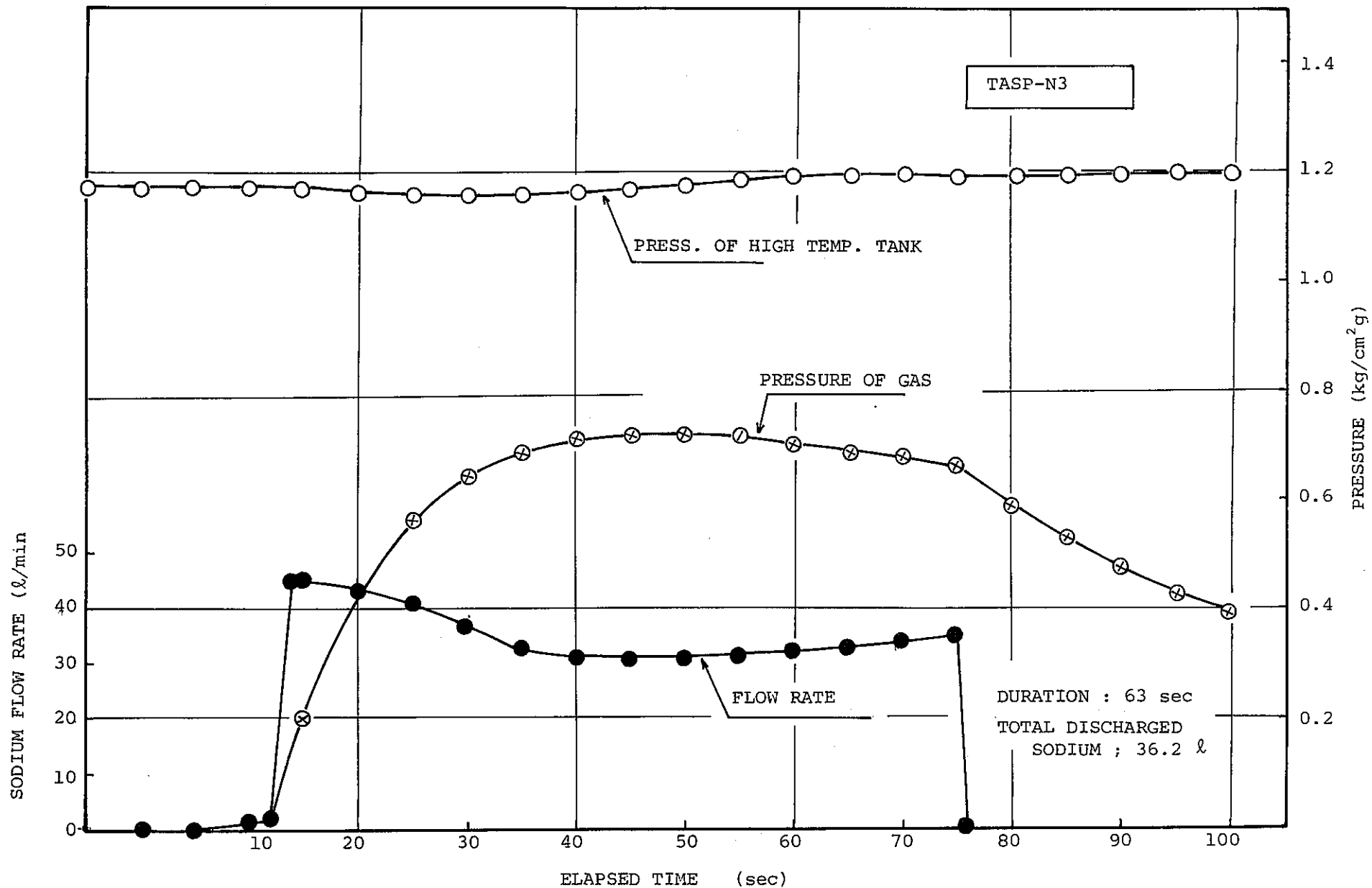


Fig.5.3(1) TASP-N3 Data ; Sodium Discharge Flow Rate

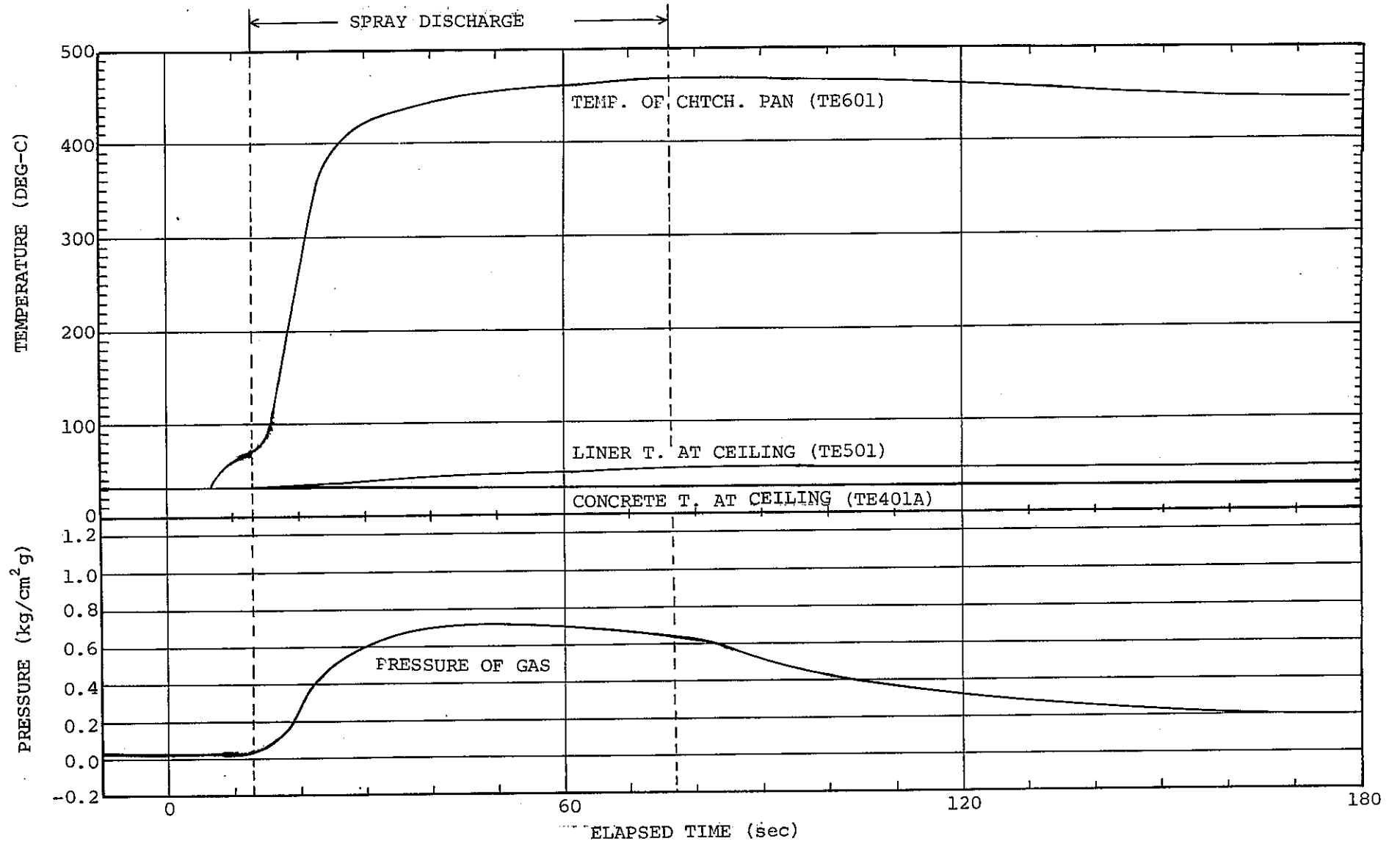


Fig.5.3(2) TASP-N3 Data ; Pressure and Temperature Response

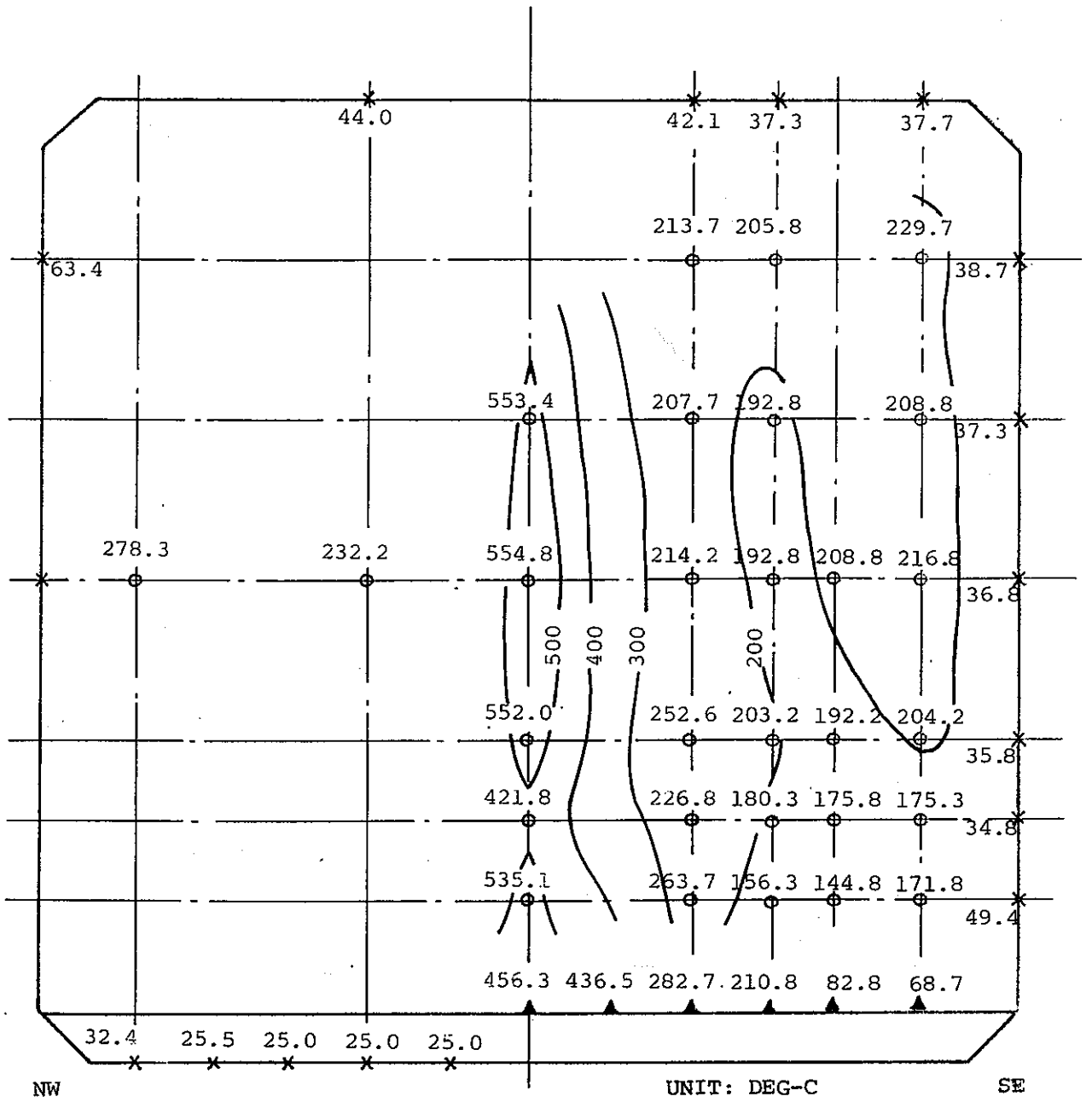


Fig.5.3(3) TASP-N3 Data ; Temperature Distribution
(Elapsed Time = 50 sec)

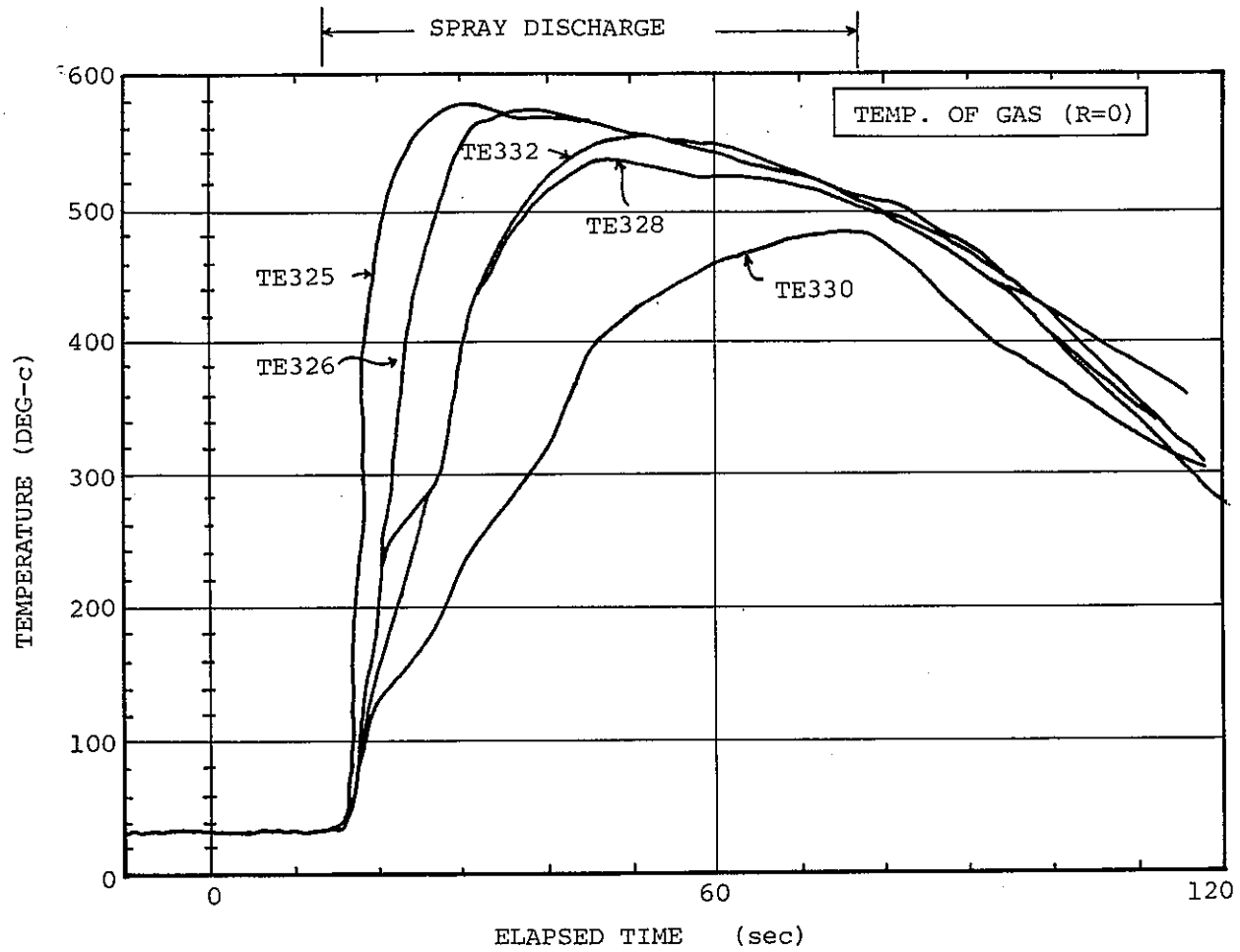


Fig.5.3(4) : TASP-N3 Data : Gas Temperature

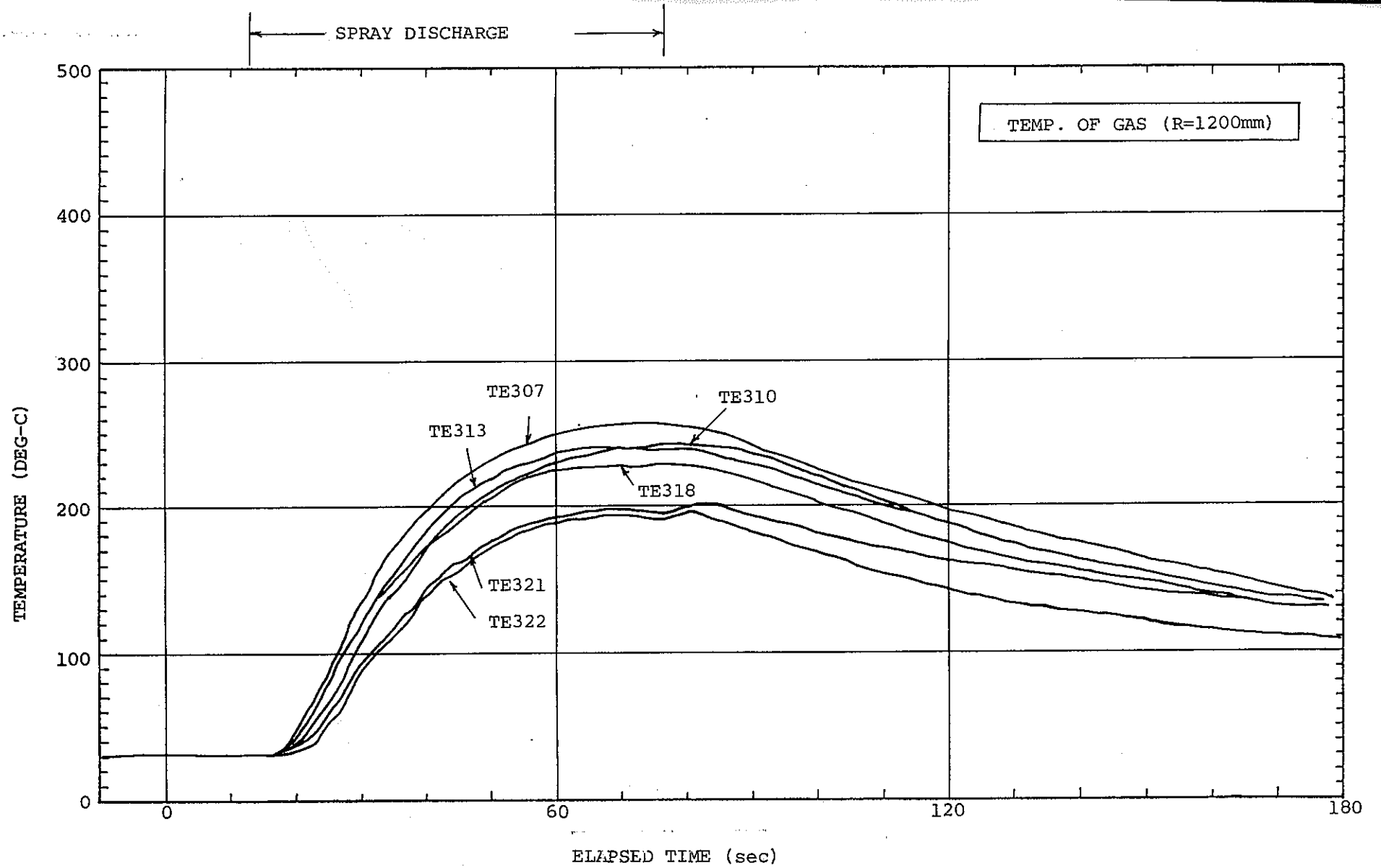


Fig.5.3(5) TASP-N3 Data ; Gas Temperature

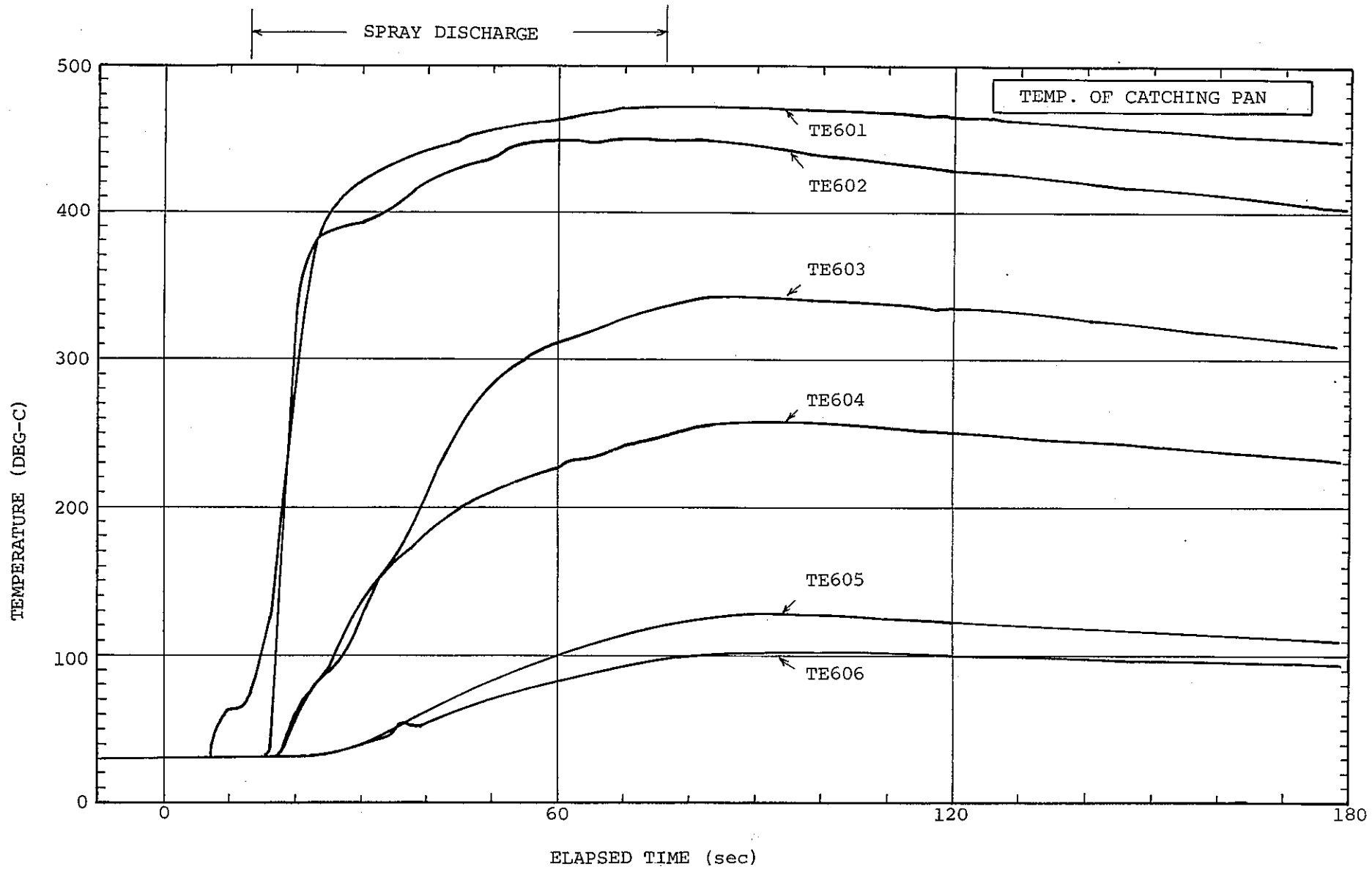


Fig.5.3(6) TASP-N3 Data ; Gas Temperature

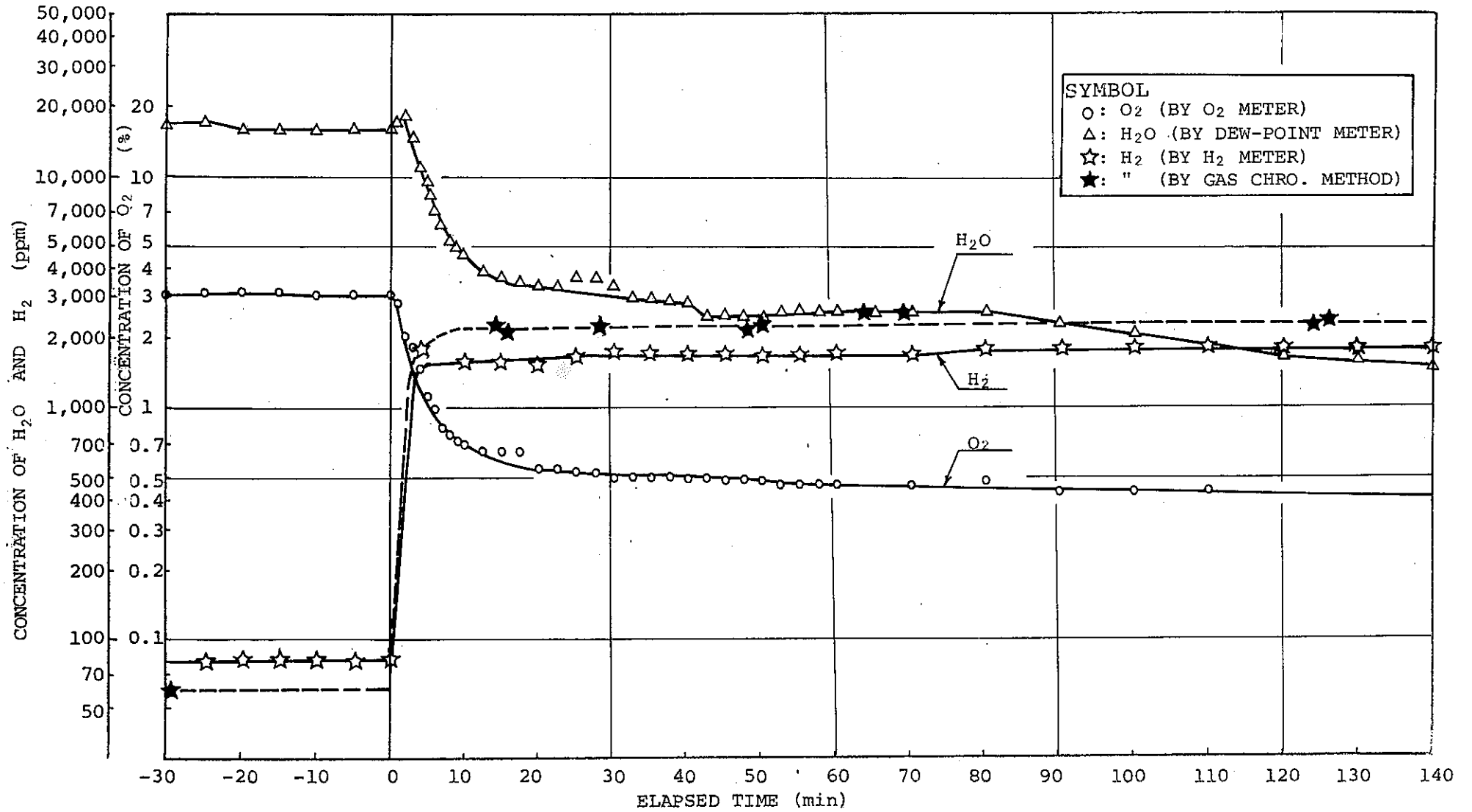


Fig.5.3(7) TASP-N3 Data ; Gas Concentration

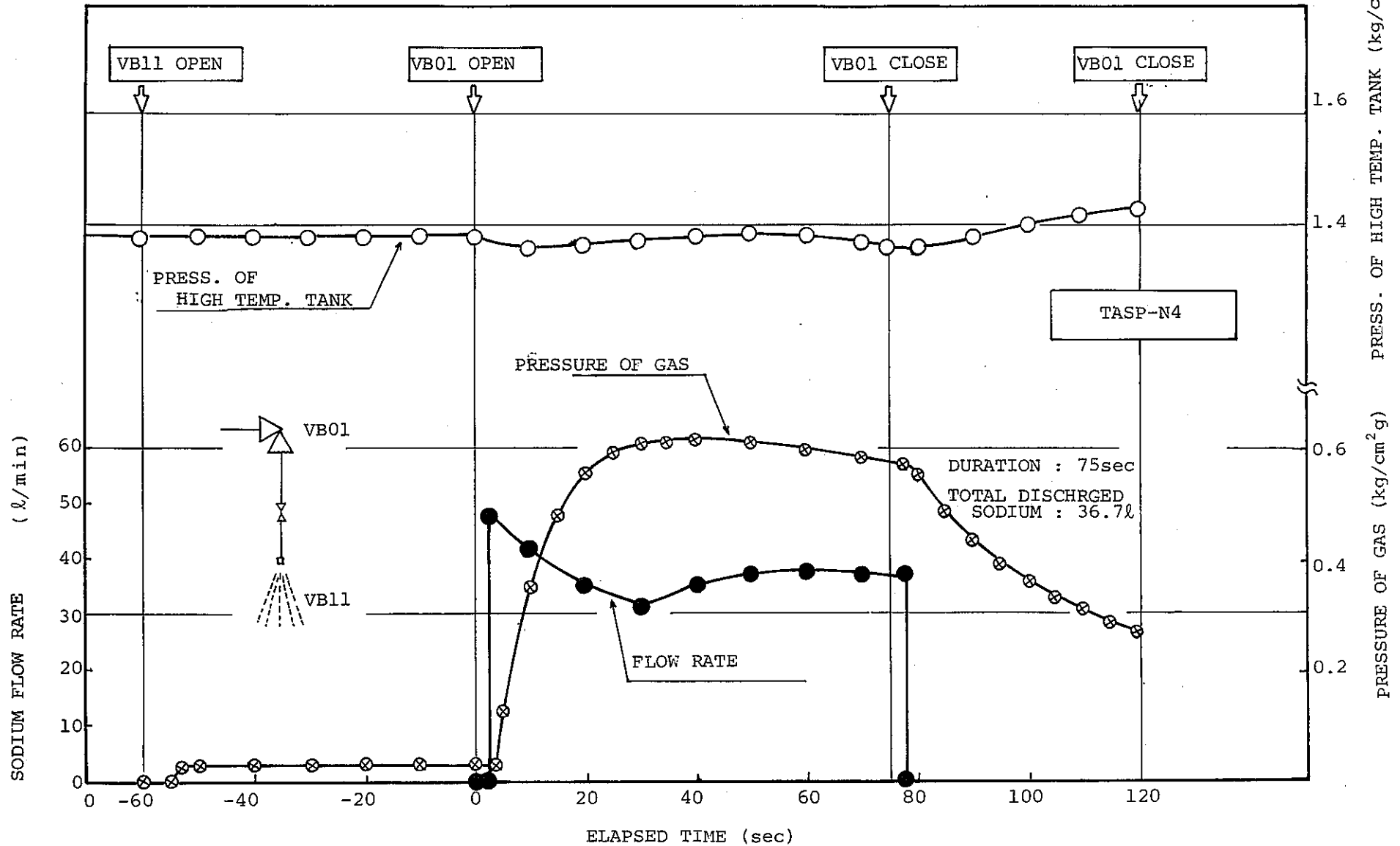


Fig.5.4(1) TASP-N4 Data ; Sodium Discharge Flow Rate

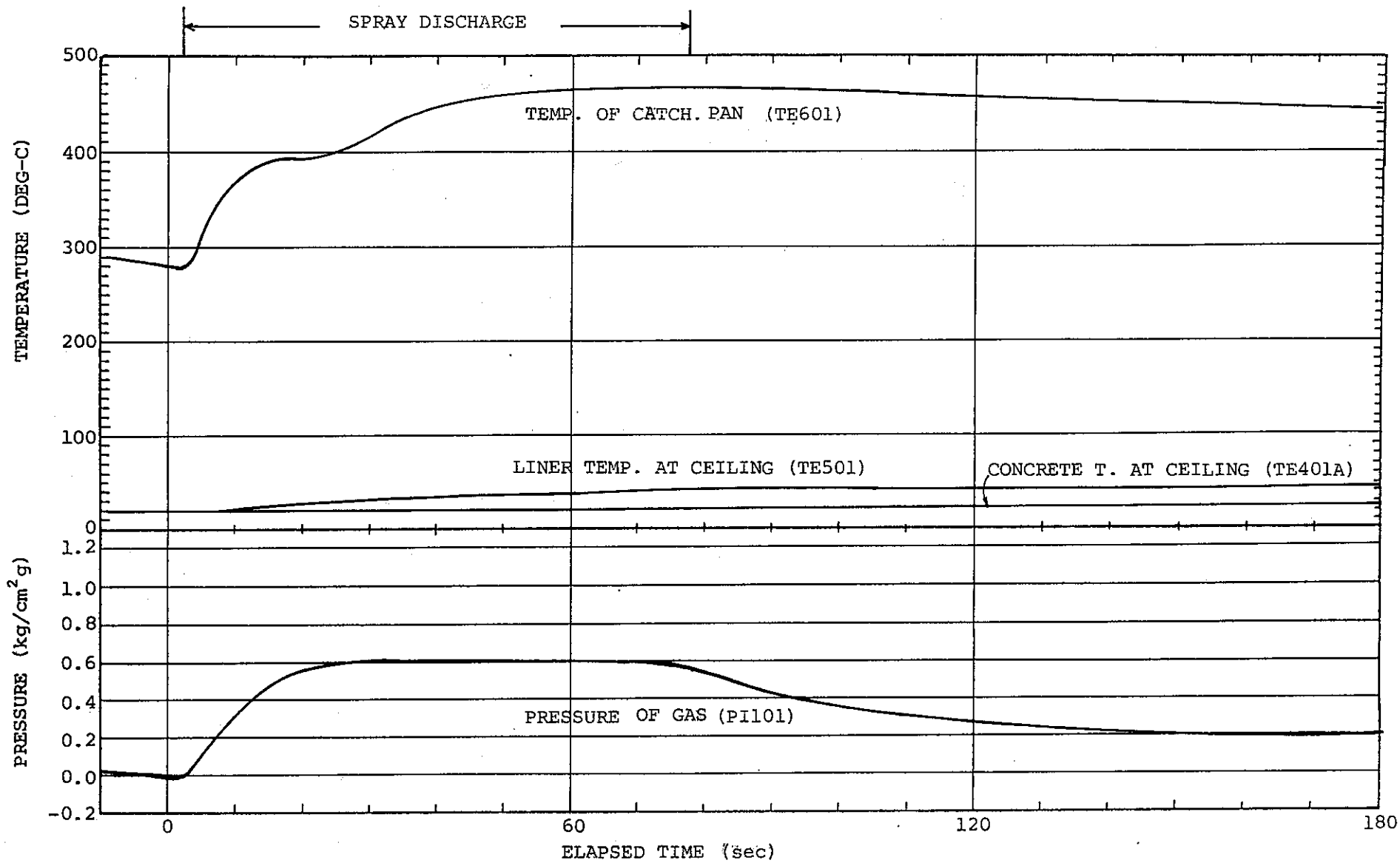


Fig.5.4(2) TASP-N4 Data : Pressure and Temperature Response

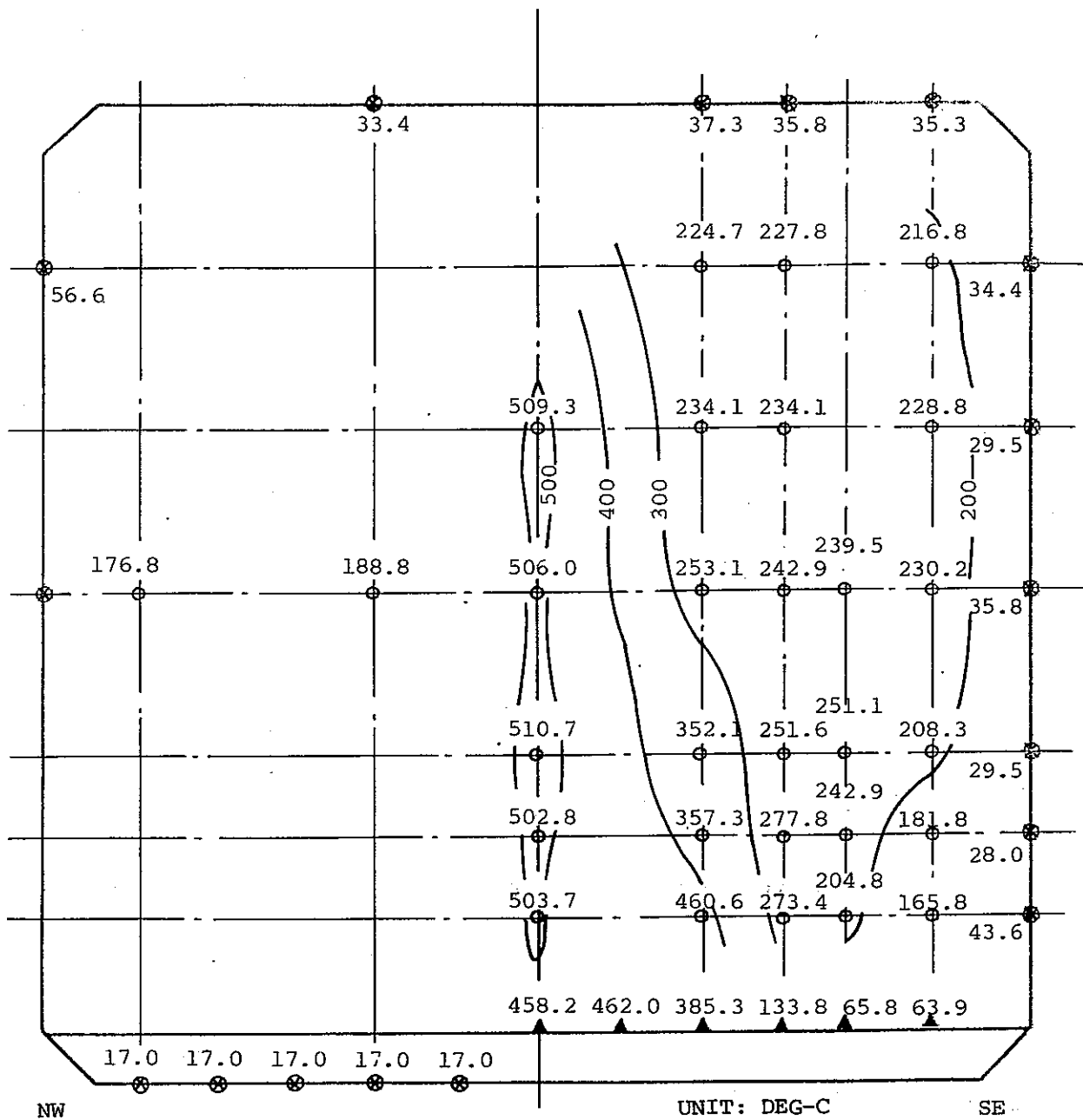


Fig.5.4(3) TASP-N4 Data ; Temperature Distribution

(Elapsed Time = 50 sec)

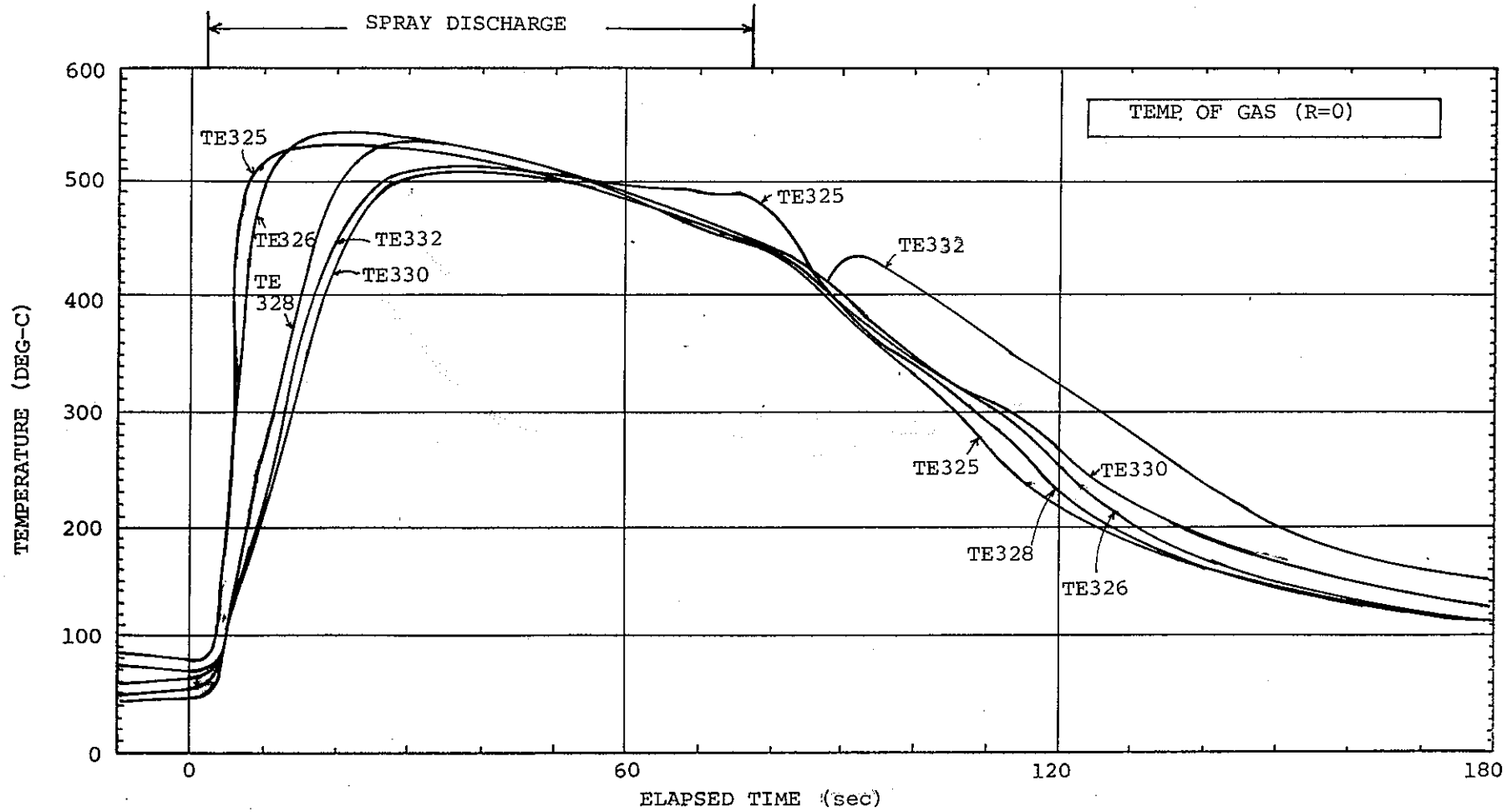


Fig.5.4(4) TASP-N4 Data ; Gas Temperature

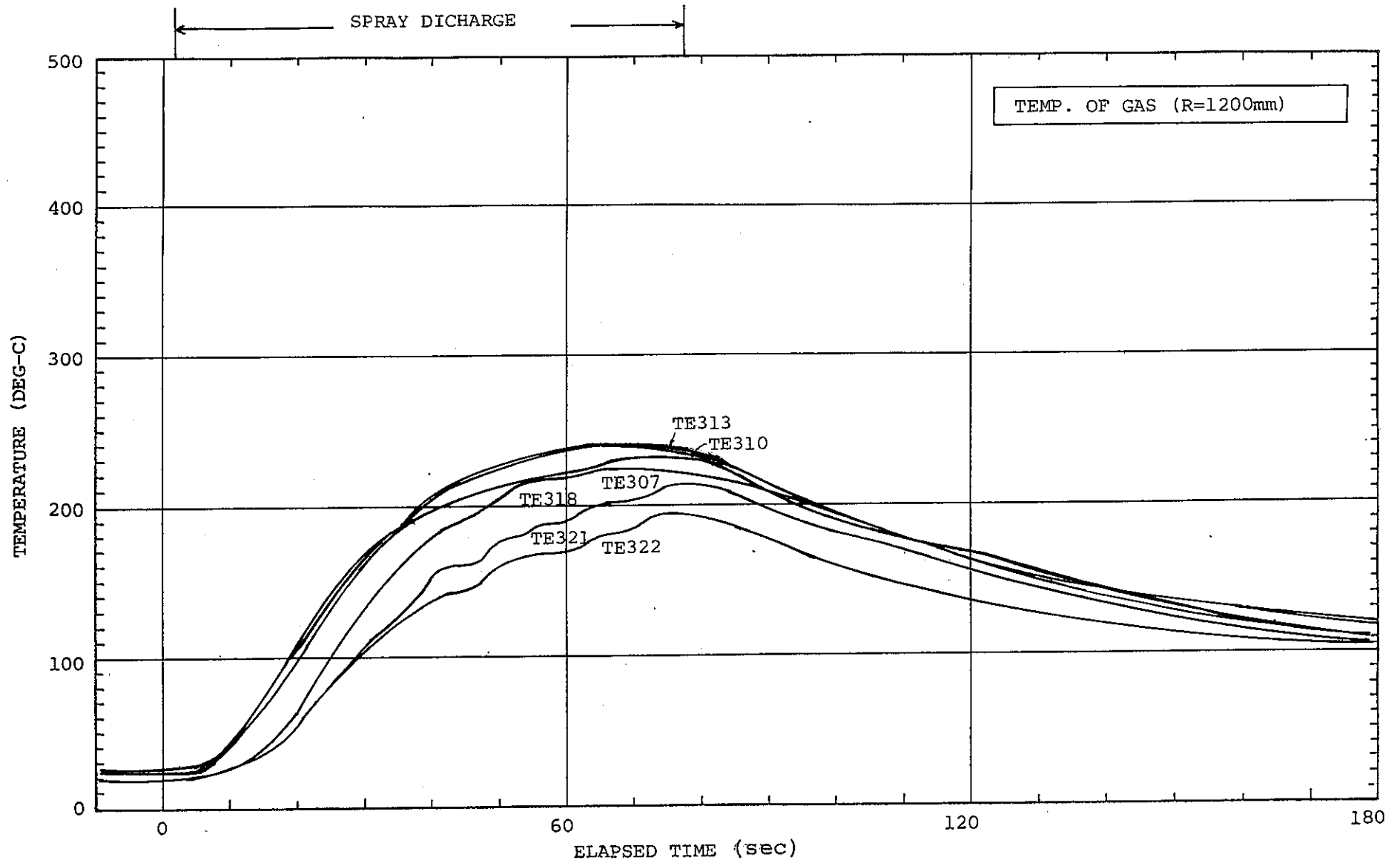


Fig.5.4(5) TASP-N4 Data ; Gas Temperature

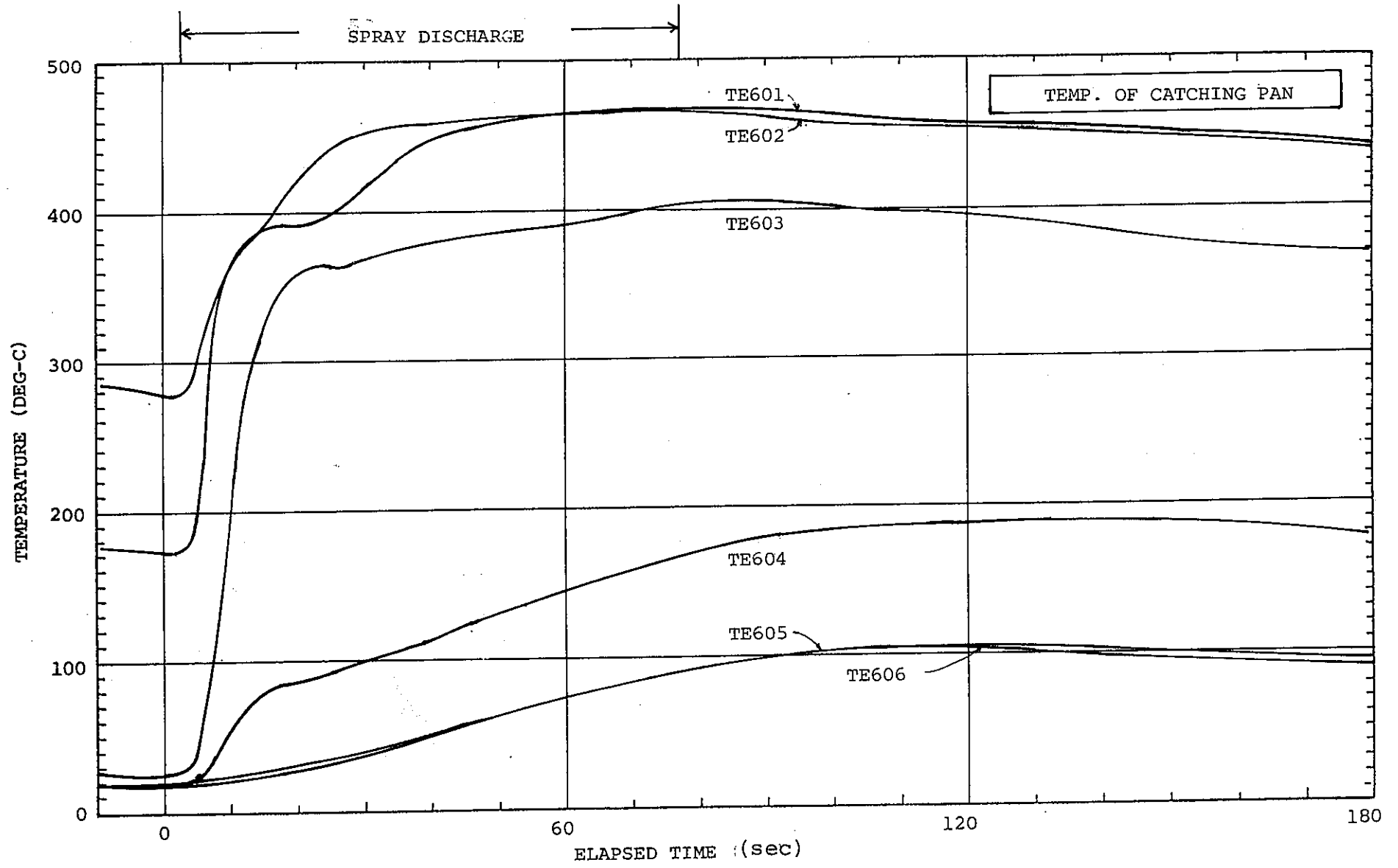


Fig.5.4(6) TASP-N4 Data : Temperature of CVtching Pan

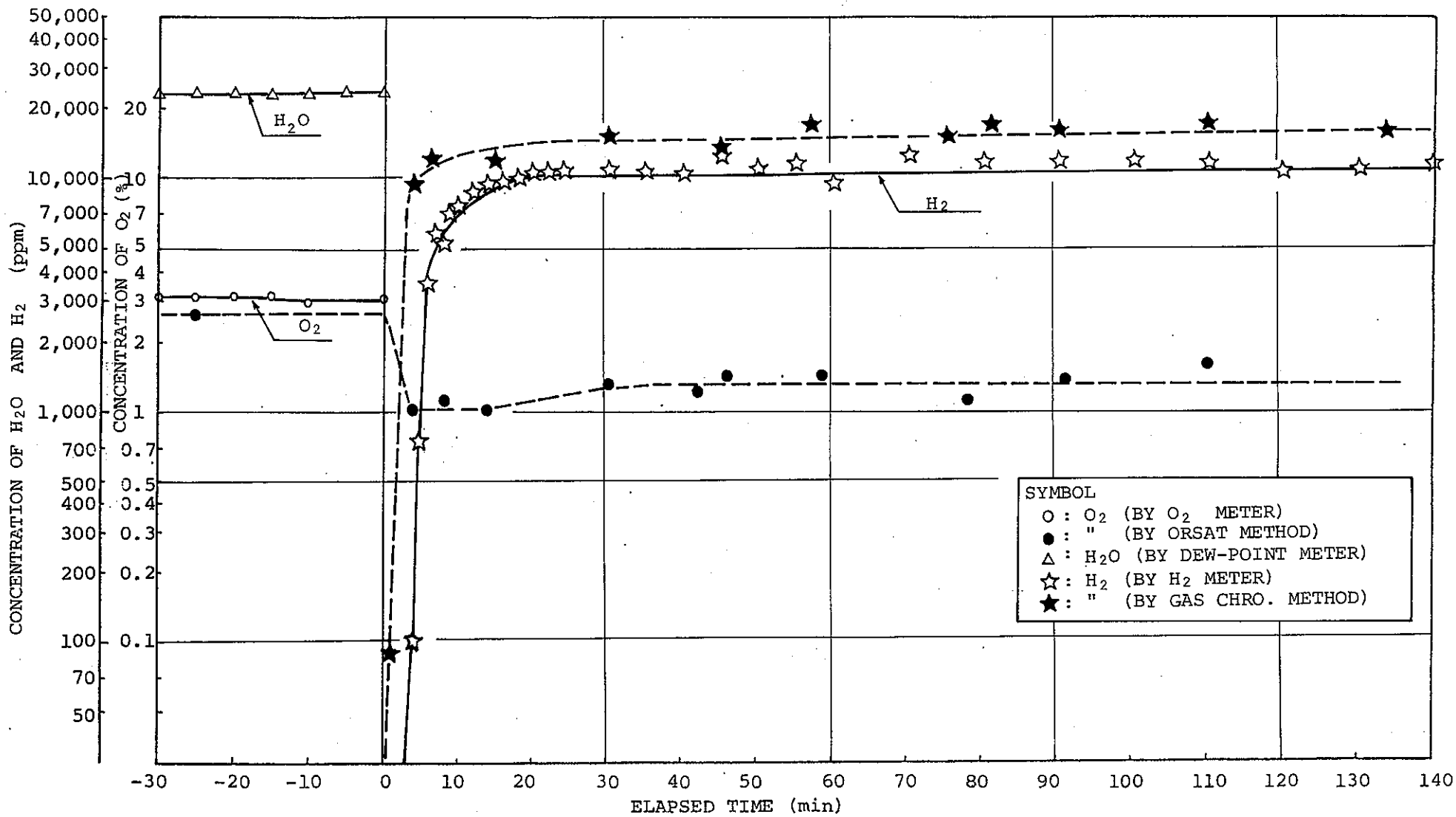


Fig.5.4(7) TASP-N4 Data ; Gas Concentration

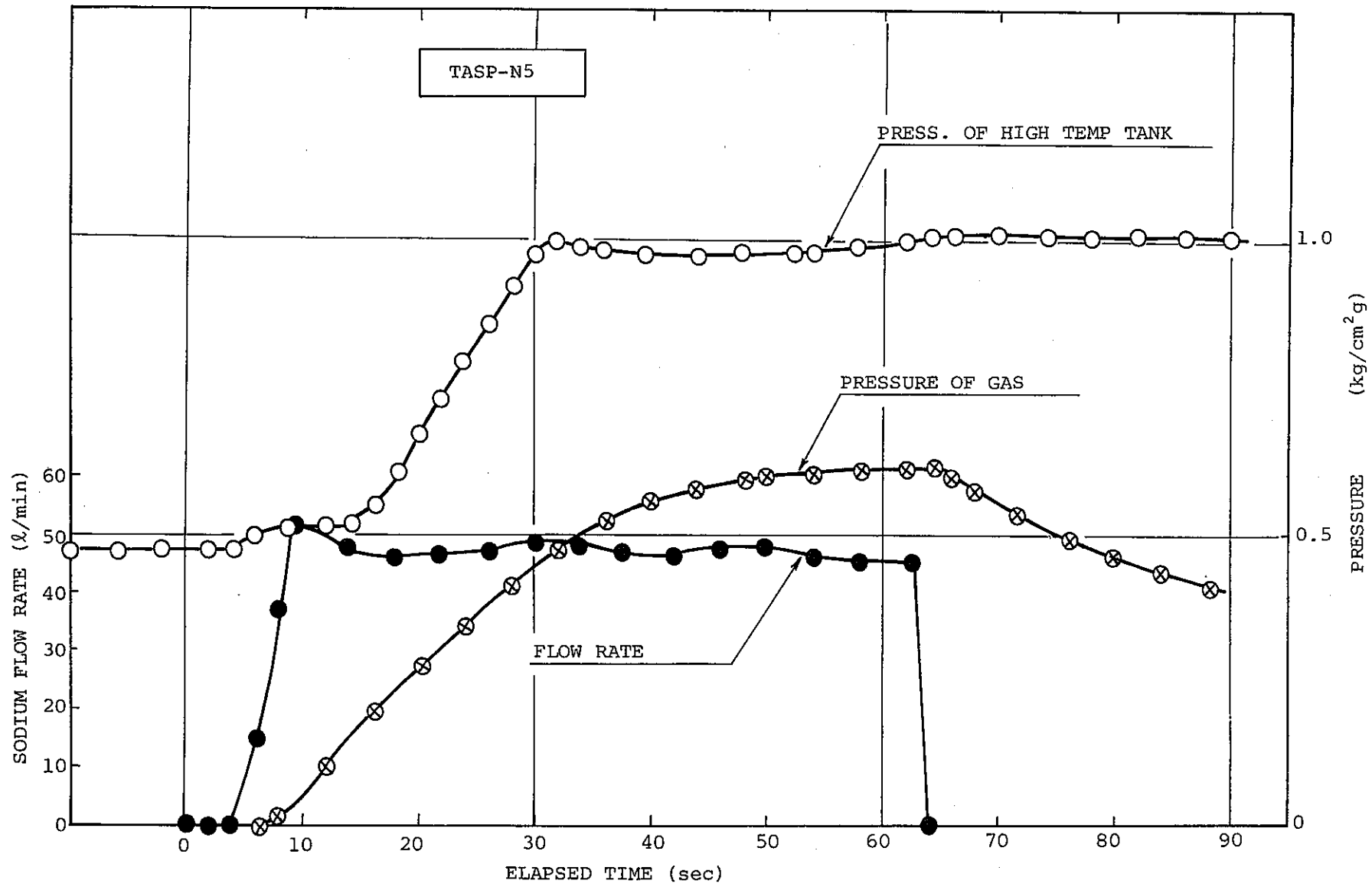


Fig.5.5(1) TASP-N5 Data ; Sodium Discharge Flow Rate

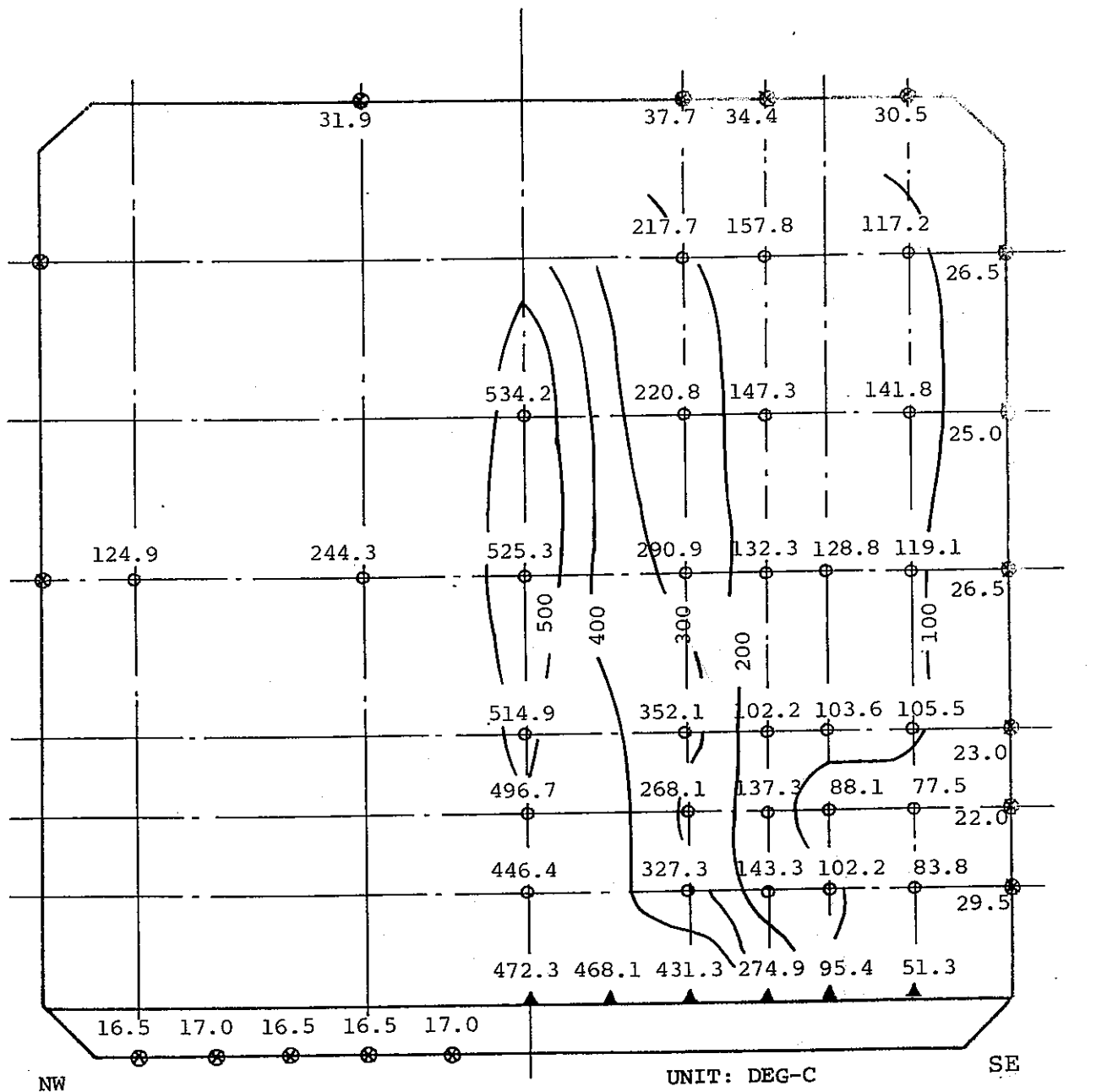


Fig.5.5(3) TASP-N5 Data ; Temperature Distribution

(Elapsed Time = 50 sec)

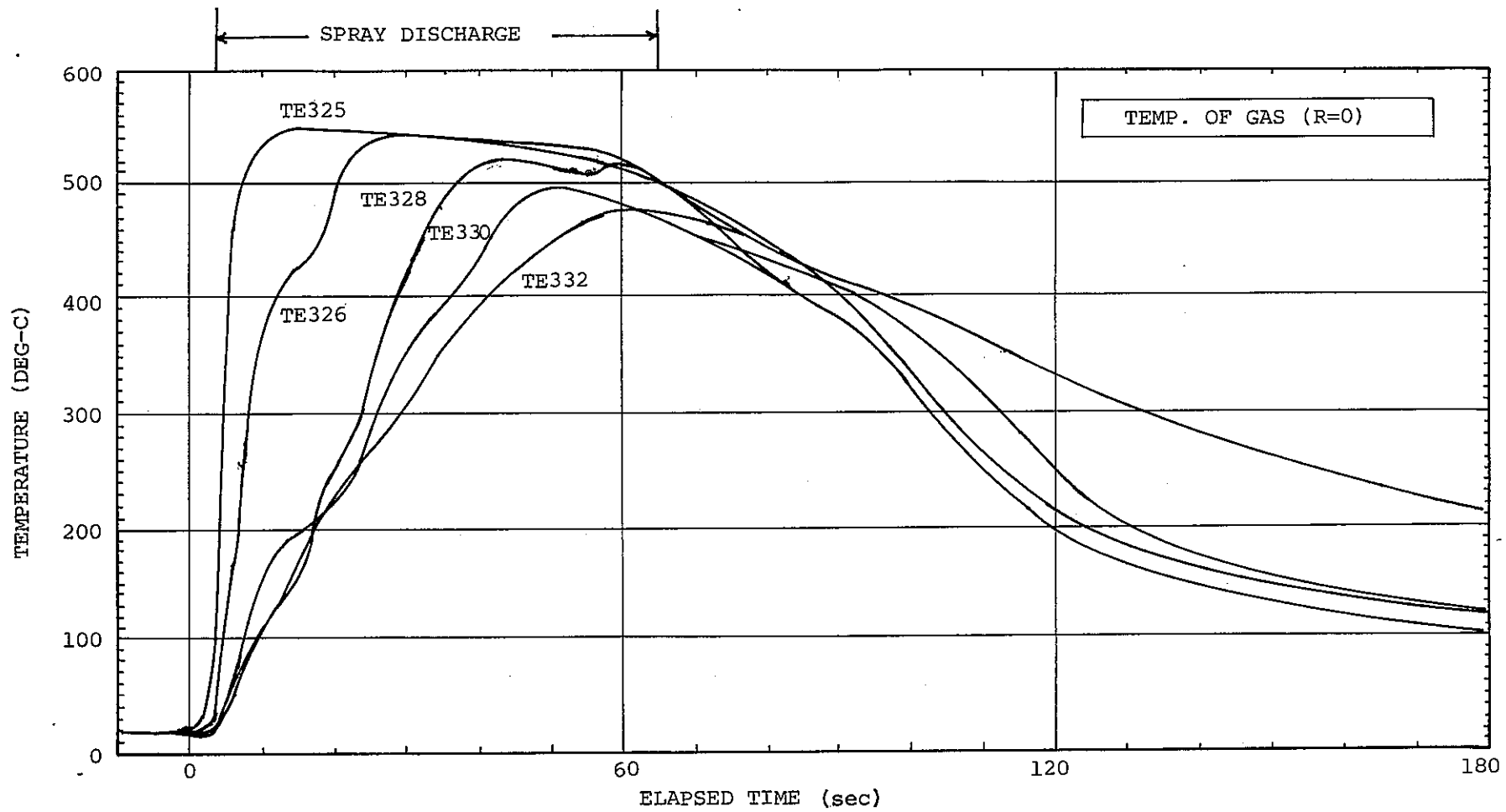


Fig.5.5(4) TASP-N5 Data ; Gas Temperature

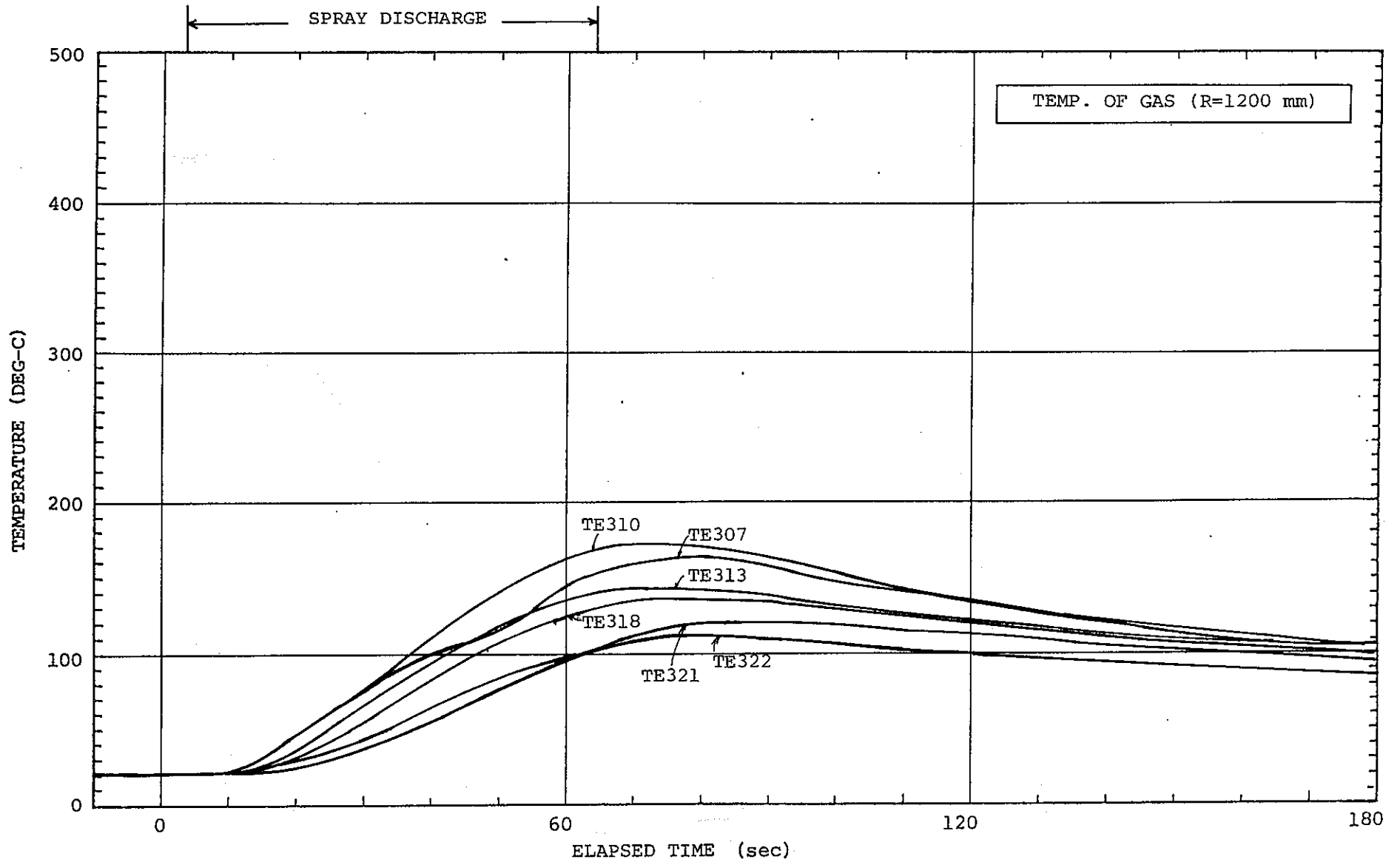


Fig.5.5(5) TASP-N5 Data ; Gas Temperature

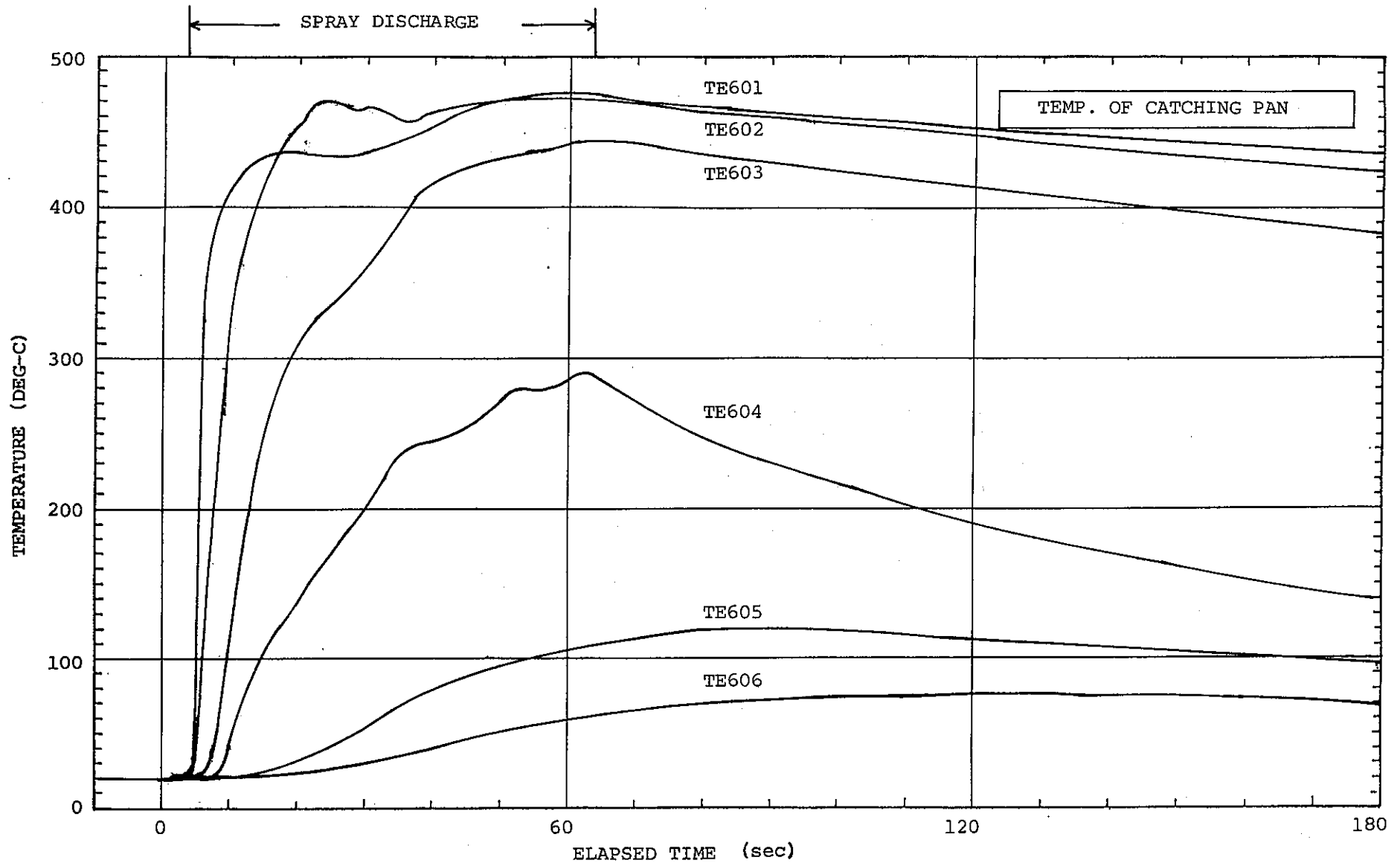


Fig.5.5(6) TASP-N5 Data ; Temperature of CRTching

H₂O AND N₂ CONCENTRATION (ppm)
1,0 2,0 3,0 5,0 10,00 20,00 30,00 50,000

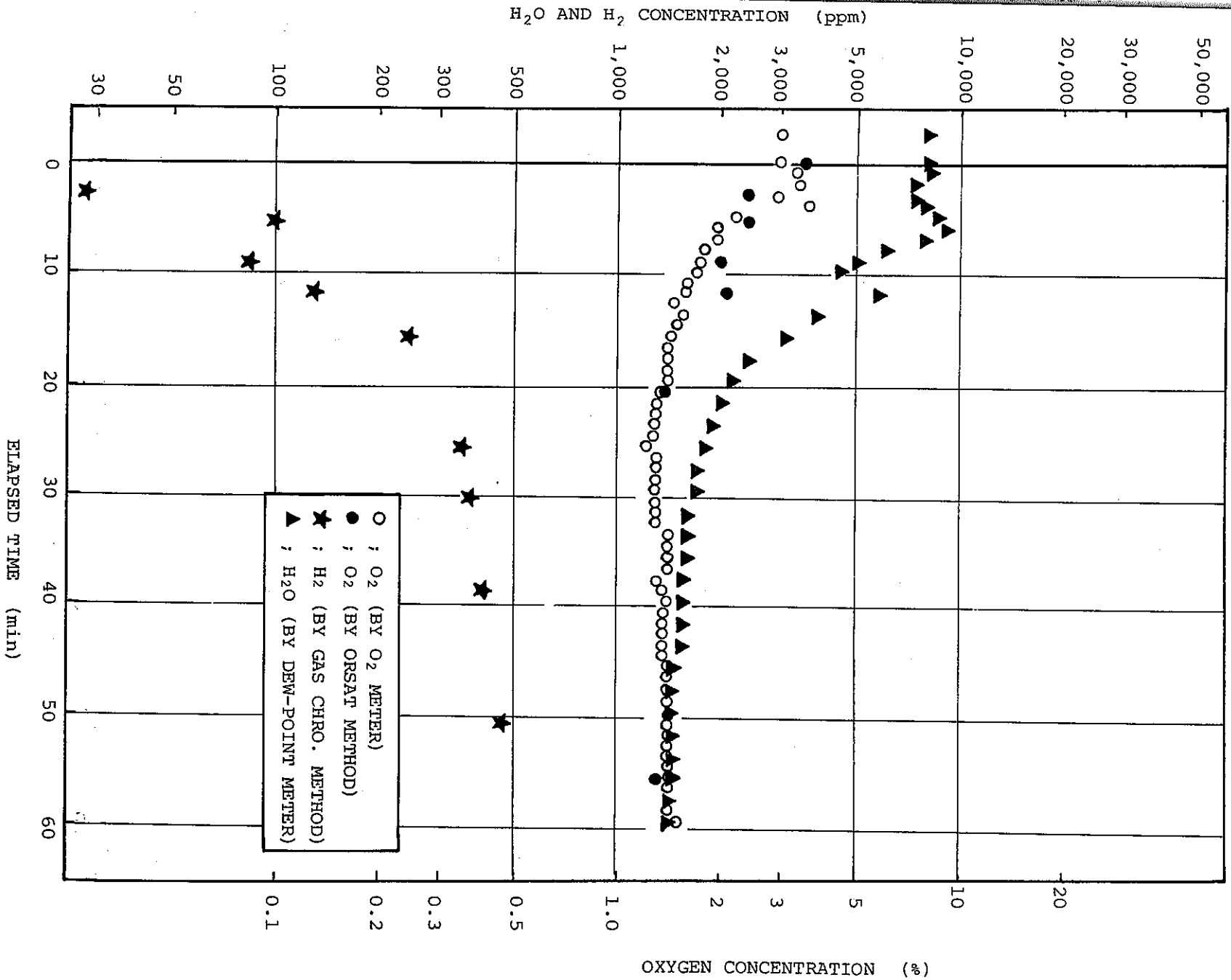


Fig. 5.5(7) TASP-N5 Data ; Gas Concentration

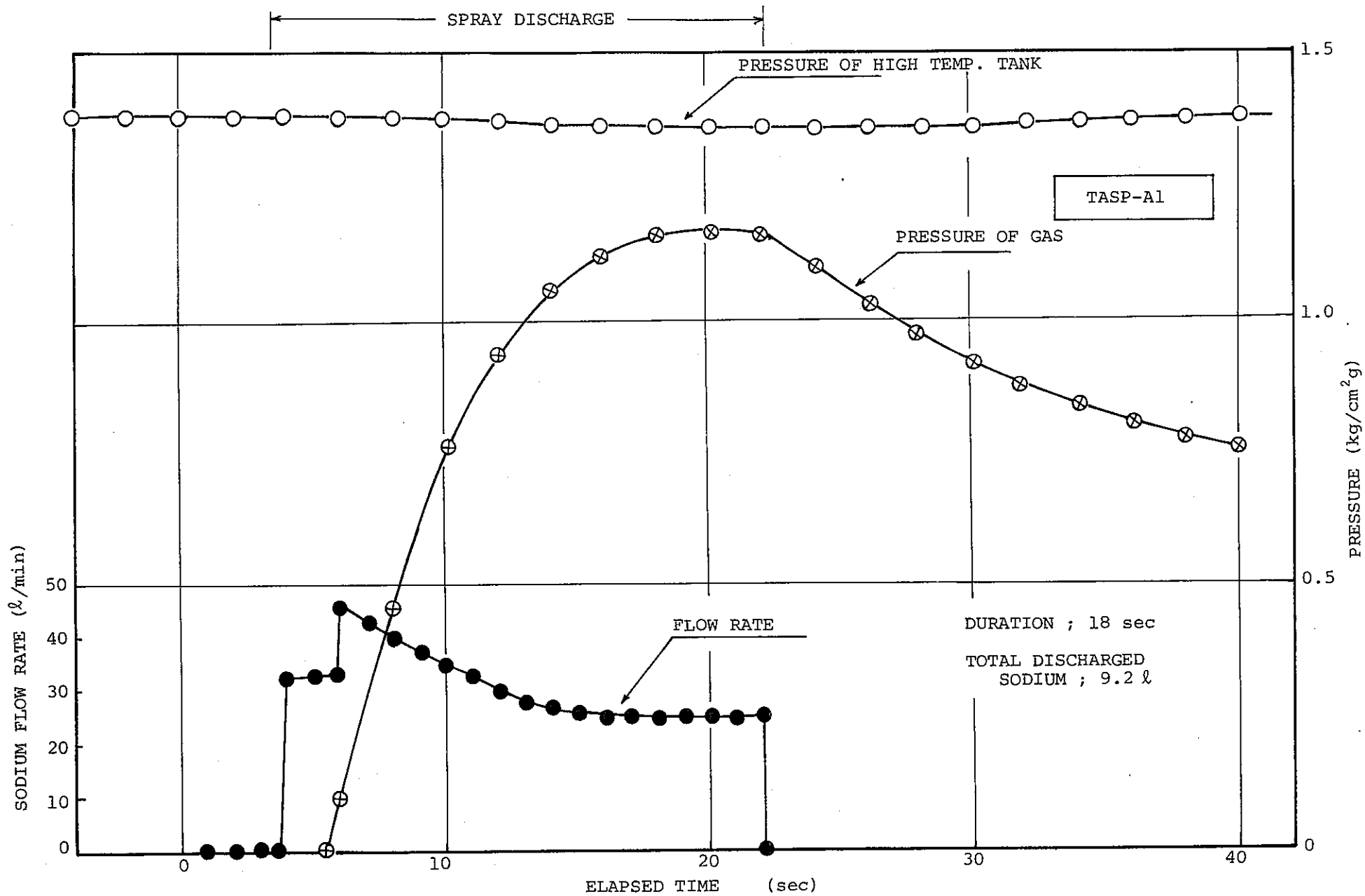
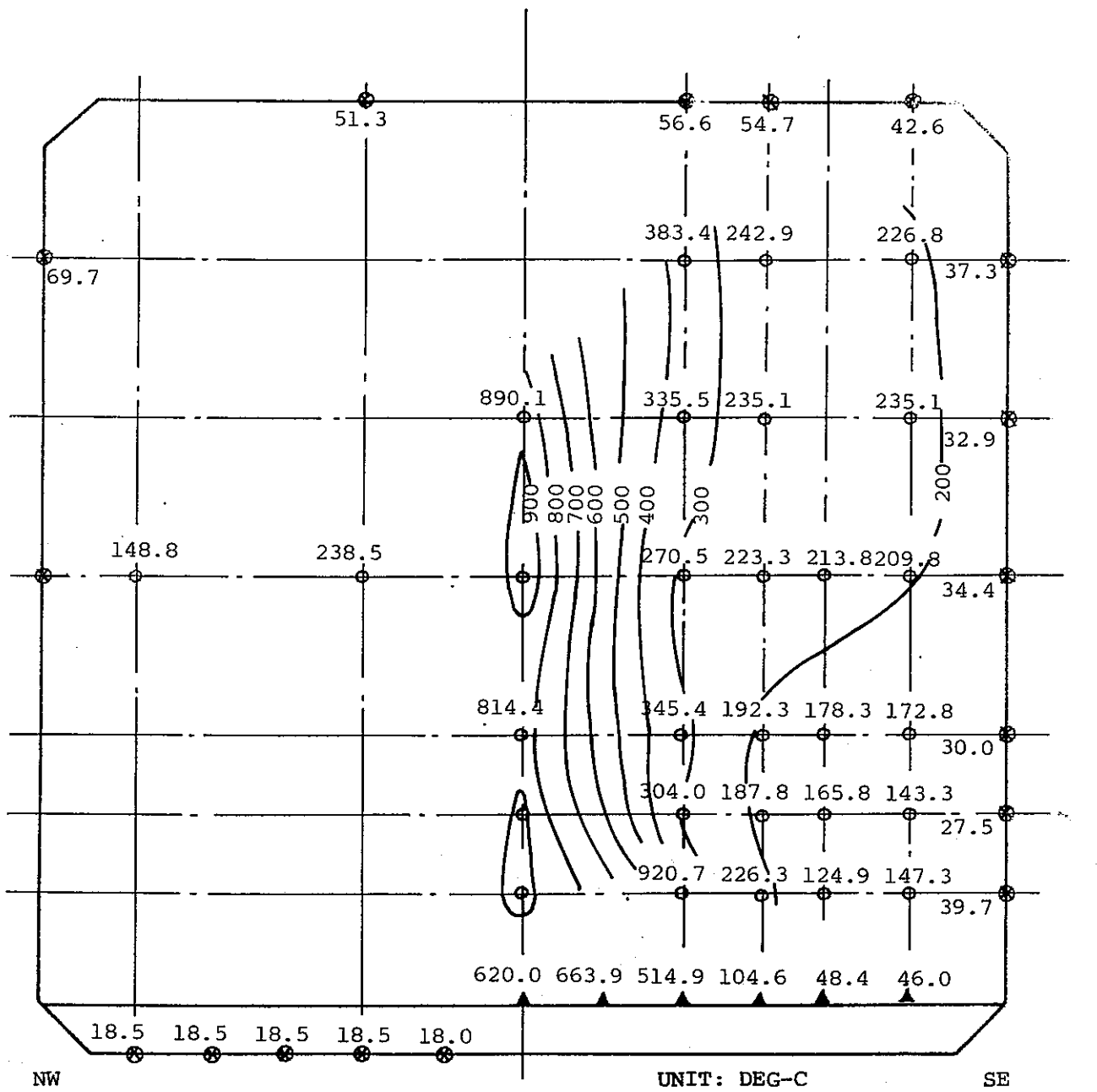


Fig.5.6(1) TASP-A1 Data ; Sodium Discharge Flow Rate



- TEMP. OF GAS
- ⊗ TEMP. OF LINER
- ▲ TEMP. OF CATCH. PAN

Fig.5.6(2) TASP-A1 Data ; Temperature Distribution
(Elapsed Time = 20 sec)

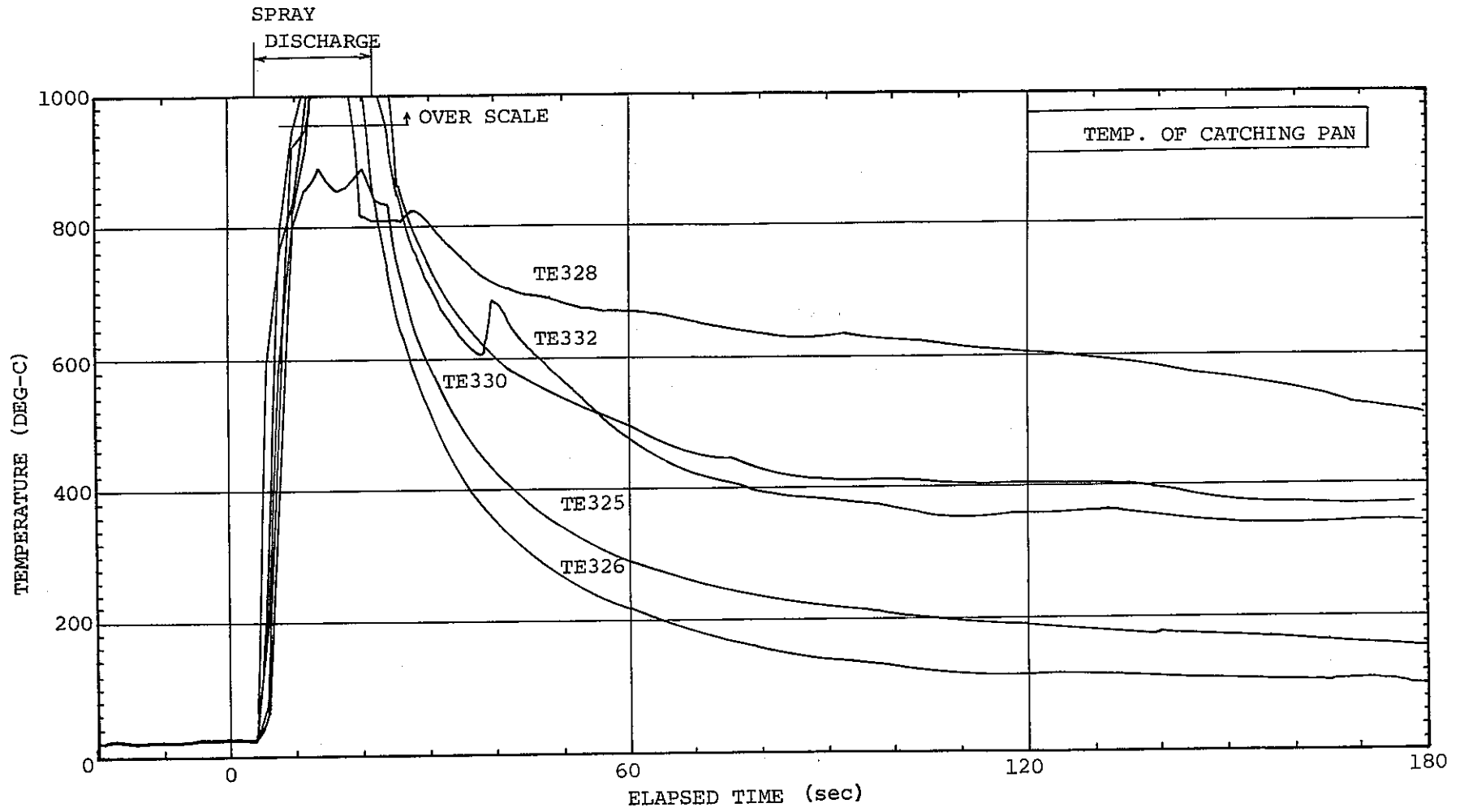


Fig.5.6(3) TASP-A1 Data ; Gas Temperature

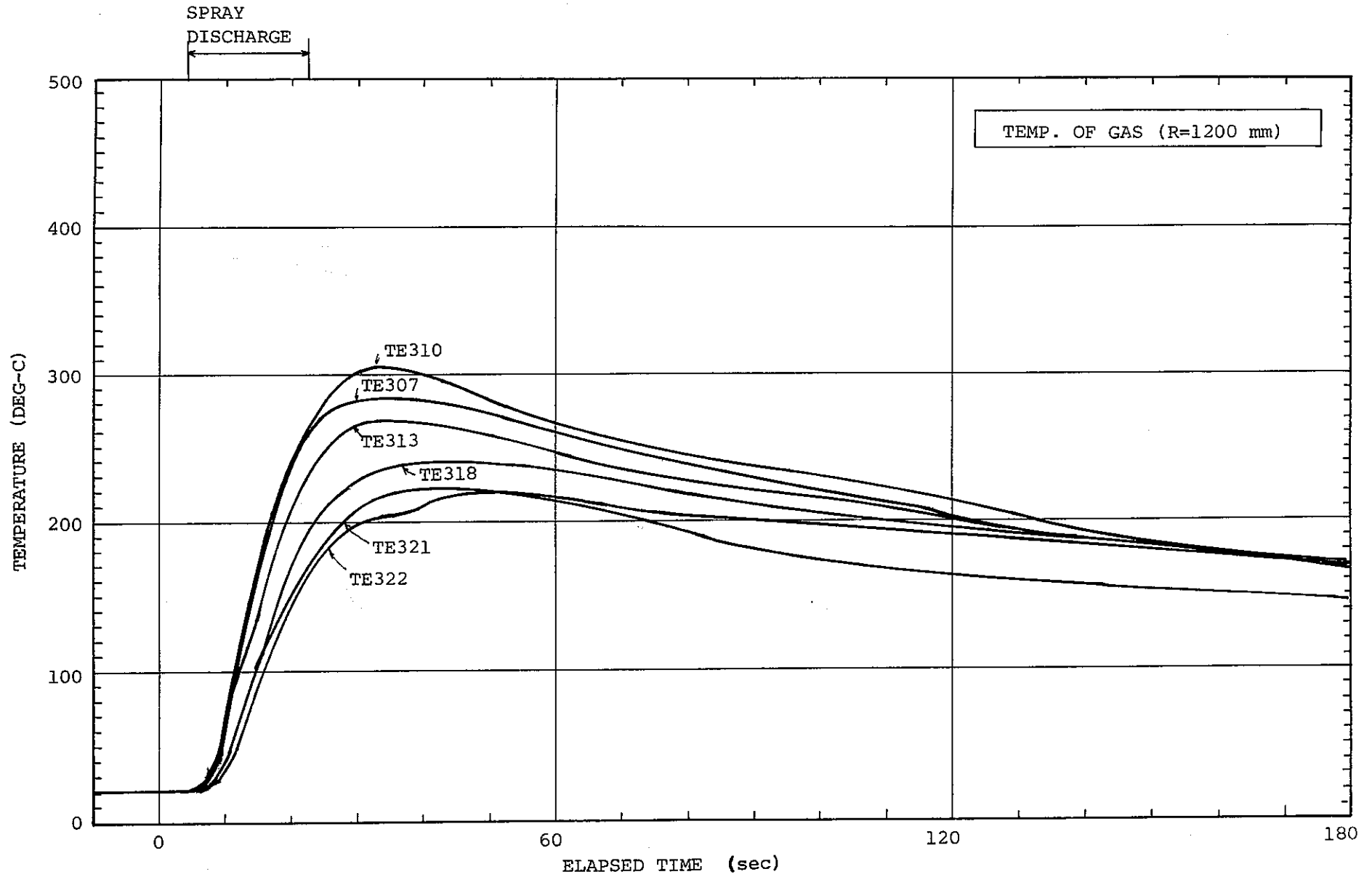


Fig.5.6(4) TASP -A1 Data ; Gas Temperature

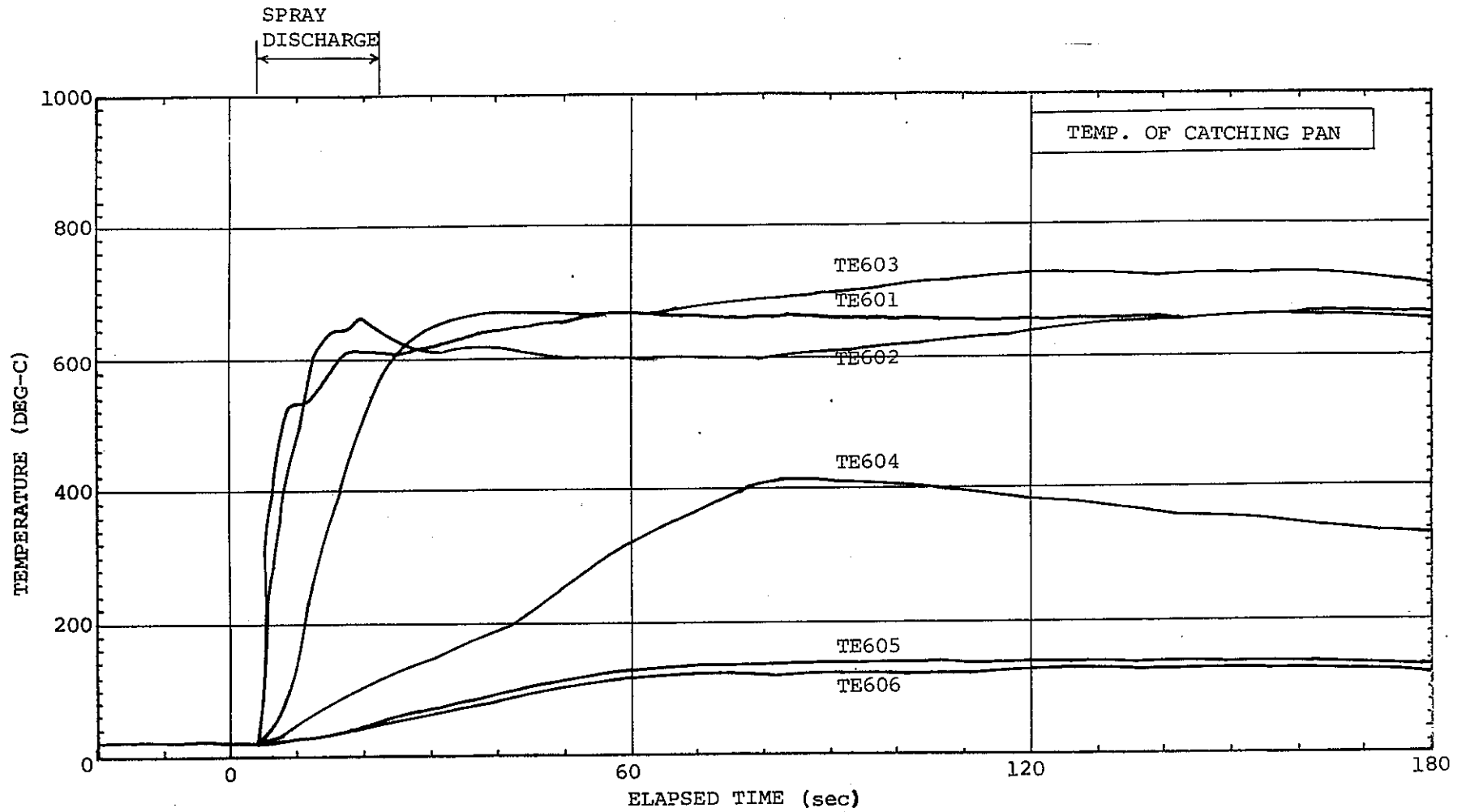


Fig.5.6(5) TASP-A1 Data ; Temperature of Catching Pan

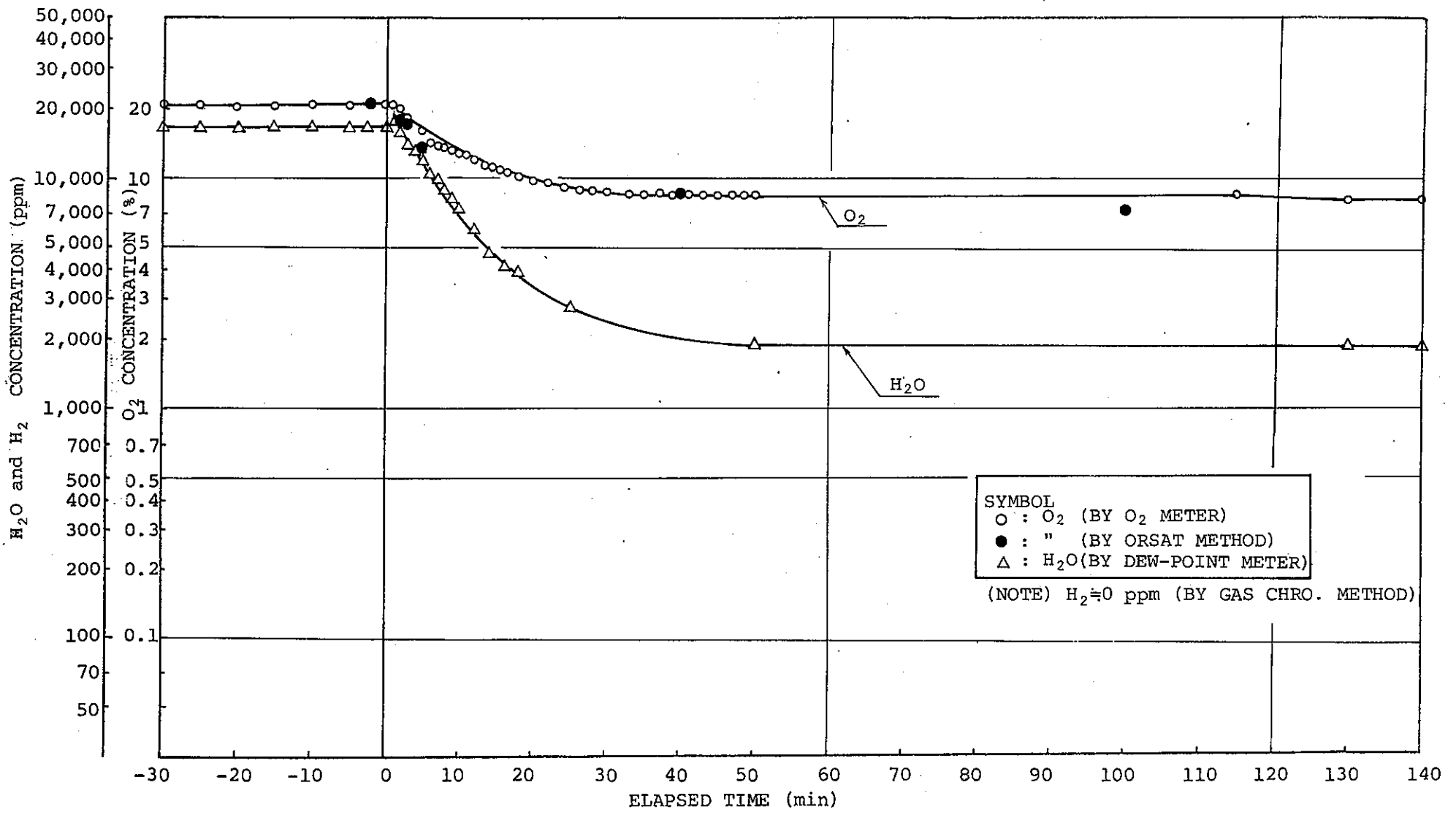
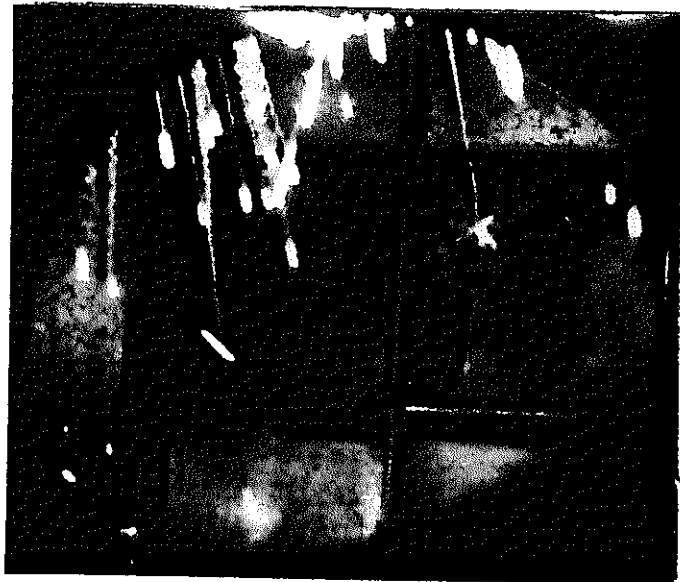
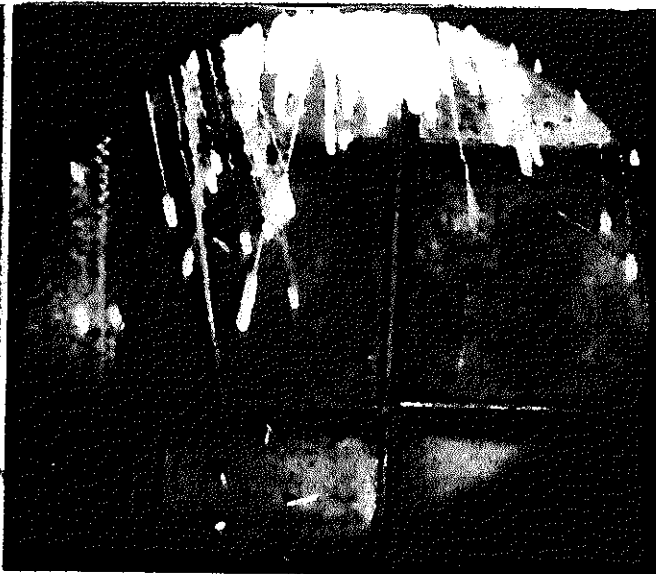


Fig.5.6(6) TASP-A1 Data ; Gas Concentration



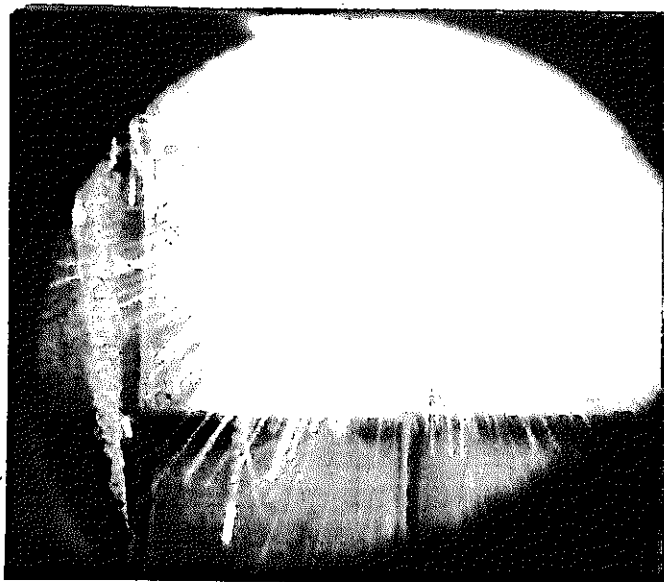
1
(0 sec)



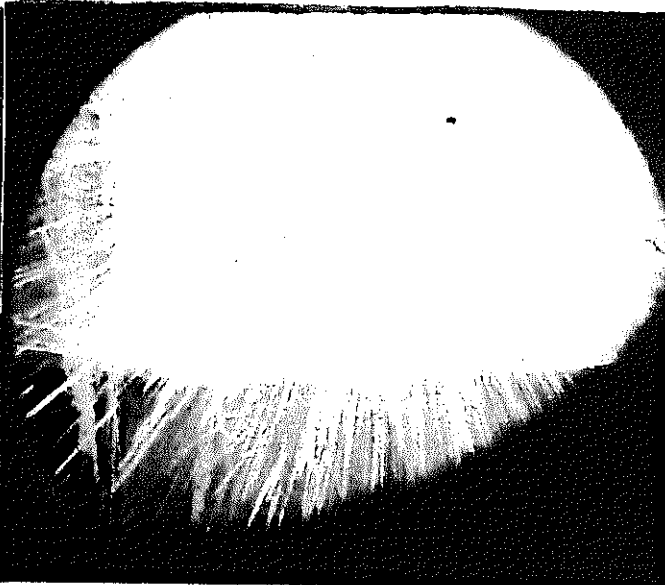
2
(1/16 sec)



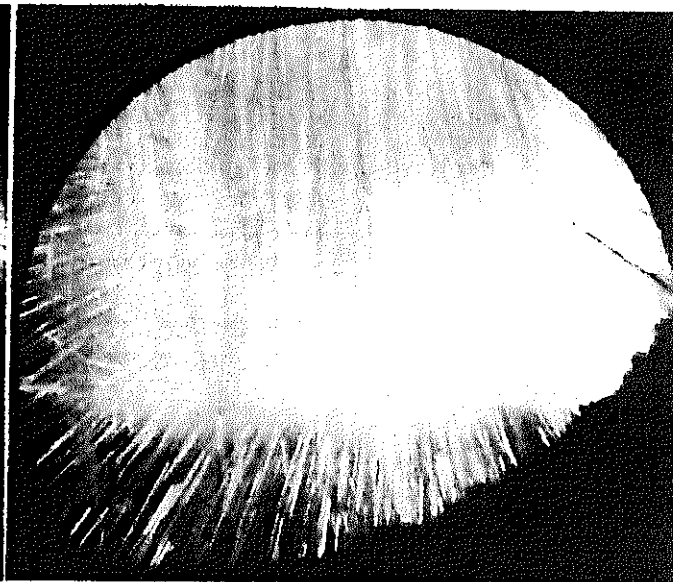
3
(2/16 sec)



4
(3/16 sec)



5
(4/16 sec)



6
(5/16 sec)

Fig.5.6(7) TASP-A1 Data ; Photograph of Spray Fire

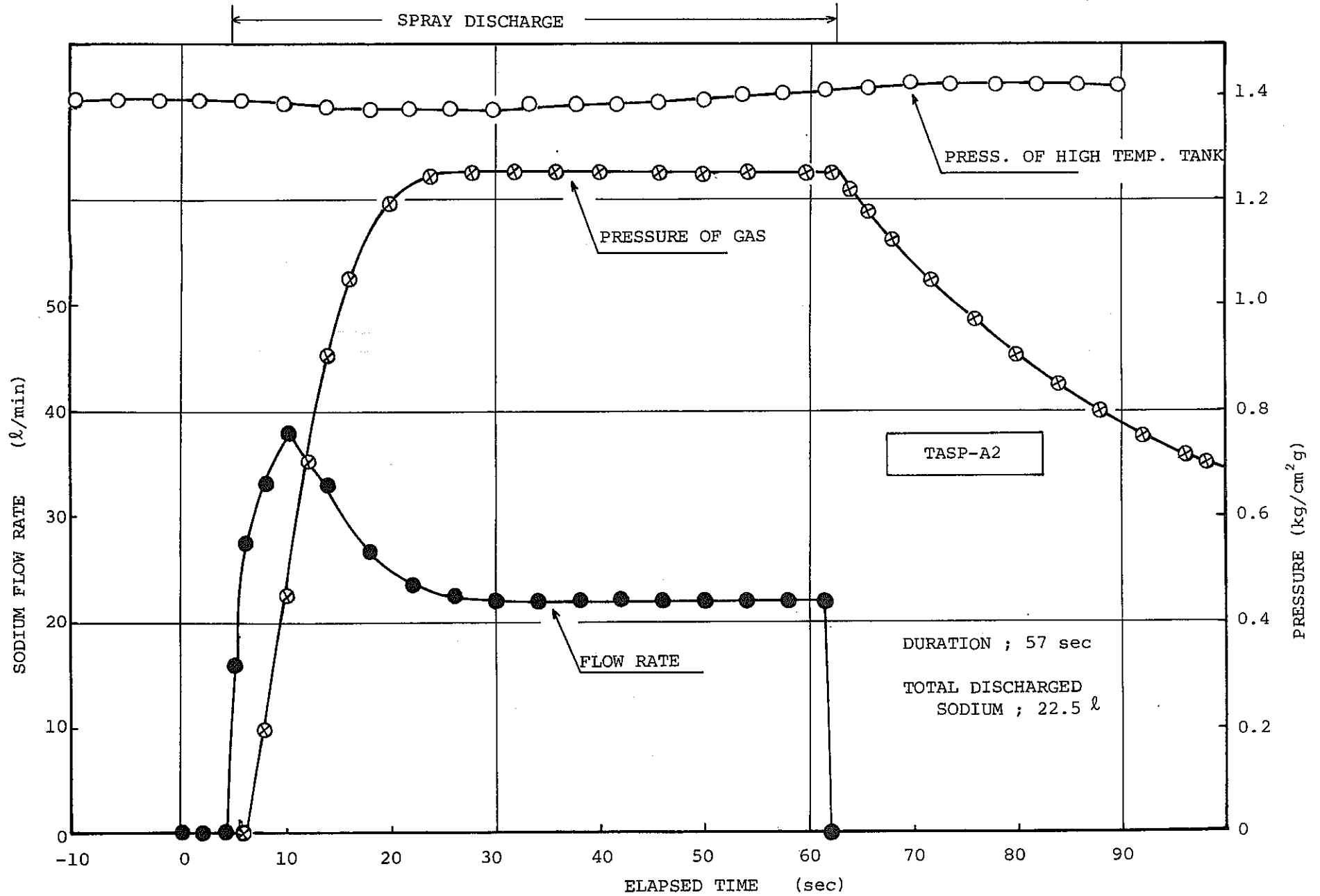


Fig.5.7(1) TASP-A2 Data ; Sodium Discharge Flow Rate

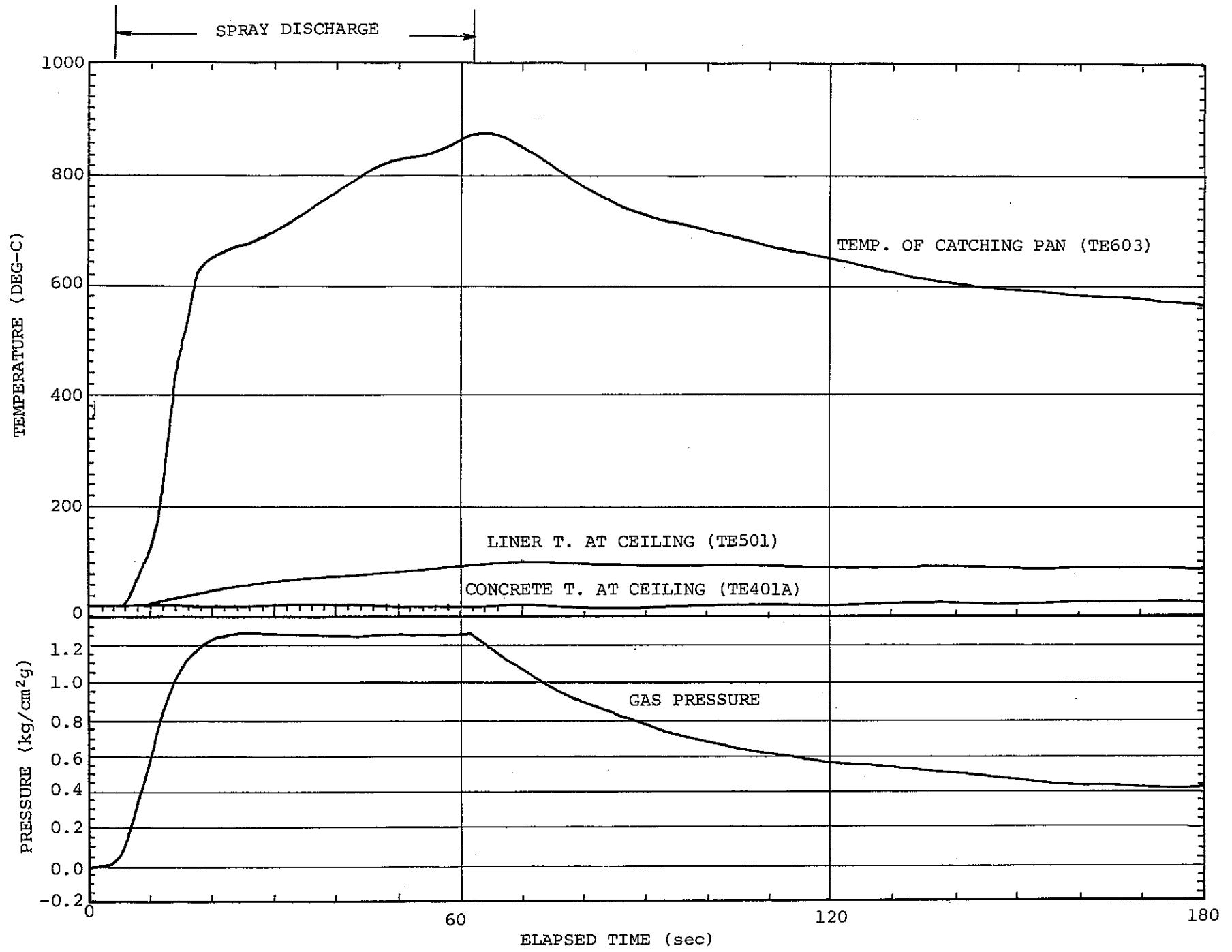


Fig.5.7(2) TASP-A2 Data ; Pressure and Temperature Distribution

Fig. 5.7 (2) TASP-A2 Data ; Pressure and Temperature Distribution

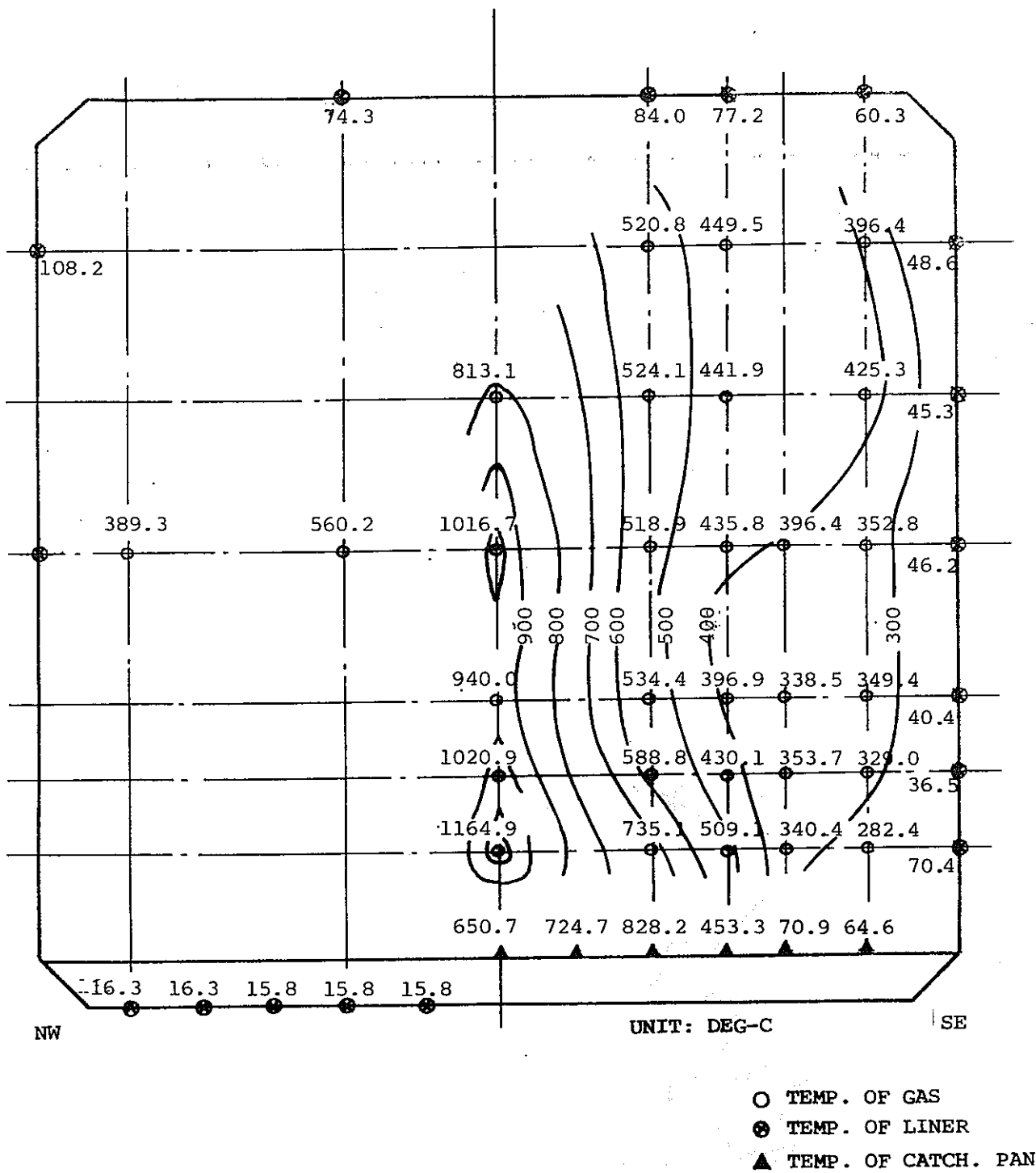


Fig. 5.7 (3) TASP-A2 Data ; Temperature Distribution
 (Elapsed Time = 50 sec)

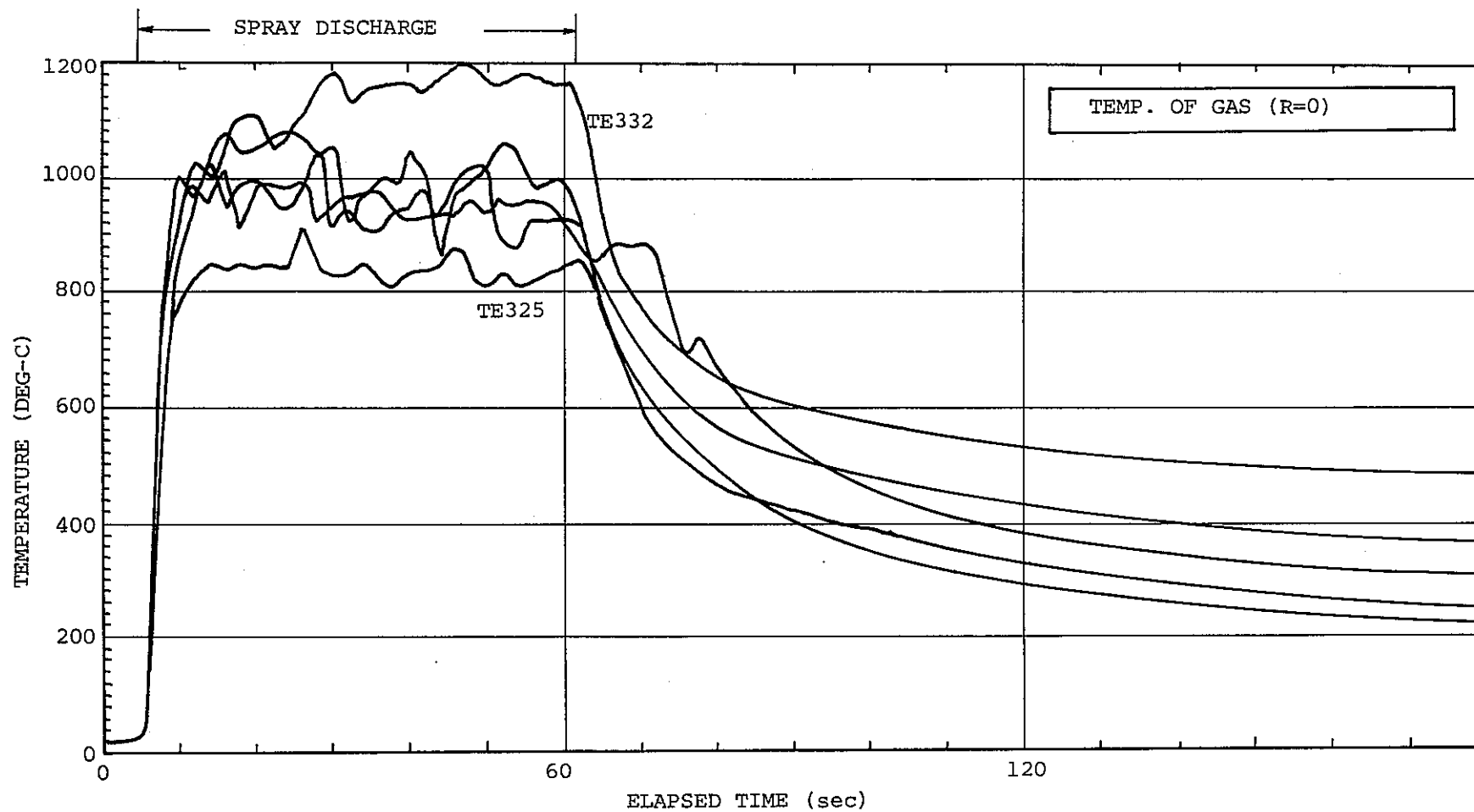


Fig. 5.7(4) TASP-A2 Data ; Gas Temperature

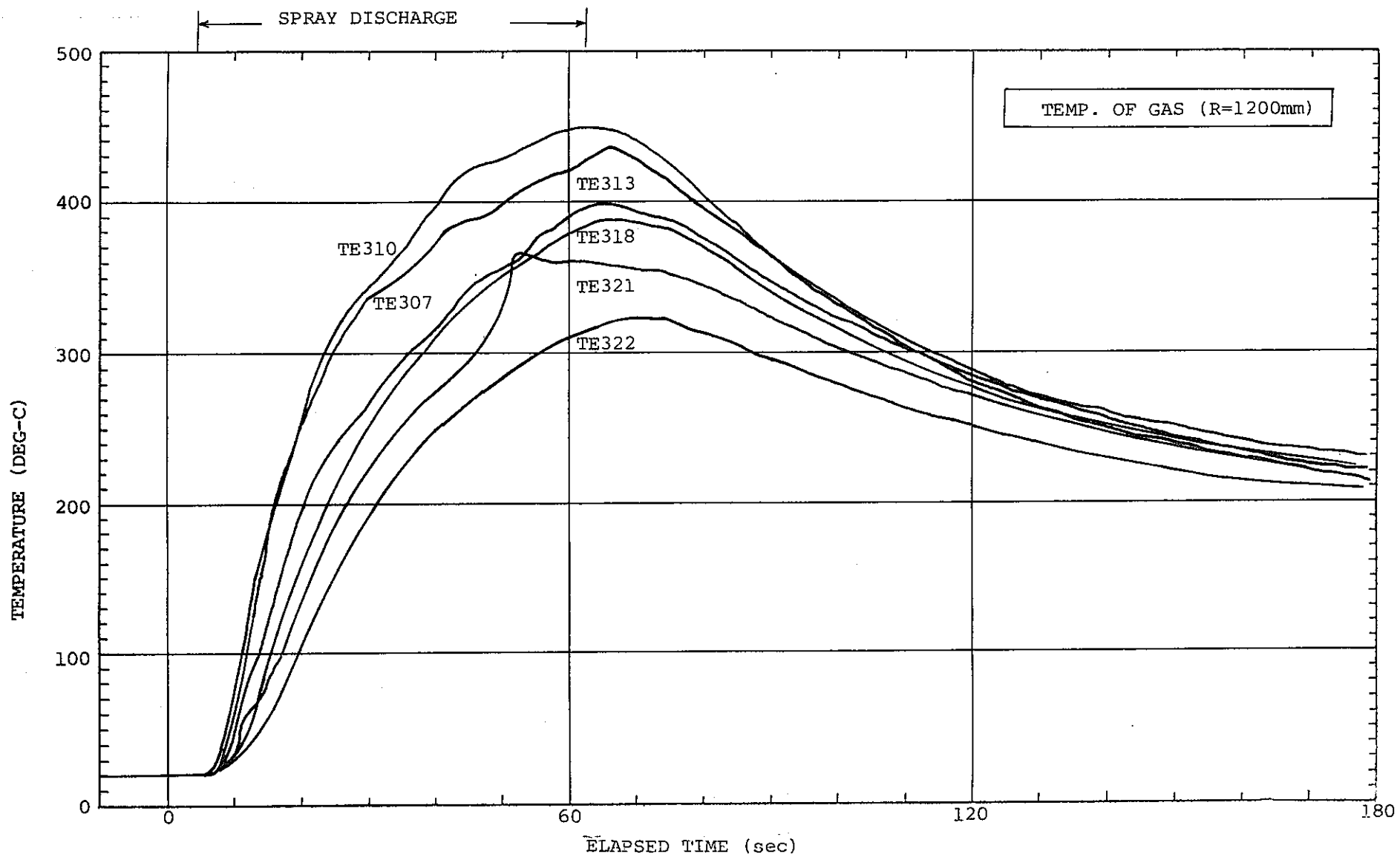


Fig.5.7(5) TASP-A2 Data ; Gas Temperature

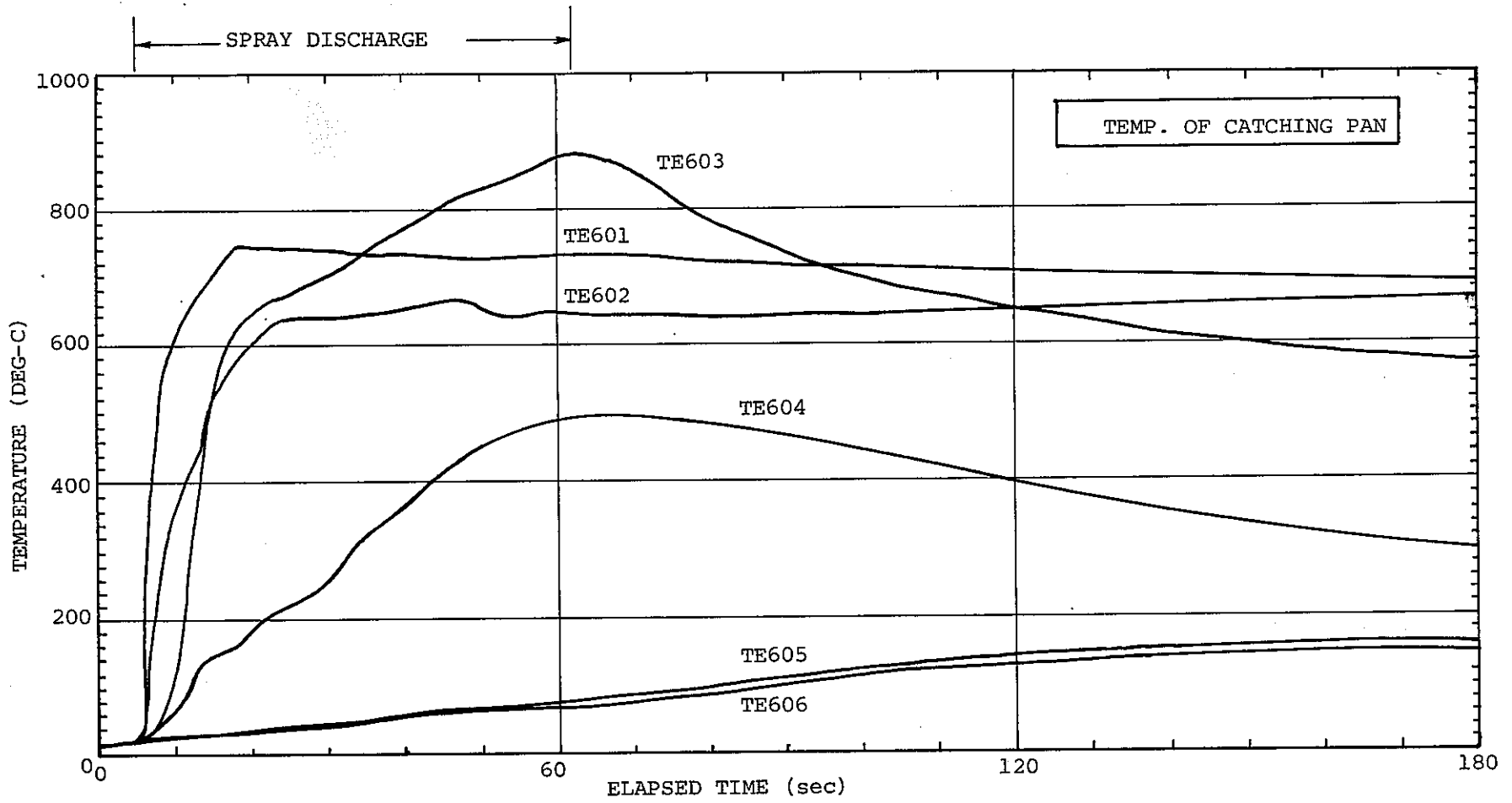


Fig.5.7(6) TASP-A2 Data ; Temperature of Catching Pan

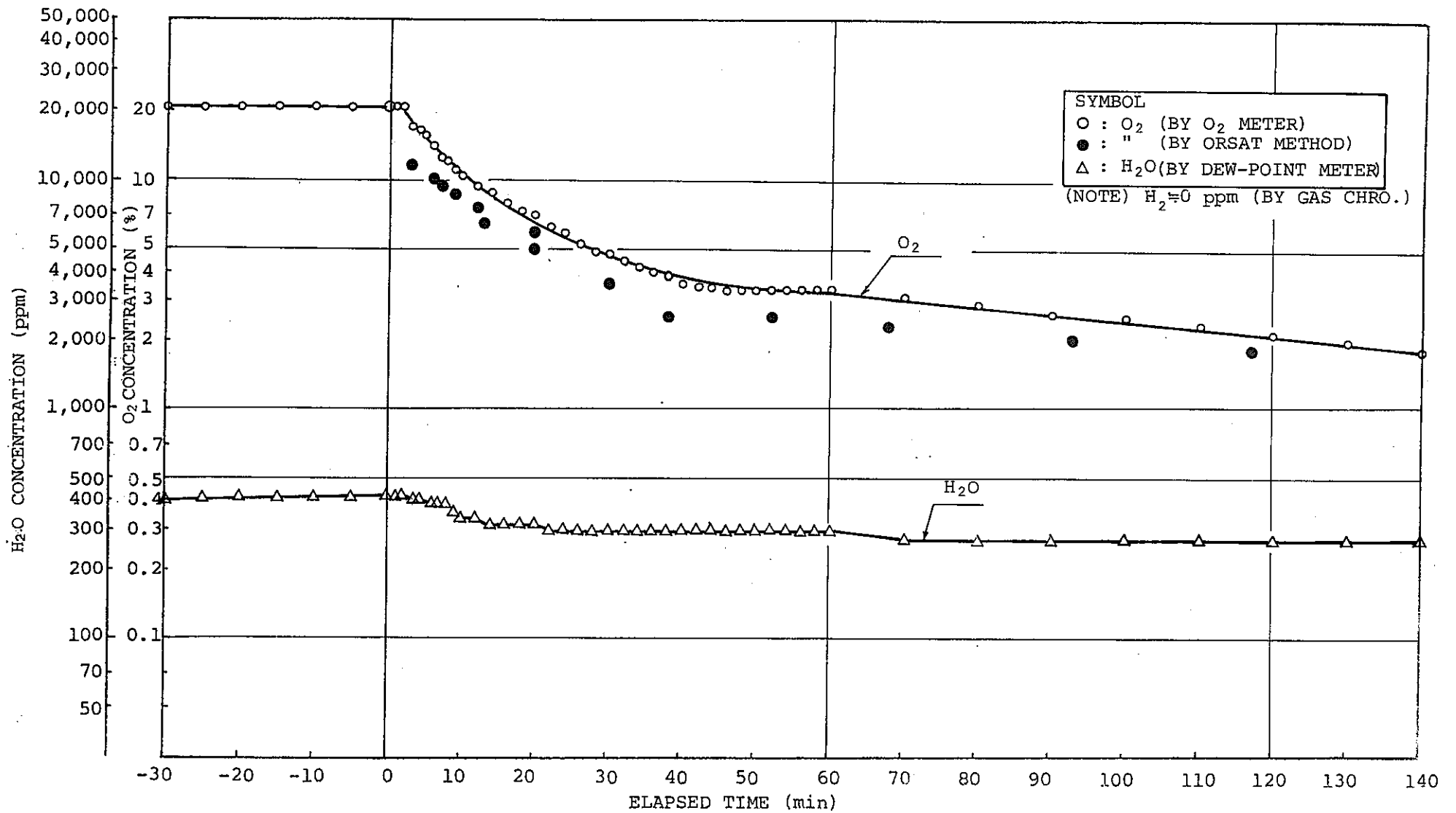
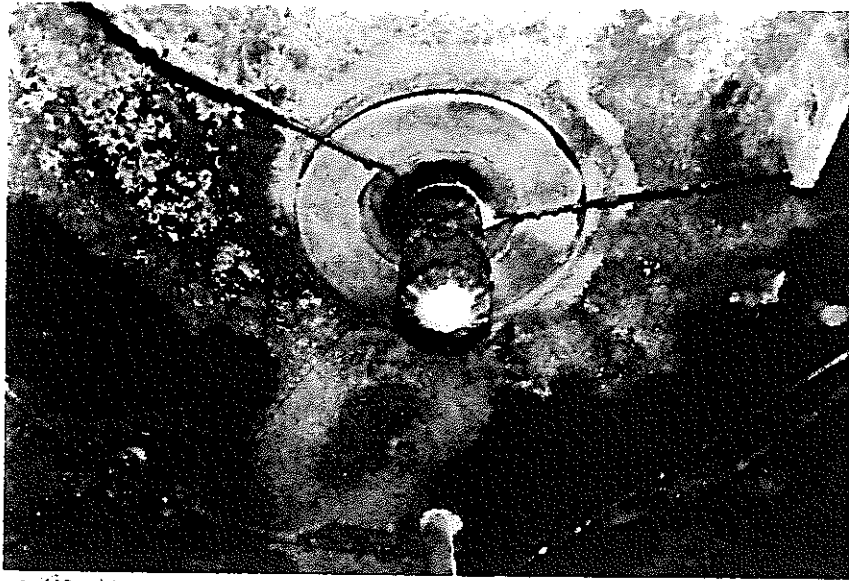
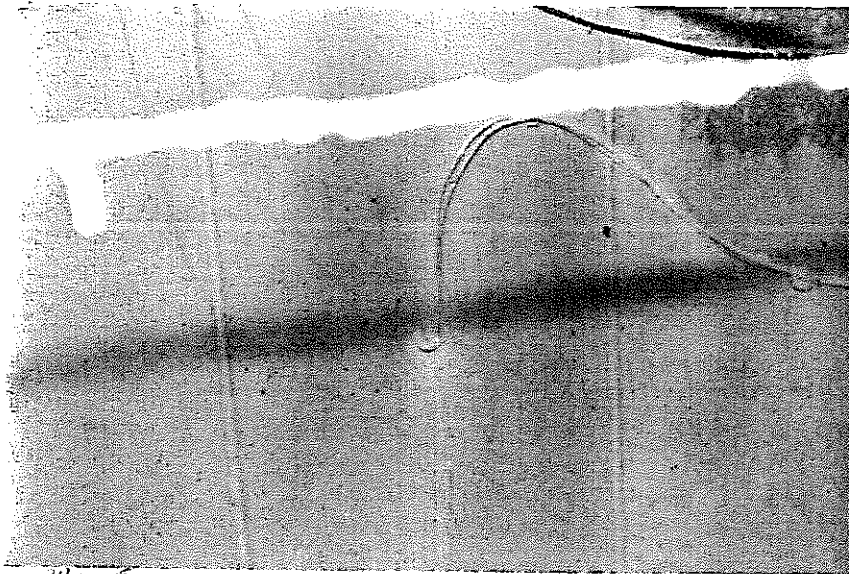


Fig.5.7(7) TASP-A2 Data ; Gas Concentration



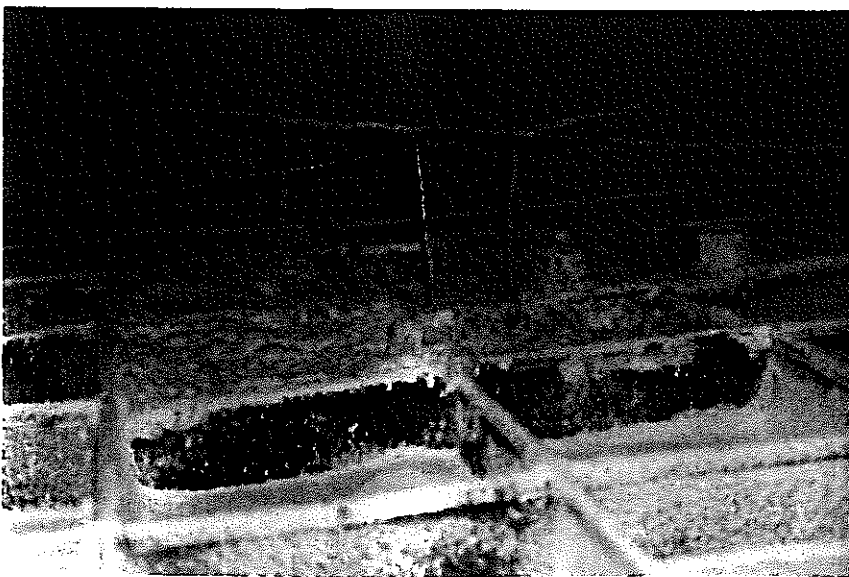
SPRAY NOZZLE

0172-11



SIDE WALL

0172-11



CATCHING PAN

0172-11

Fig.5.7(8) TASP-A2 Data ; Photograph of View After Test

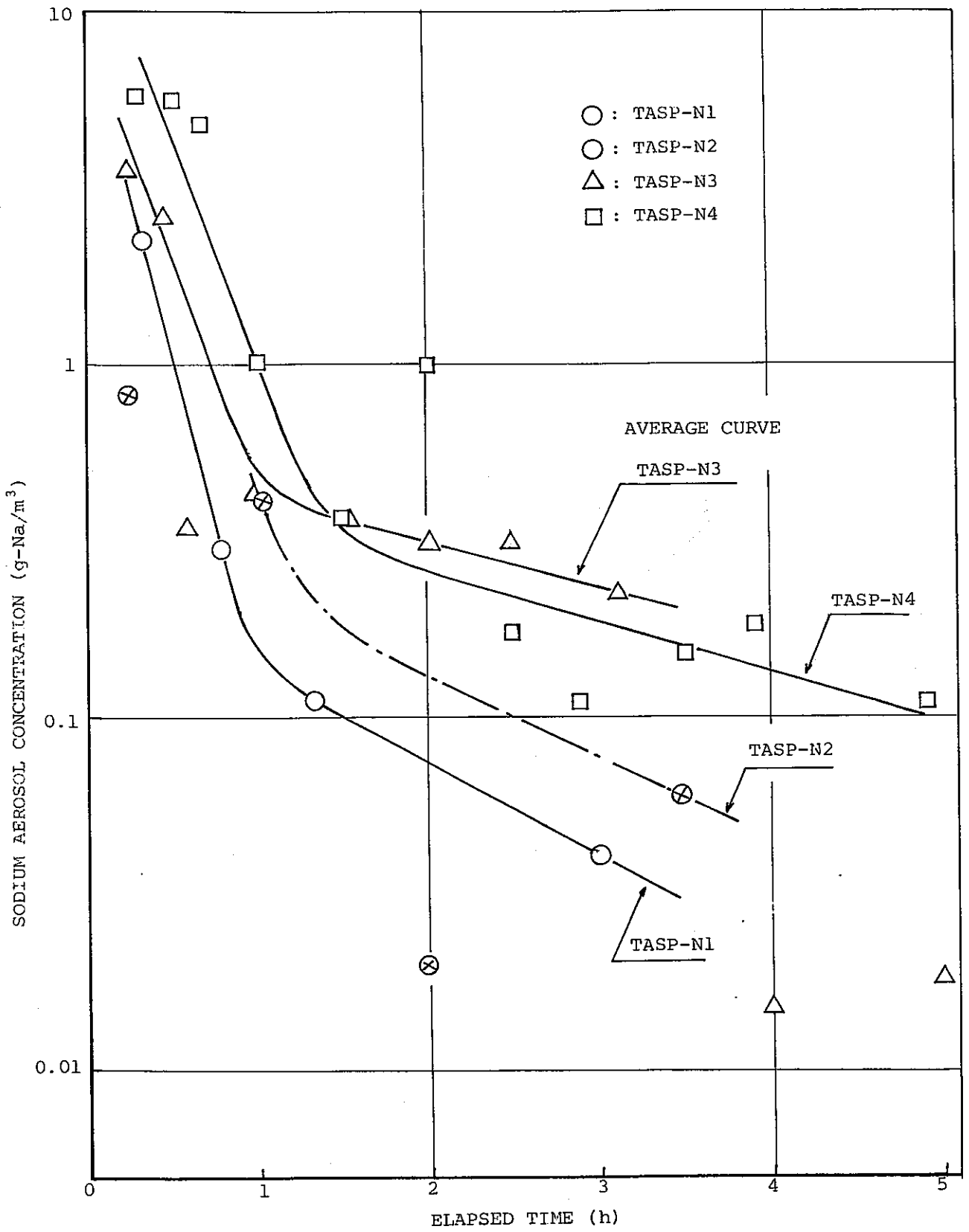


Fig.5.8(1) Sodium Aerosol Concentration (TASP-N1 ~ N4)

SODIUM AEROSOL CONCENTRATION (g-Na/m³)

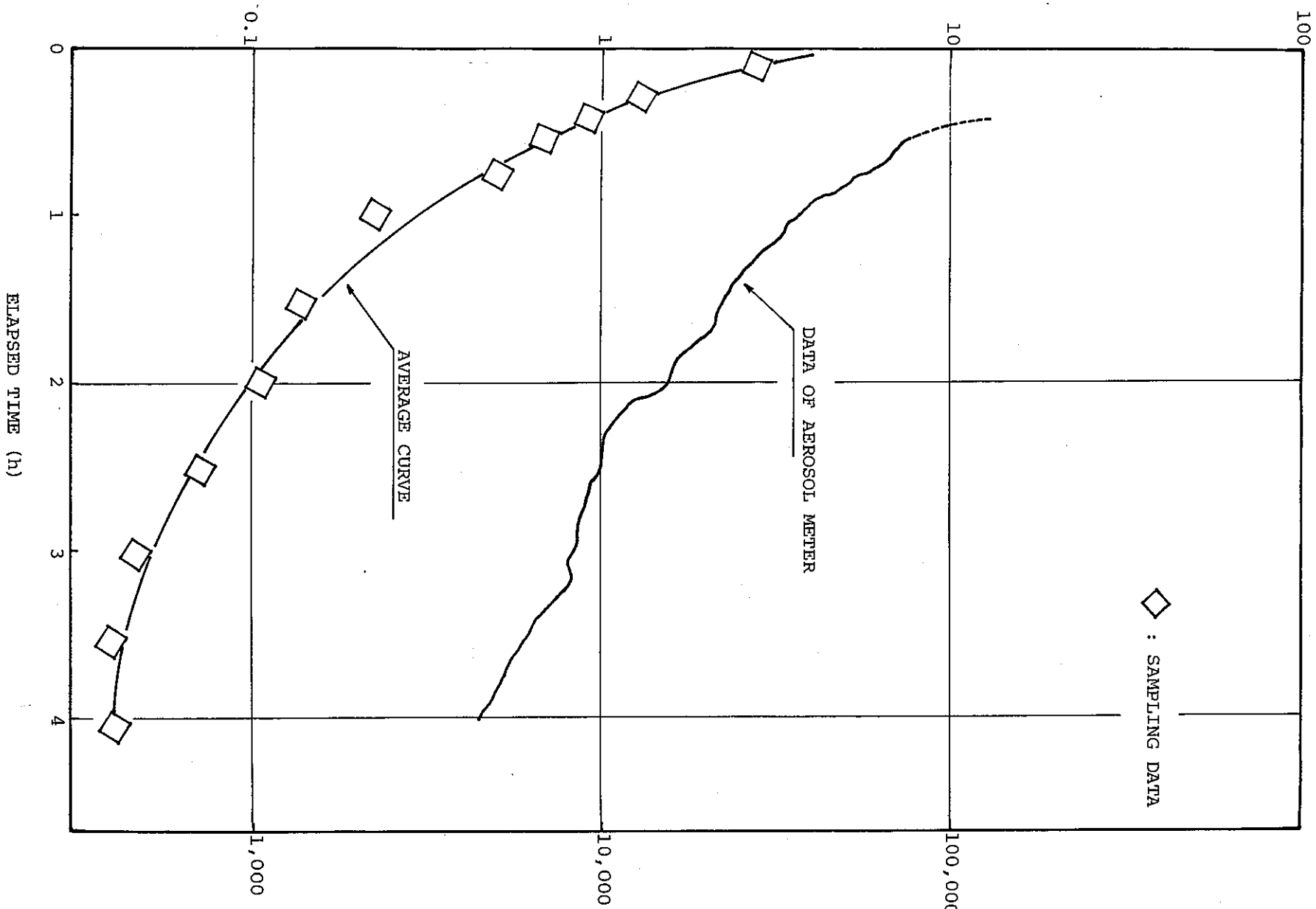


Fig. 5.8(2) Sodium Aerosol Concentration (TASP-N5)

OUTPUT OF AEROSOL METER (CPM)

SODIUM AEROSOL CONCENTRATION (g-Na/m³)

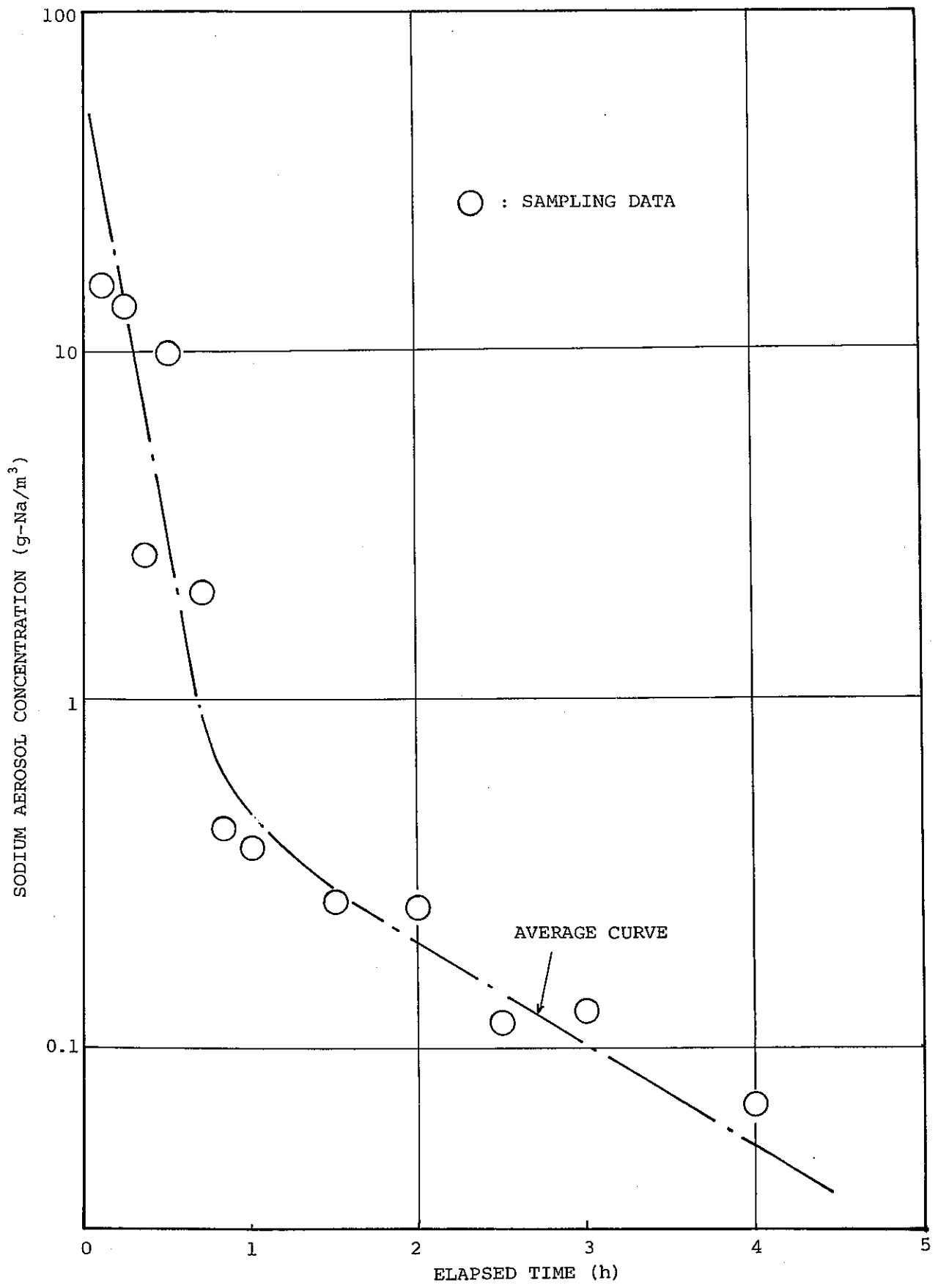


Fig.5.8(3) Sodium Aerosol Concentration (TASP-A2)

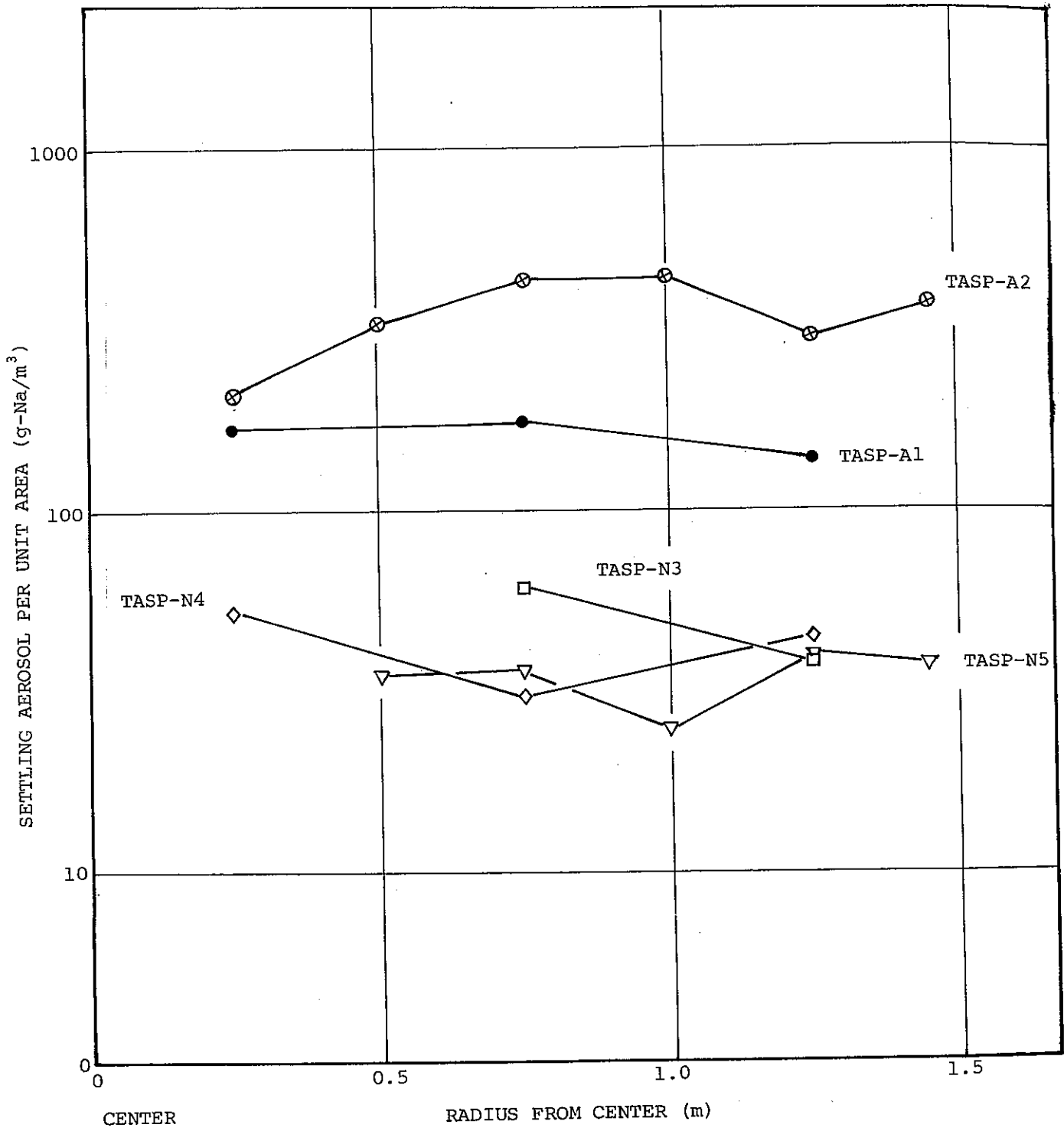


Fig.5.9 Total Amount of Settling Aerosol

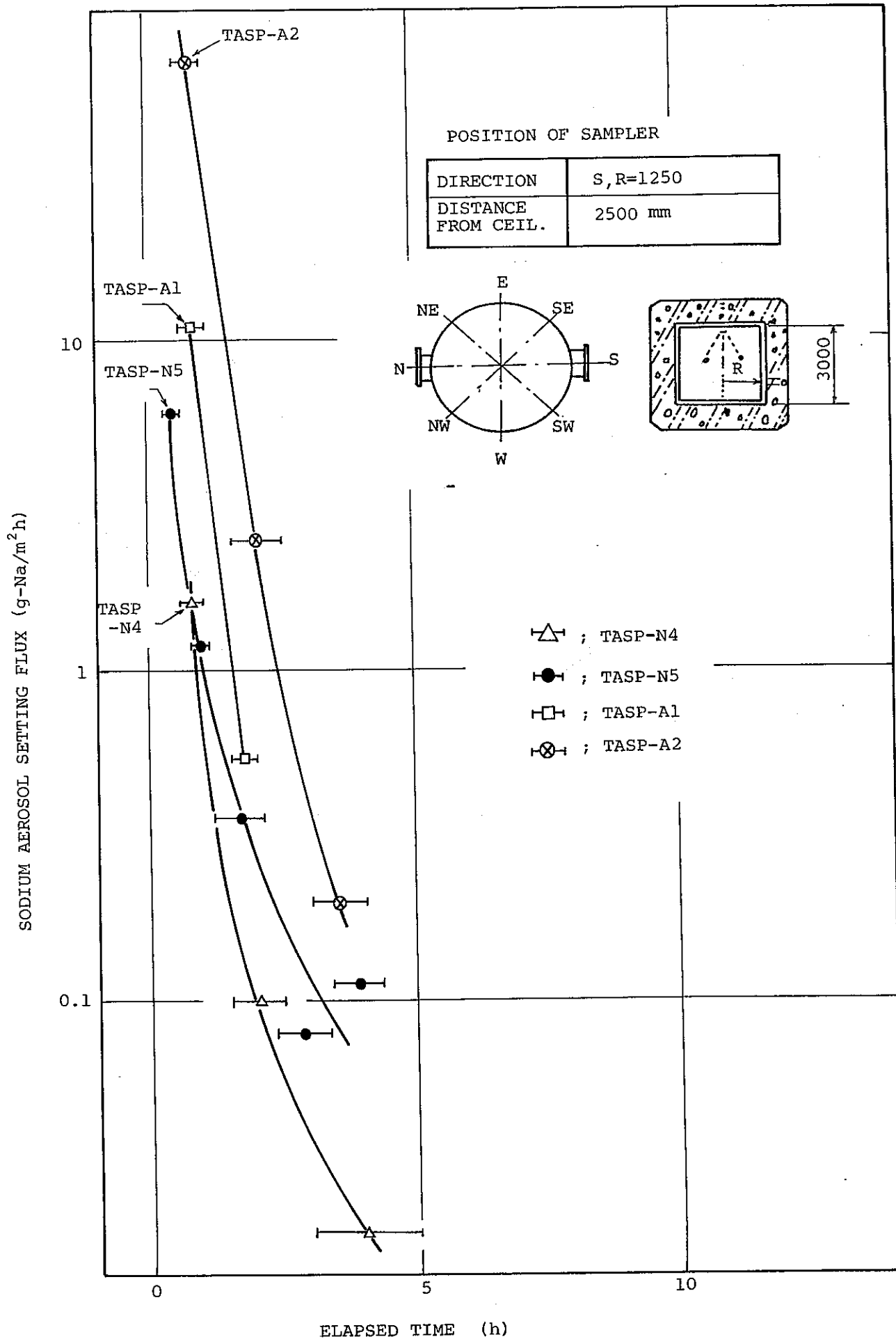


Fig.5.10 Transition of Aerosol Settling Flux

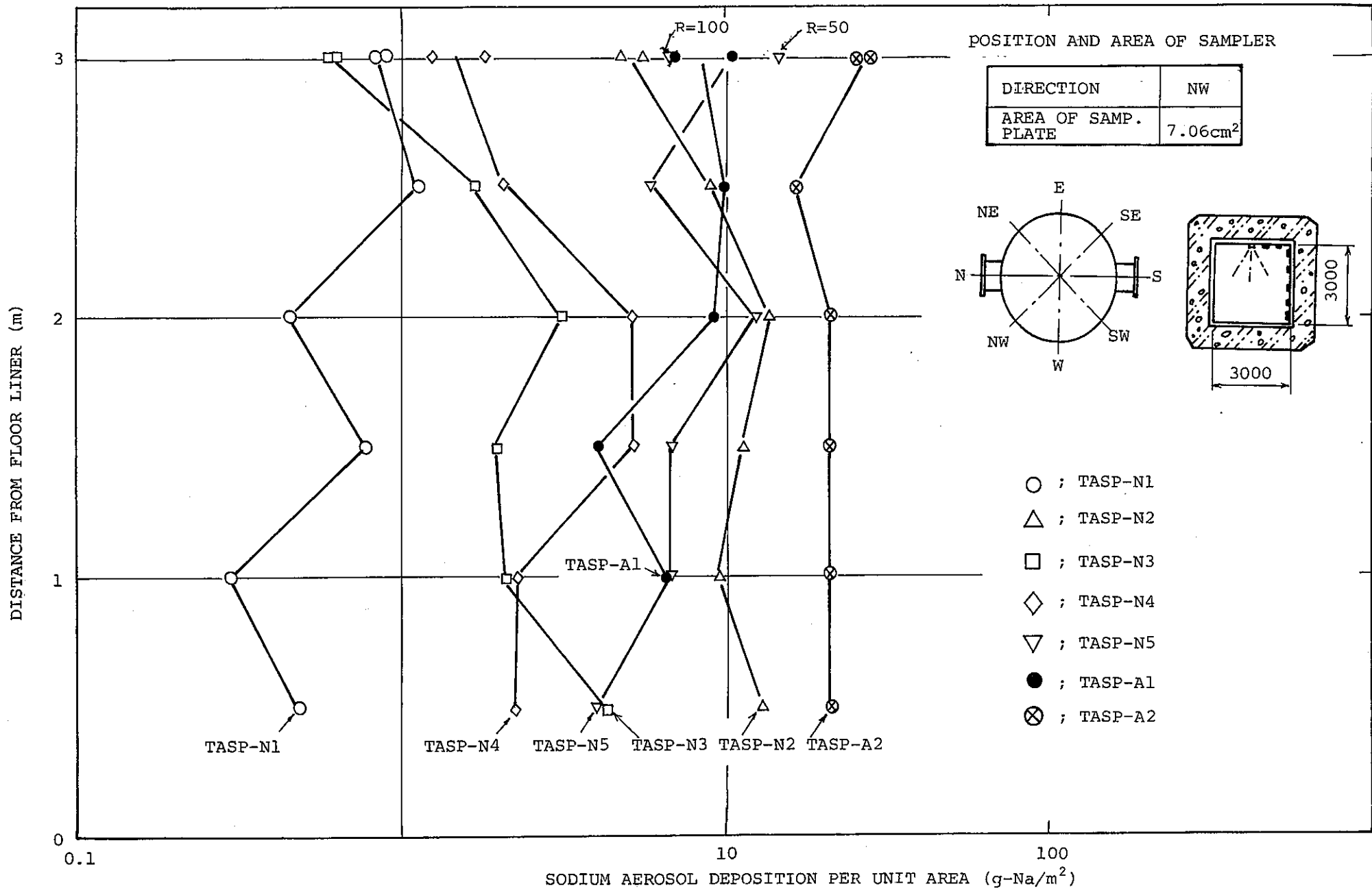


Fig.5.11(1) Total Amount of Aerosol Deposition

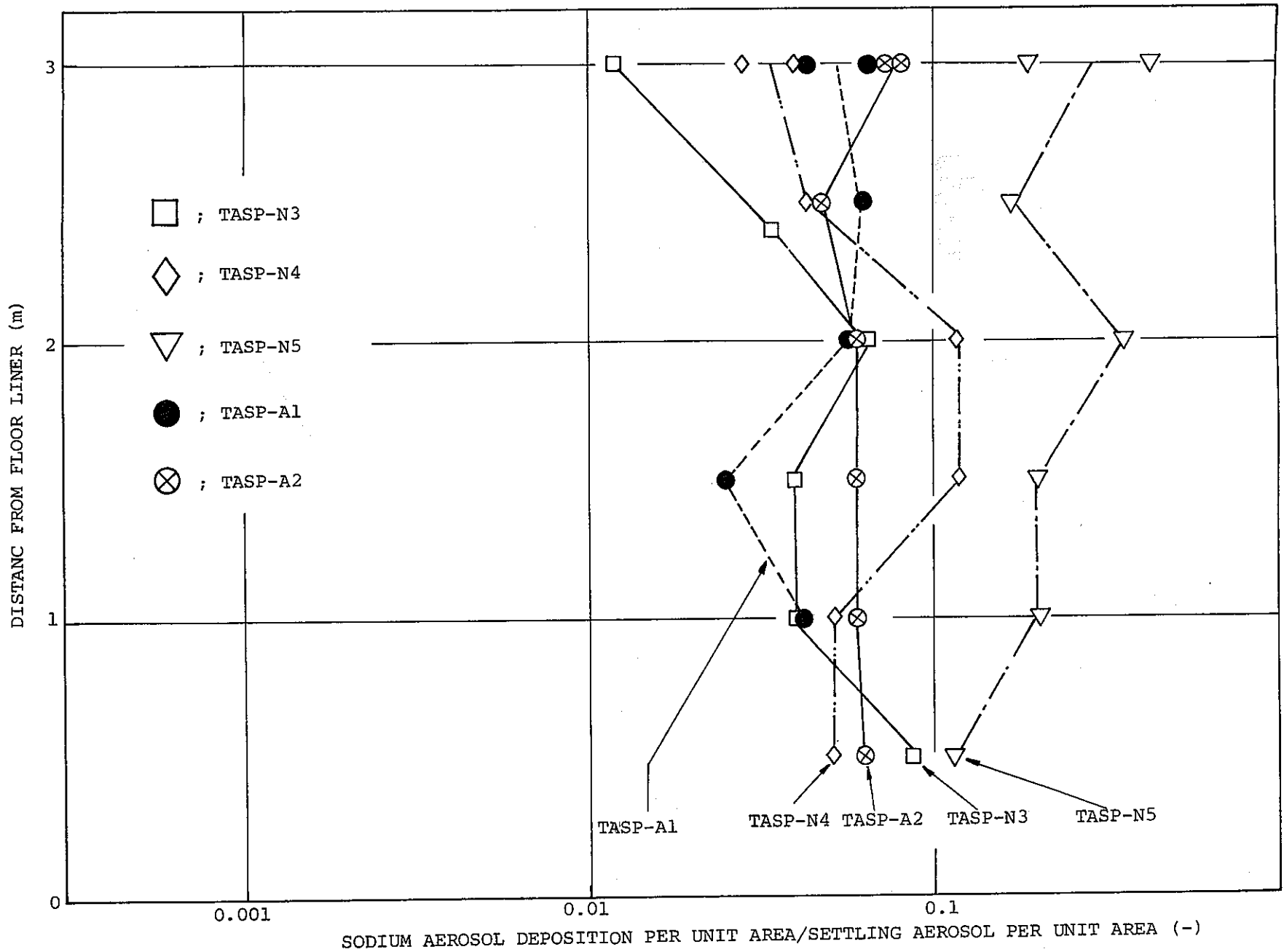


Fig.5.11(2) Total Amount of Aerosol Deposition

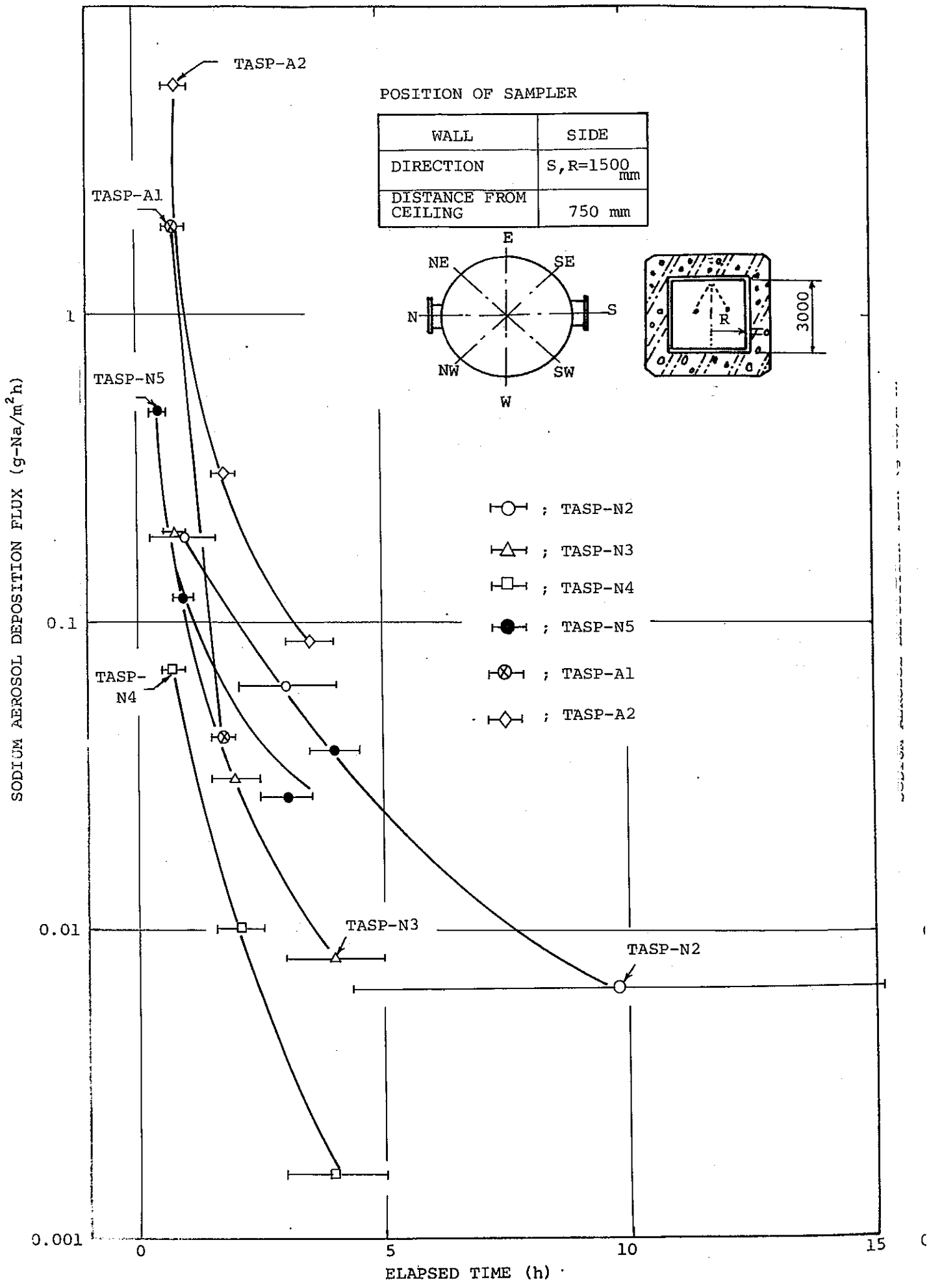
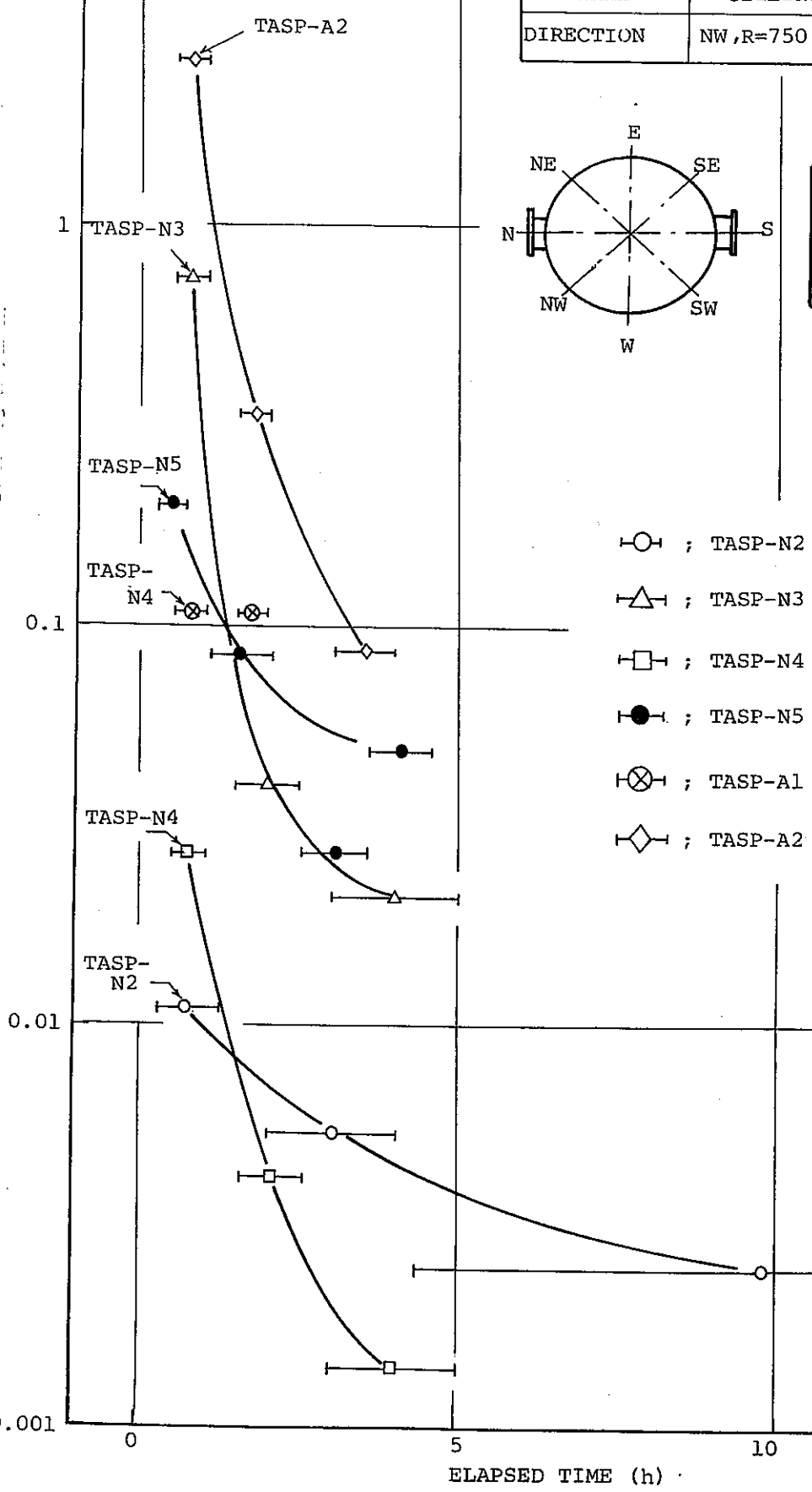
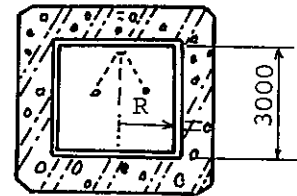
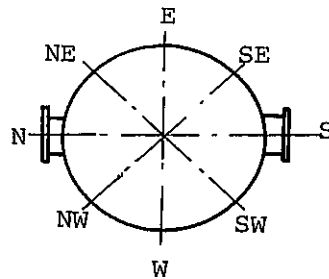


Fig.5.12 Transition of Aerosol Deposition Flux to Side Wall

POSITION OF SAMPLER

WALL	CEILING
DIRECTION	NW, R=750



- ; TASP-N2
- △ ; TASP-N3
- ; TASP-N4
- ; TASP-N5
- ⊗ ; TASP-N4
- ◇ ; TASP-A2

Fig.5.13 Transition of Aerosol Deposition Flux to Ceiling Wall

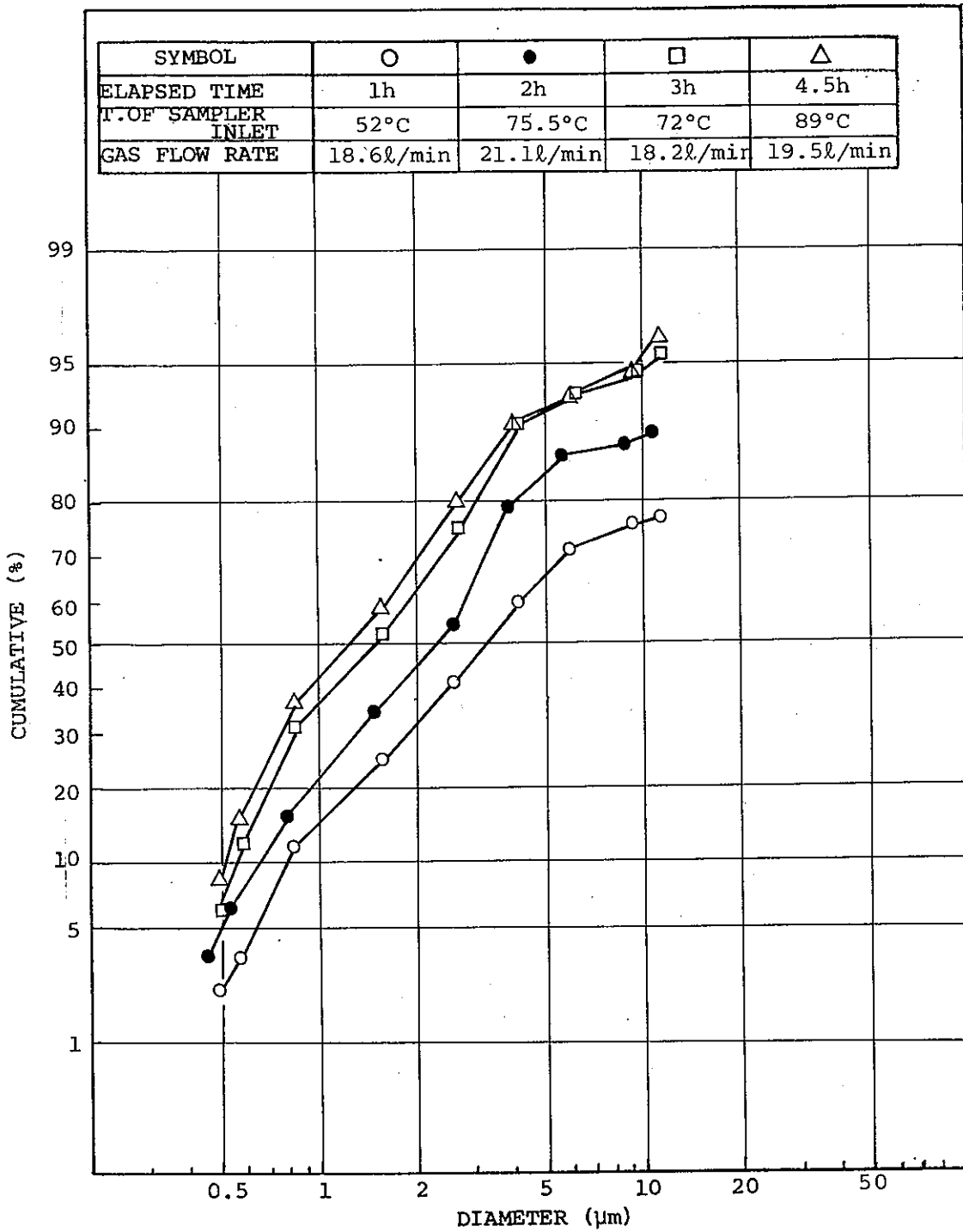


Fig. 5.14(1) Aerosol Particle Diameter Distribution (TASP-N3)

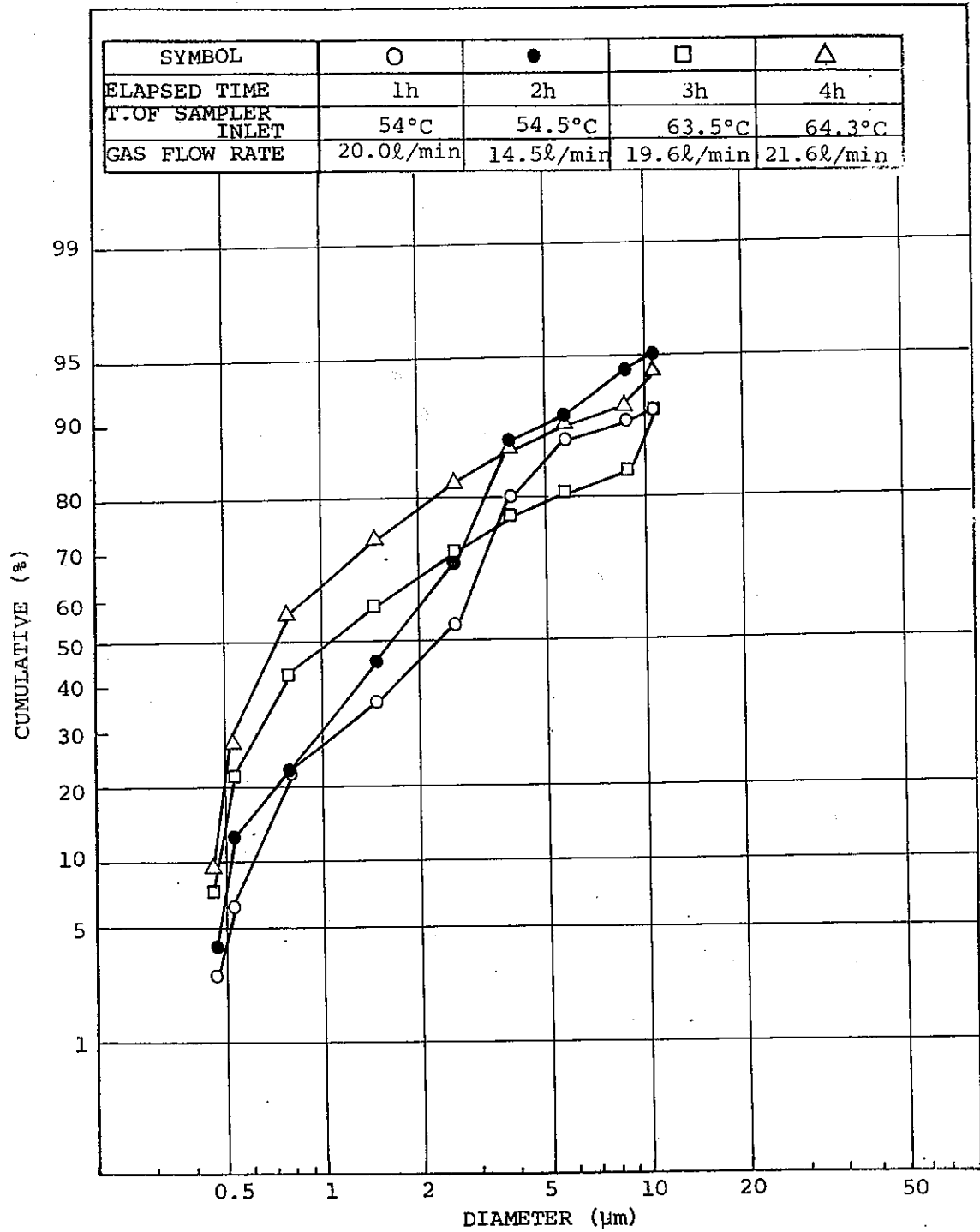


Fig.5.14(2) Aerosol Particle Diameter Distribution
(TASP-N4)

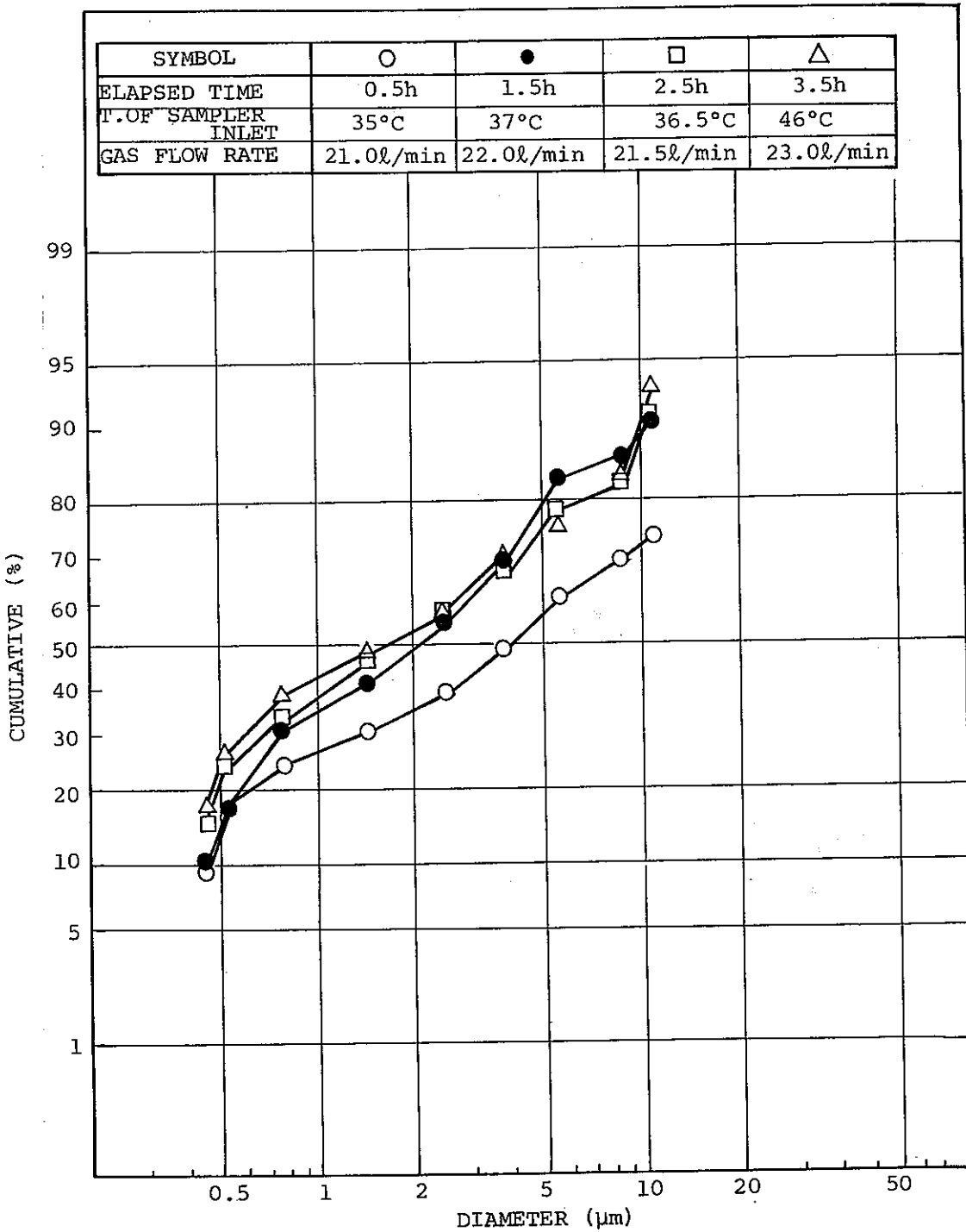


Fig.5.14(3) Aerosol Particle Diameter Distribution (TASP-A2)

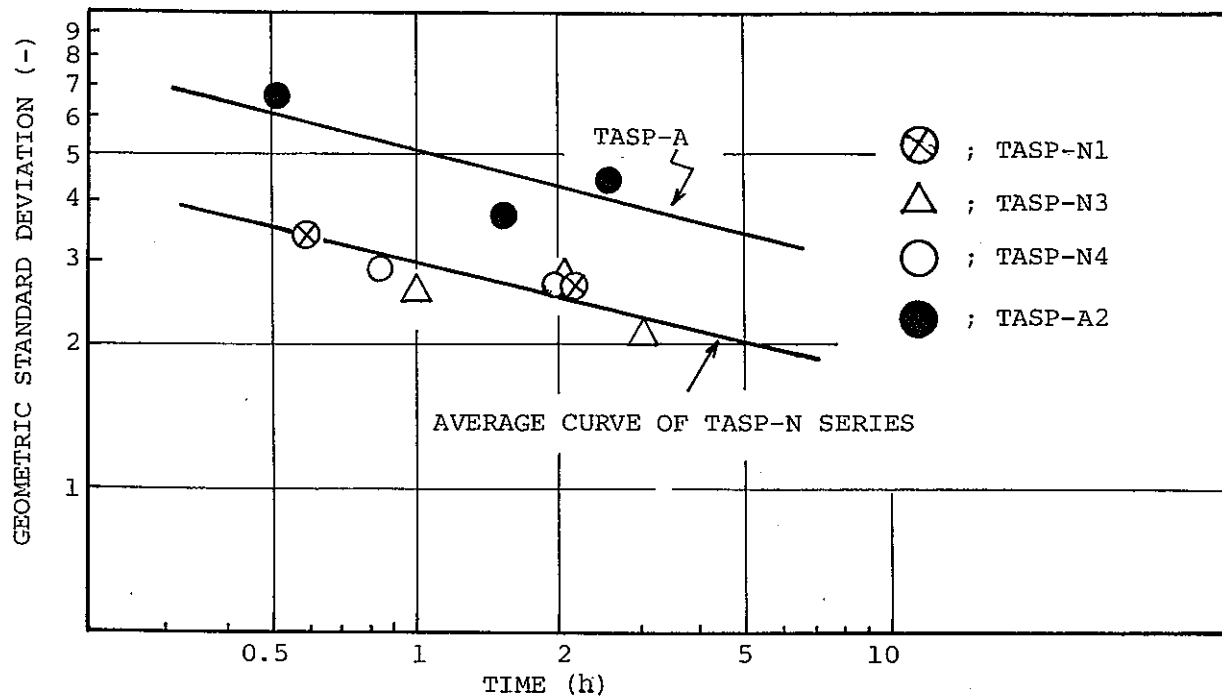


Fig. 5.15 Standard Deviation for Aerosol Particle Diameter Distribution

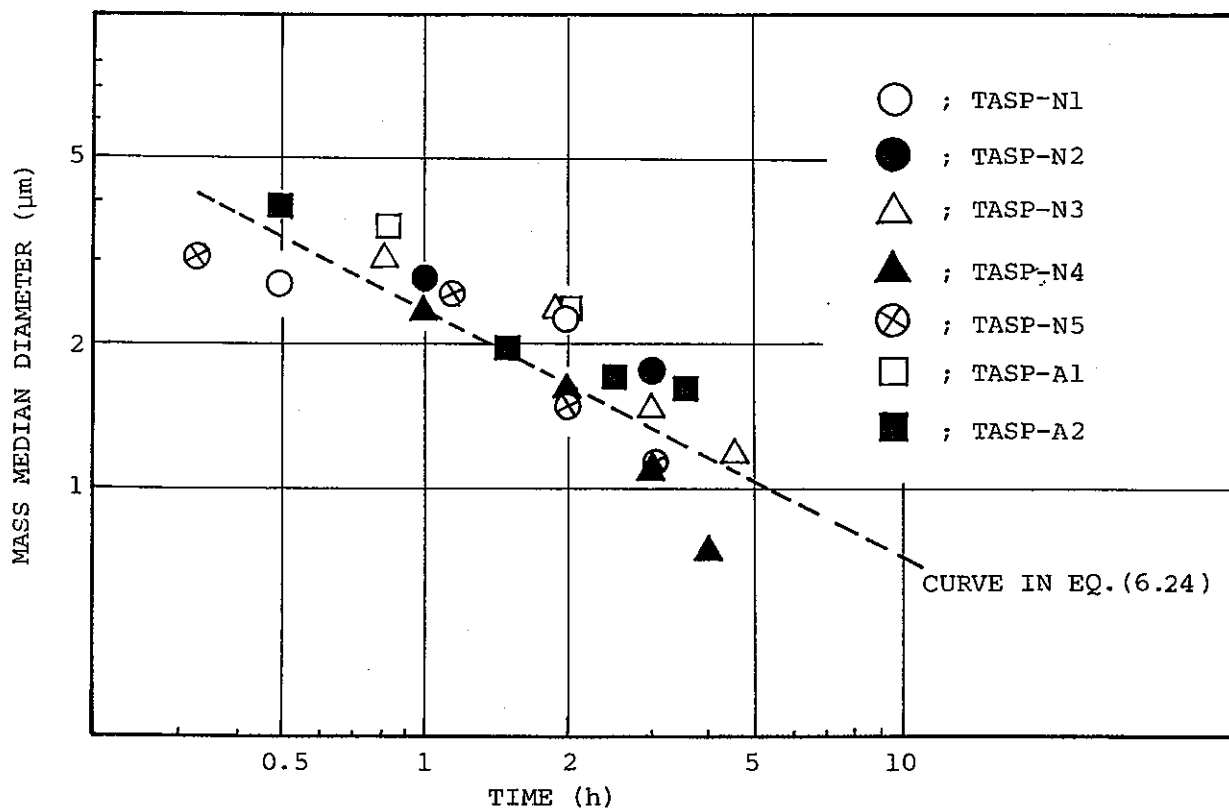
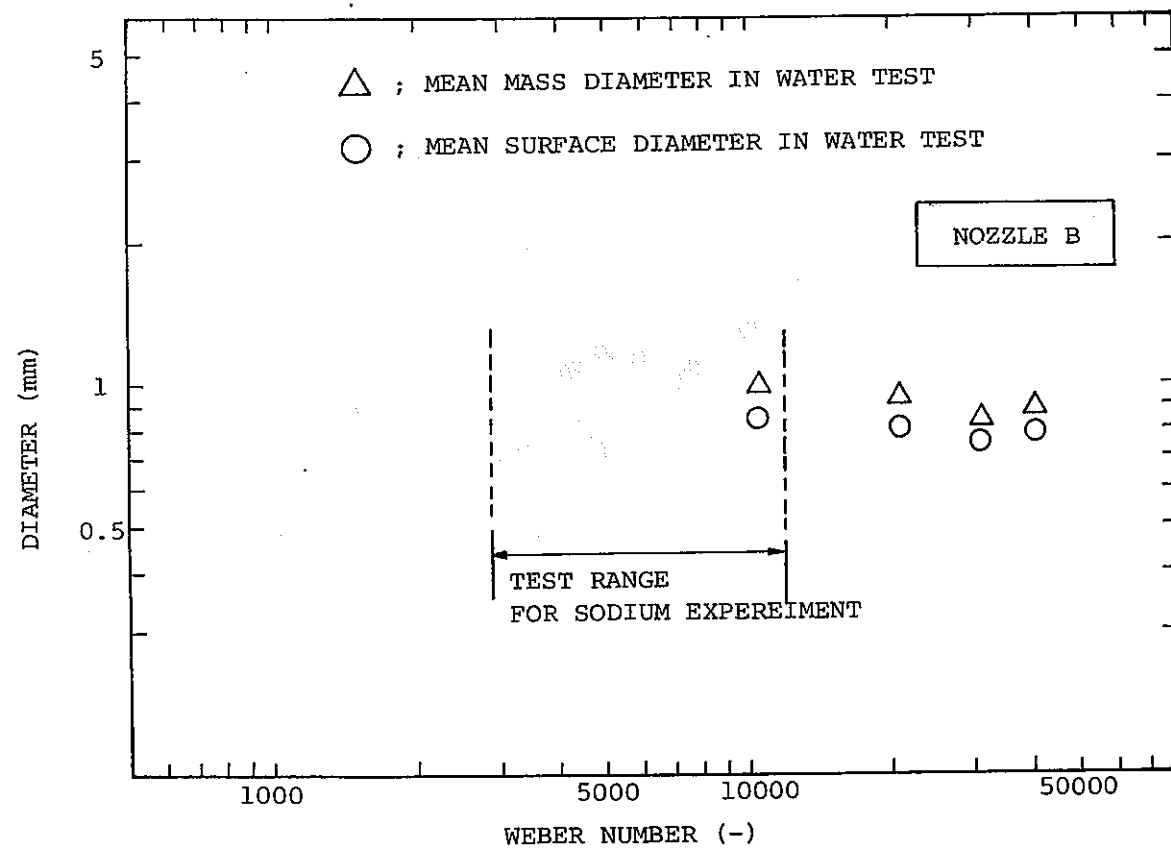
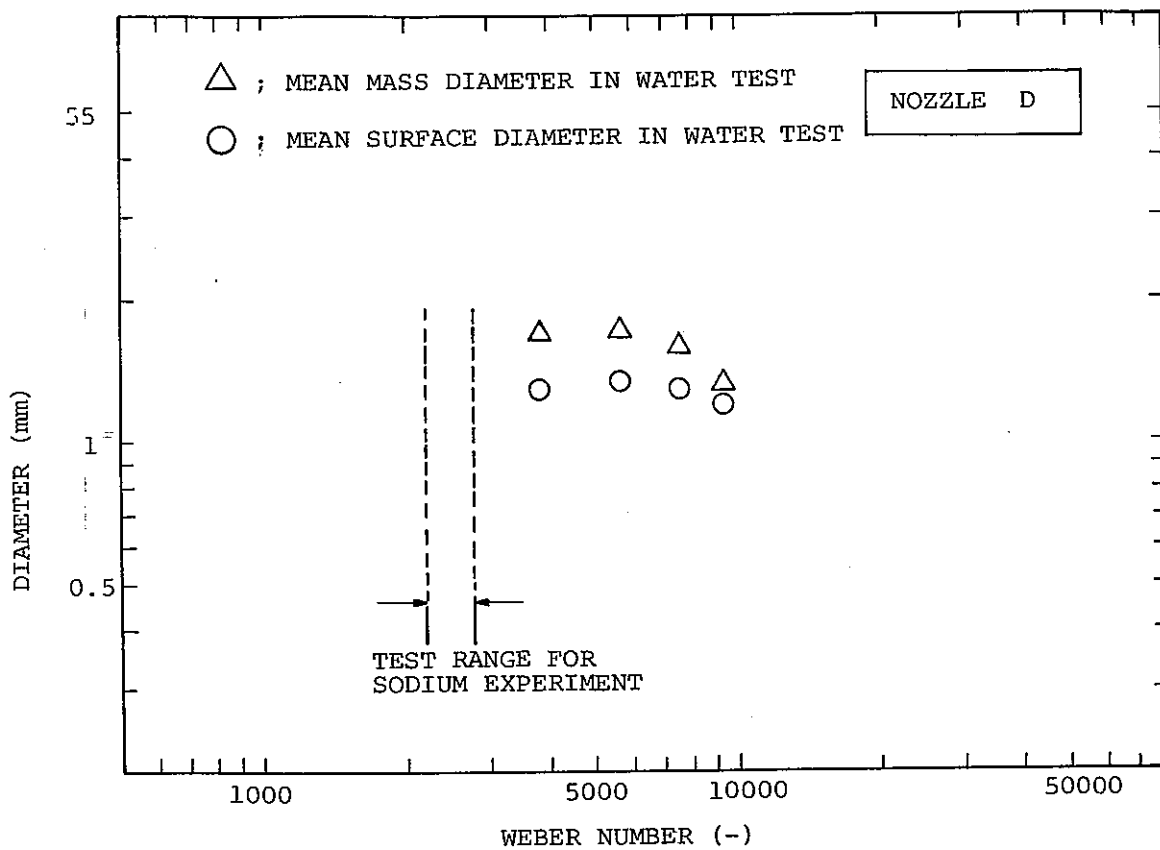


Fig. 5.16 Transition of Aerosol Mass Median Diameter



SODIUM BURNING RATE (kg-Na/m²h)

Fig.6.1 Mean Diameter Versus Weber Number

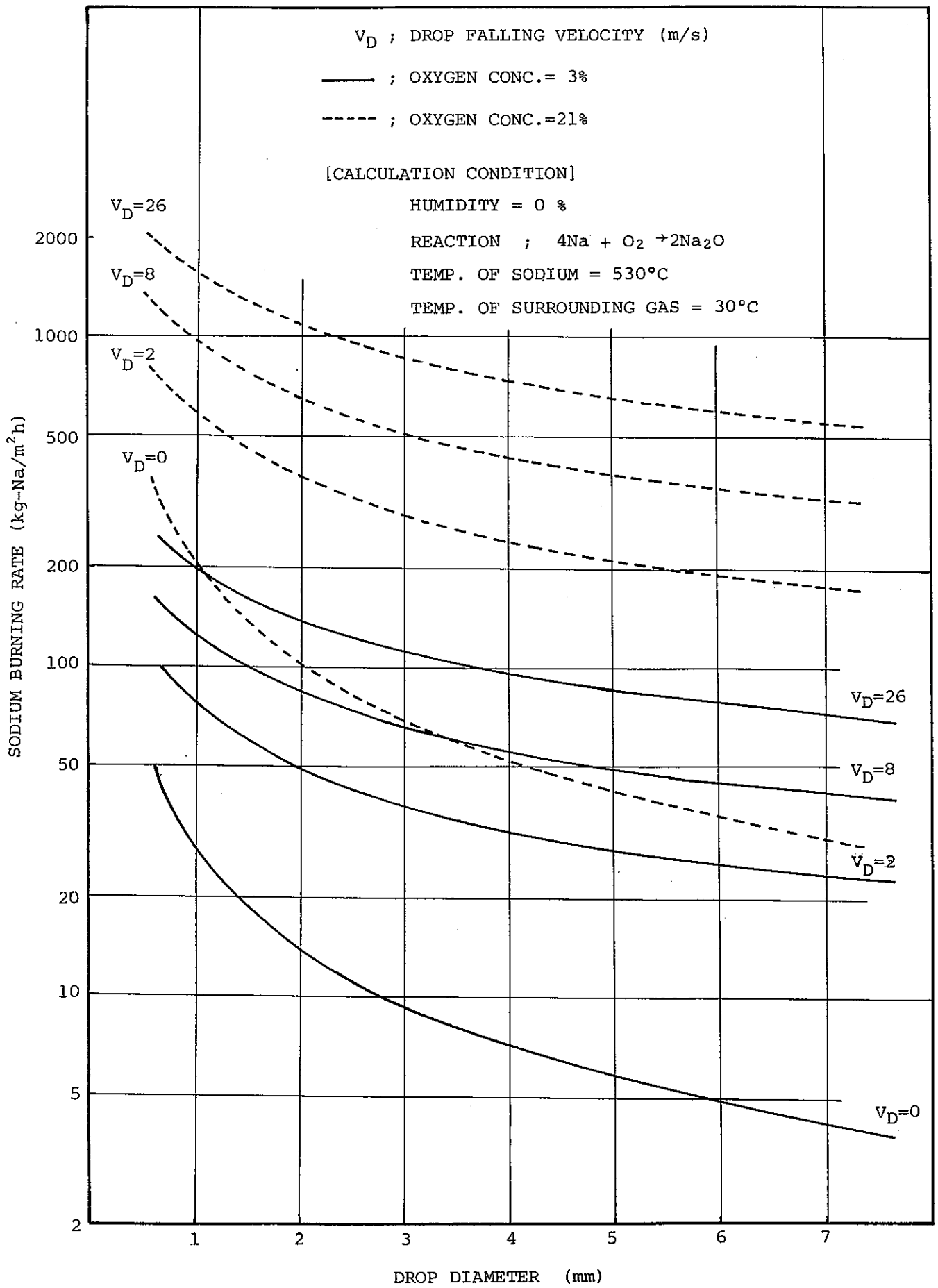


Fig.6.2(1) Parameter Search for Sodium Burning Rate

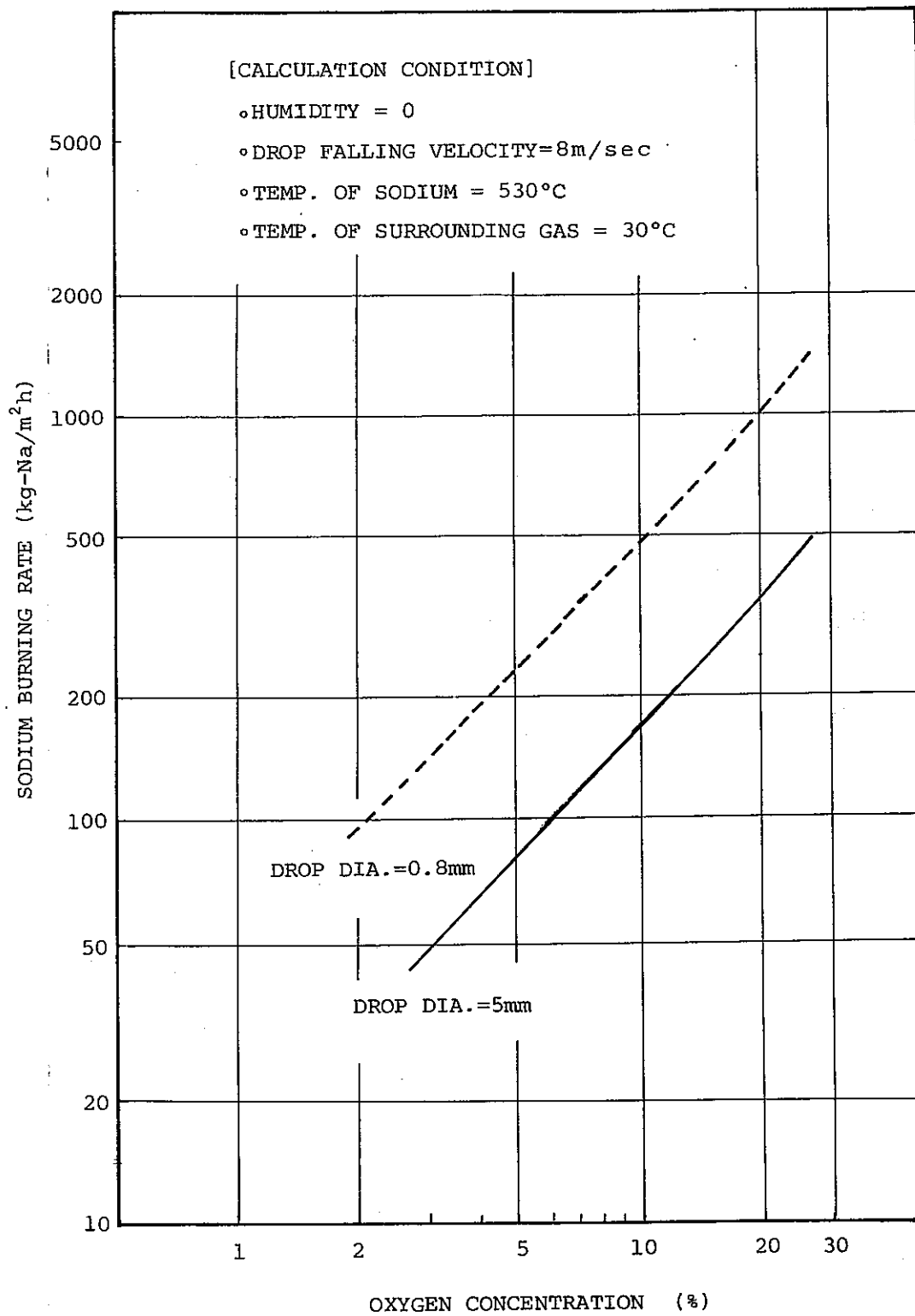


Fig.6.2 (2) Parameter Search for Sodium Burning Rate

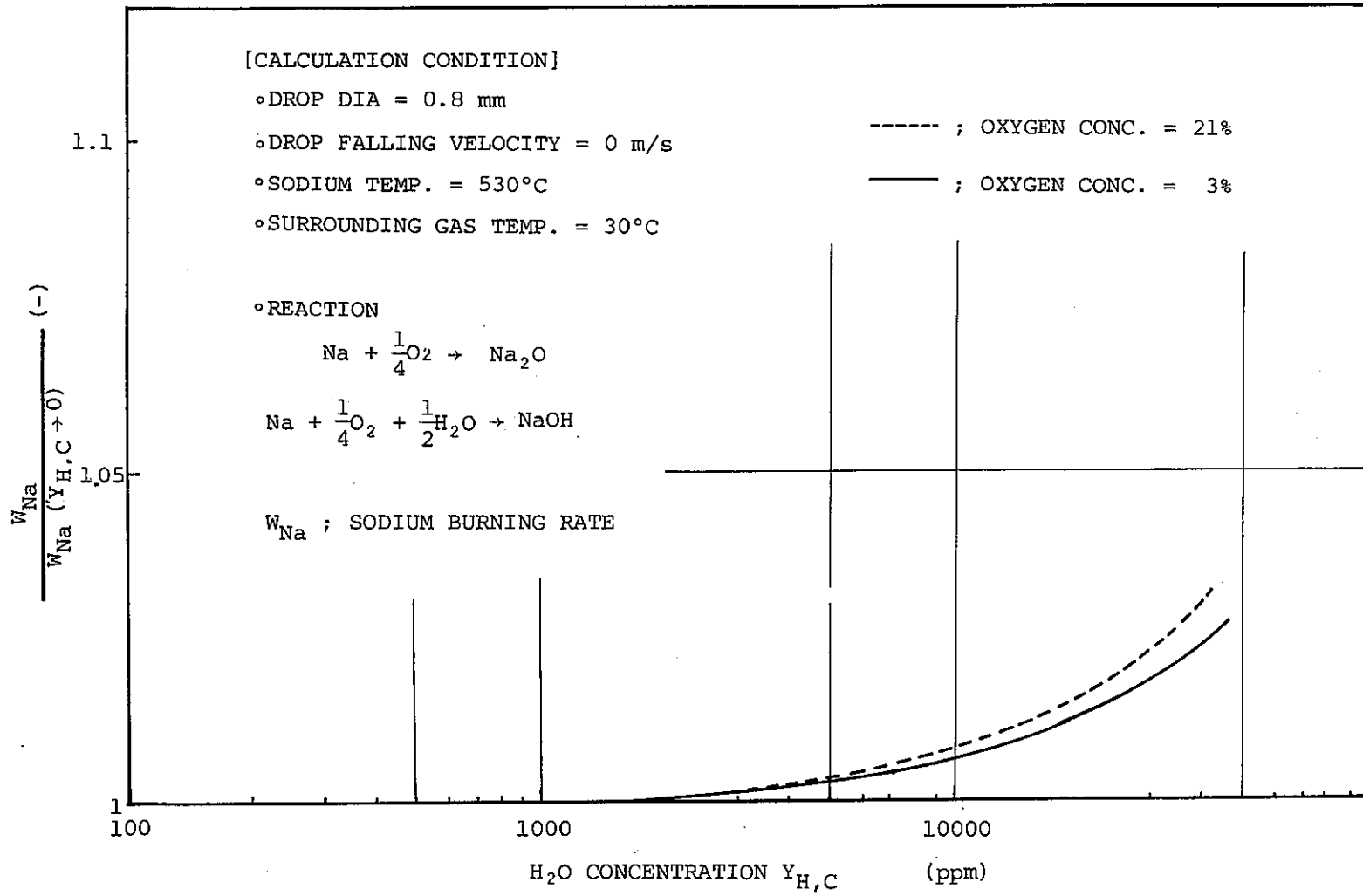


Fig.6.3(1) Effect of Humidity on Sodium Burning Rate

P ; PRESSURE
 T_{gas} ; SURROUNDING GAS TEMPERATURE
 T_d ; DROP TEMPERATURE
 Y_a ; DROP RADIUS
 Y_{o,c} ; O₂ CONCENTRATION
 W_{na} ; SODIUM BURNING RATE
 Y_{n,c} ; H₂O CONCENTRATION

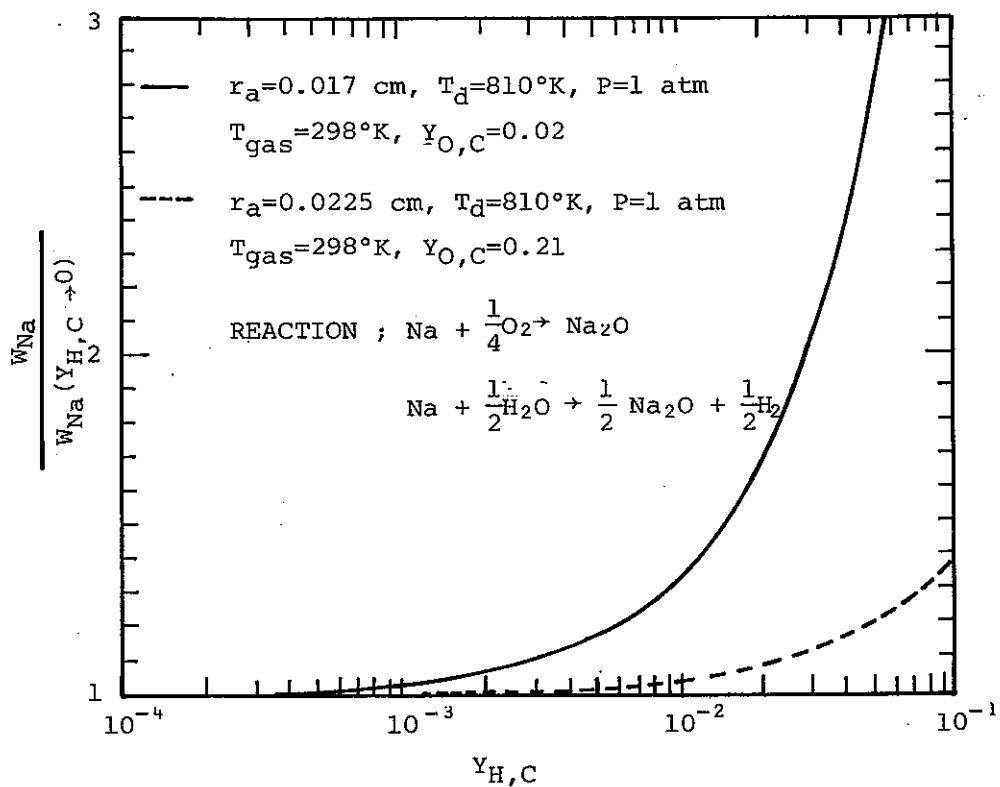


Fig.6.3(2) Effect of Humidity on Sodium Burning Rate

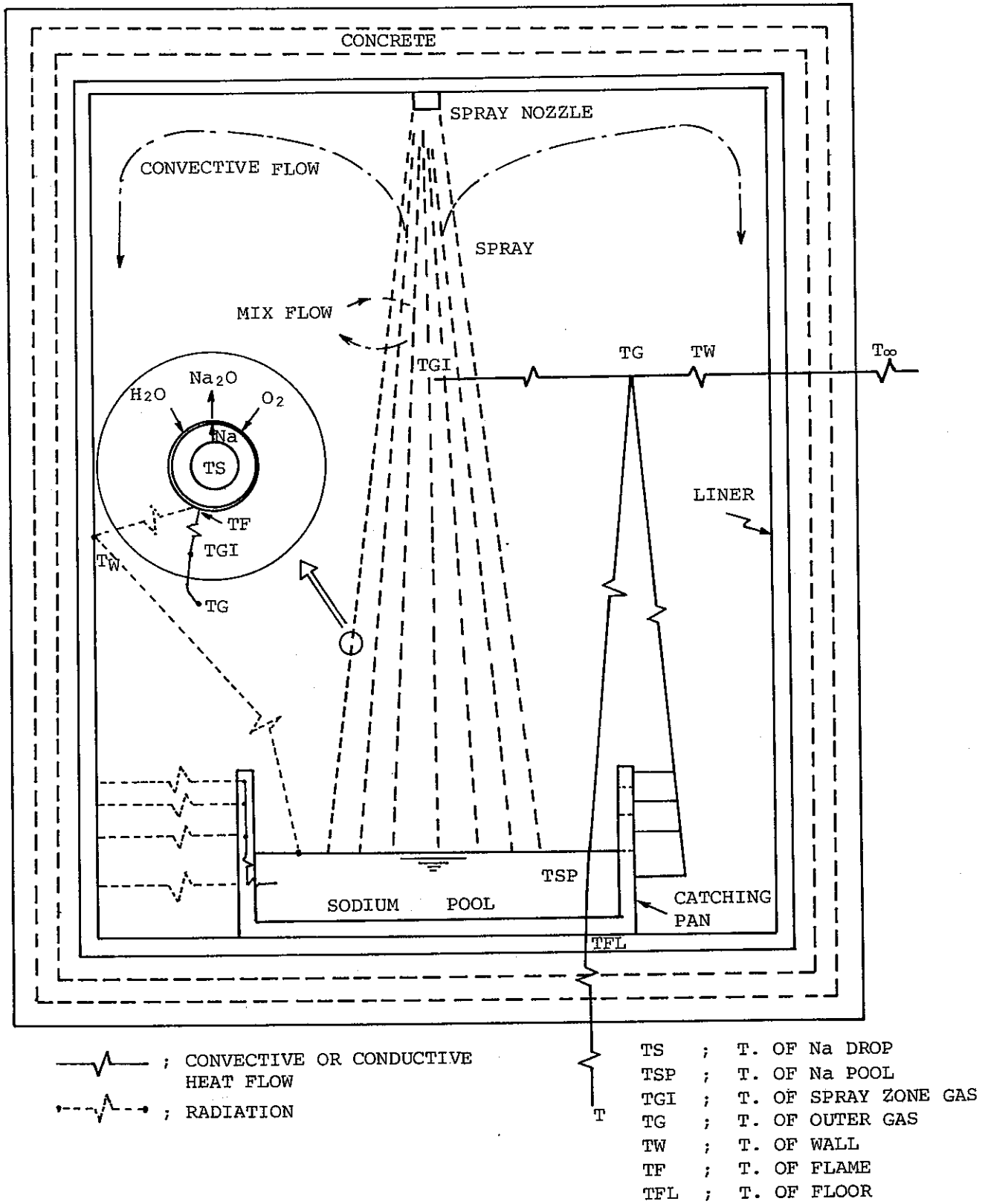


Fig.6.4 Heat and Mass Transfer Model of Spray Fire Calculation

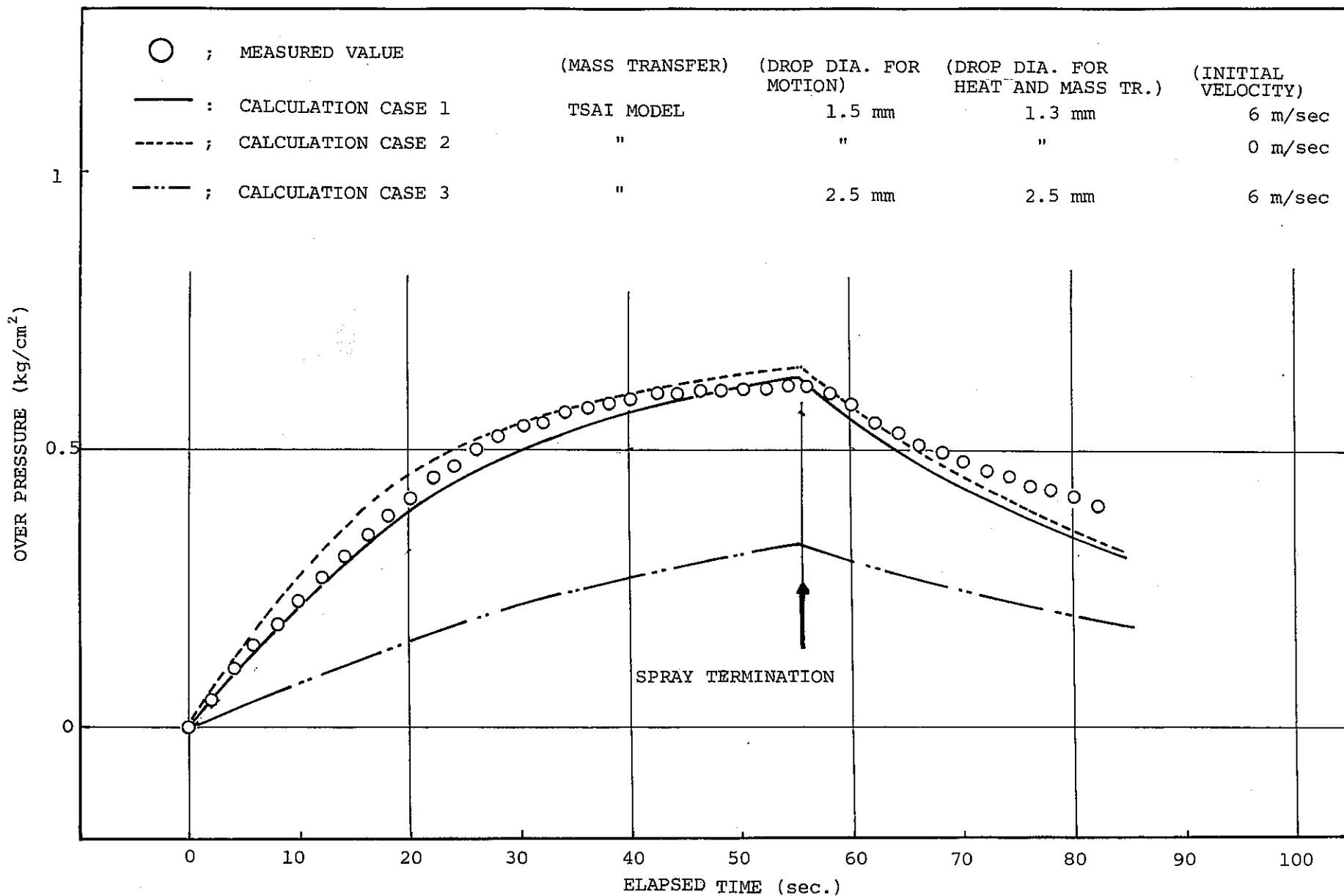
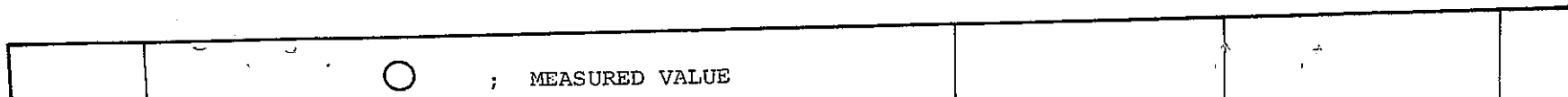


Fig.6.5 Comparison between Calculated and Experimental Value (TASP-N5)



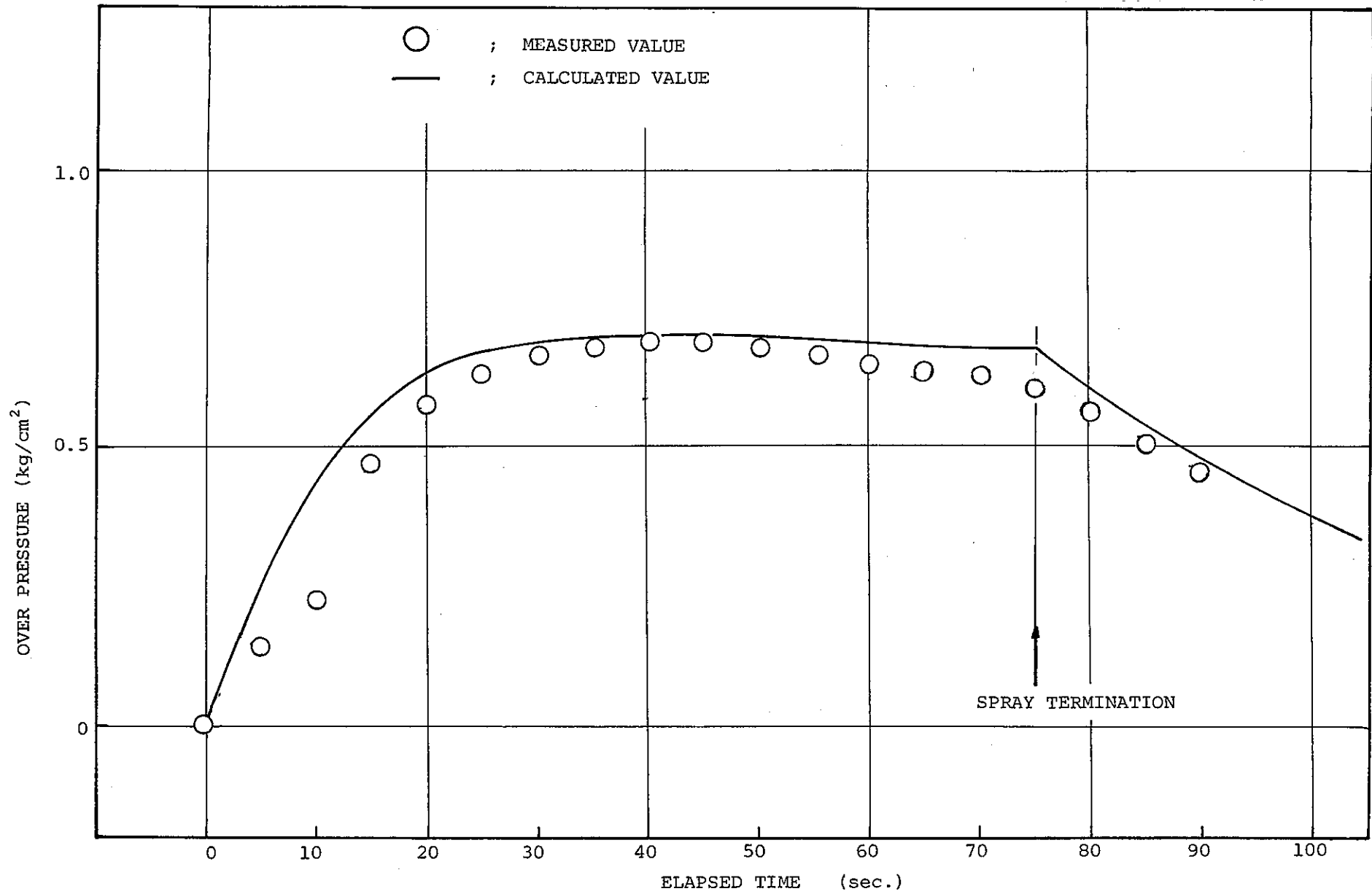


Fig.6.6 Comparison between Calculated and Experimental Value (TASP-N2)

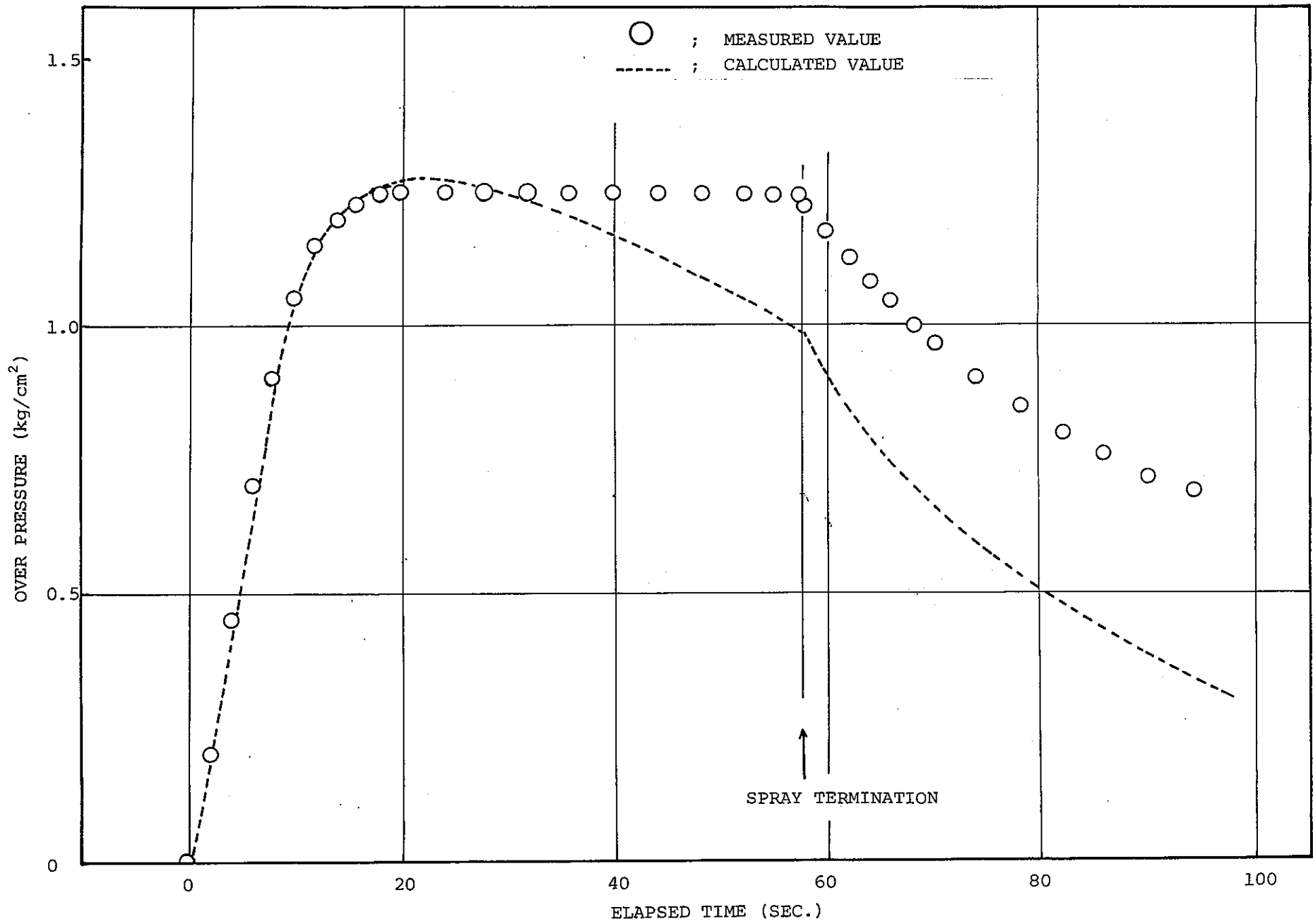


Fig.6.7 Comparison between Calculated and Experimental Value (TASP-A2)

TEMPERATURE (°C)

200

400

600

800

1000

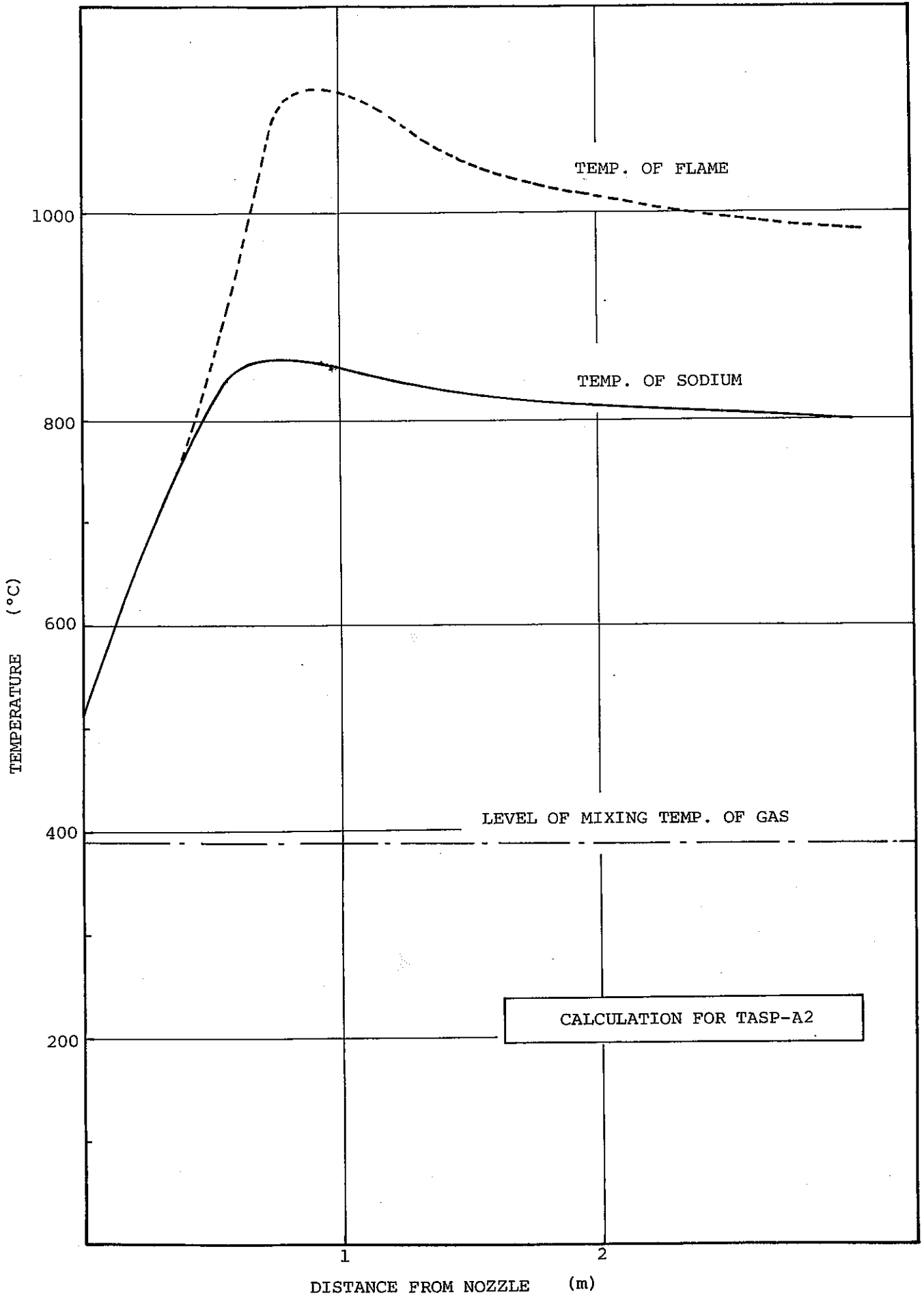


Fig. 6.8 Temperature Distribution (Calculated Value)

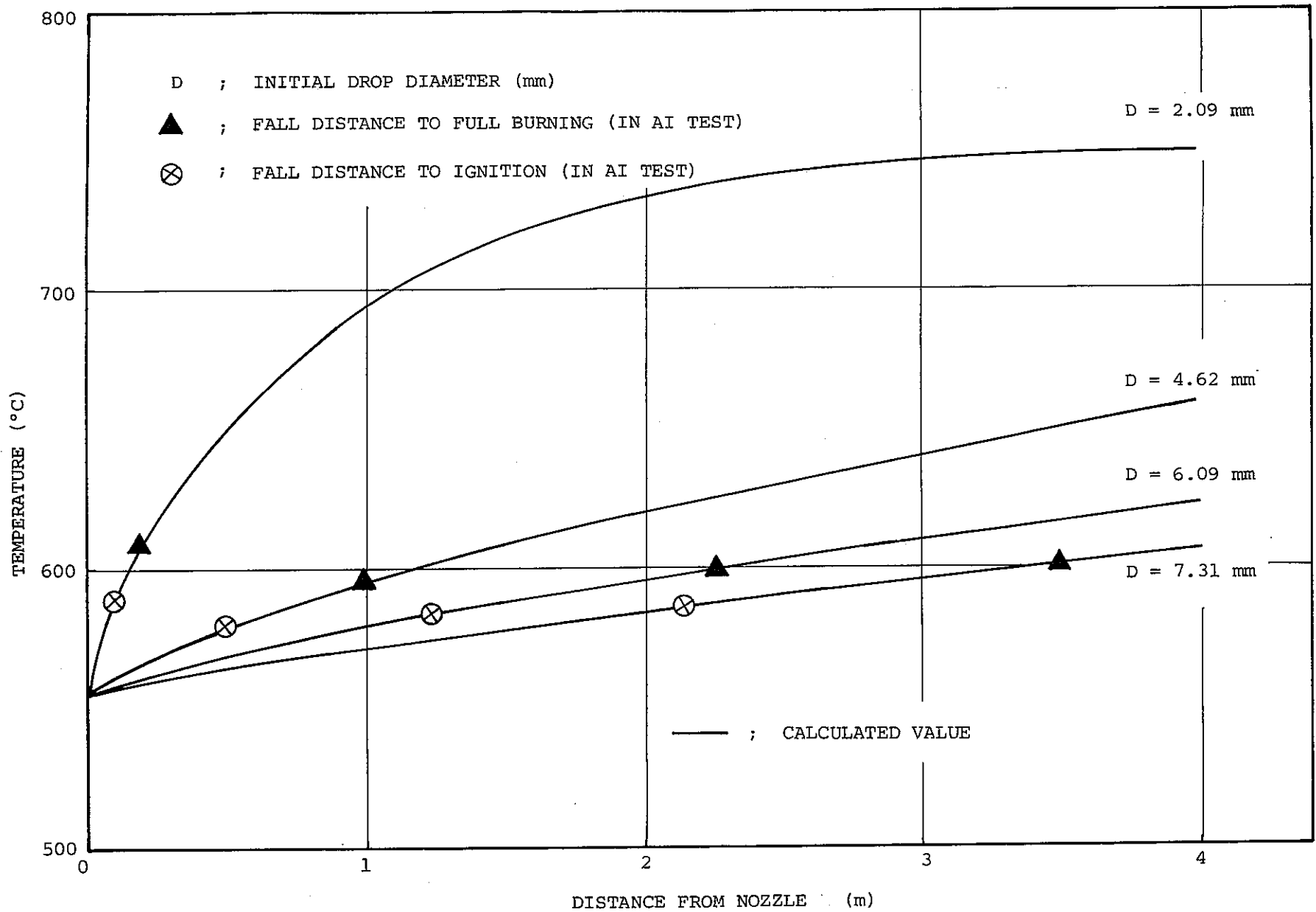


Fig.6.9 Comparison between Calculated Value and AI Single Drop Test

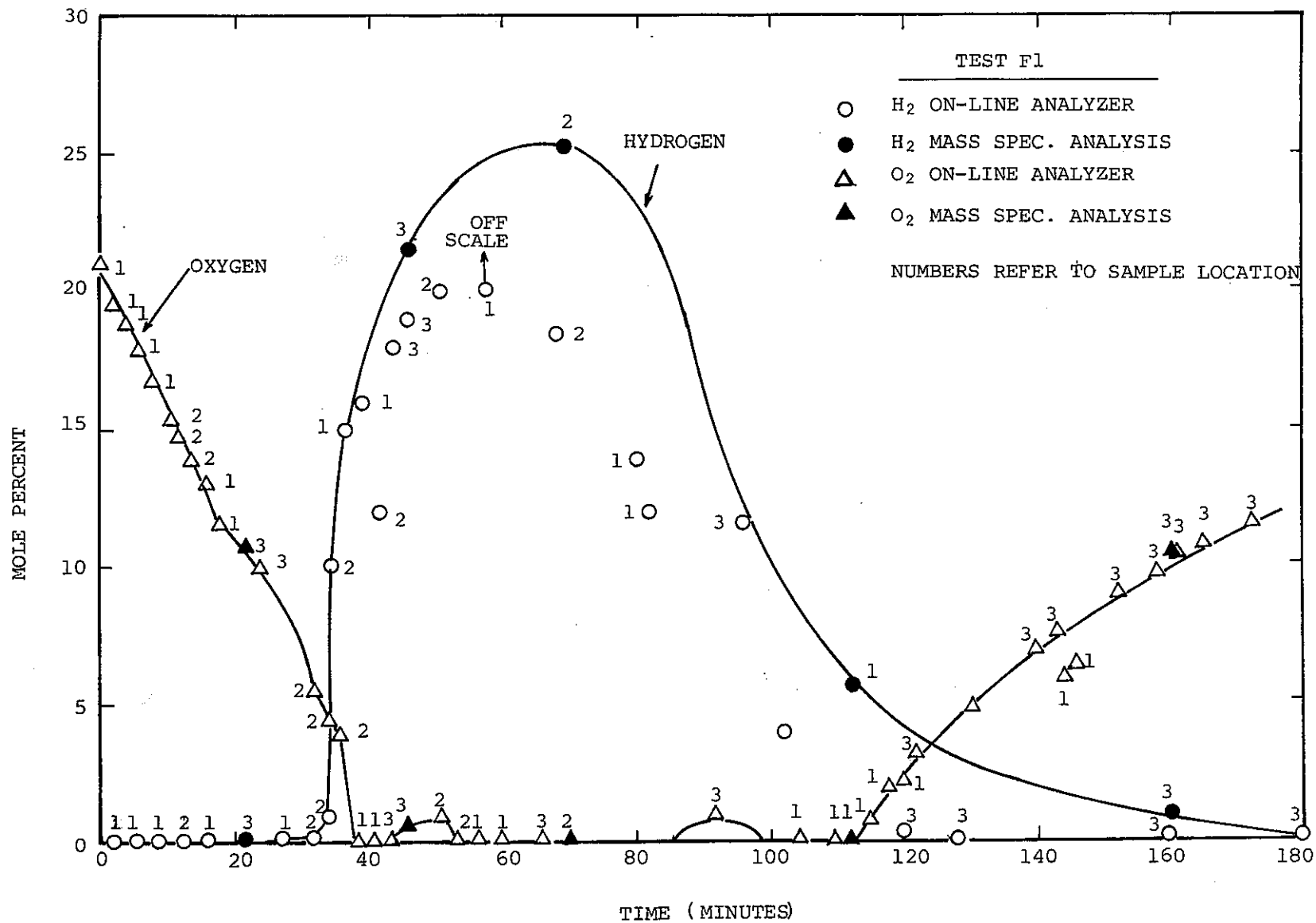


Fig.6.10 Hydrogen Formation in HEDL F-1 Test

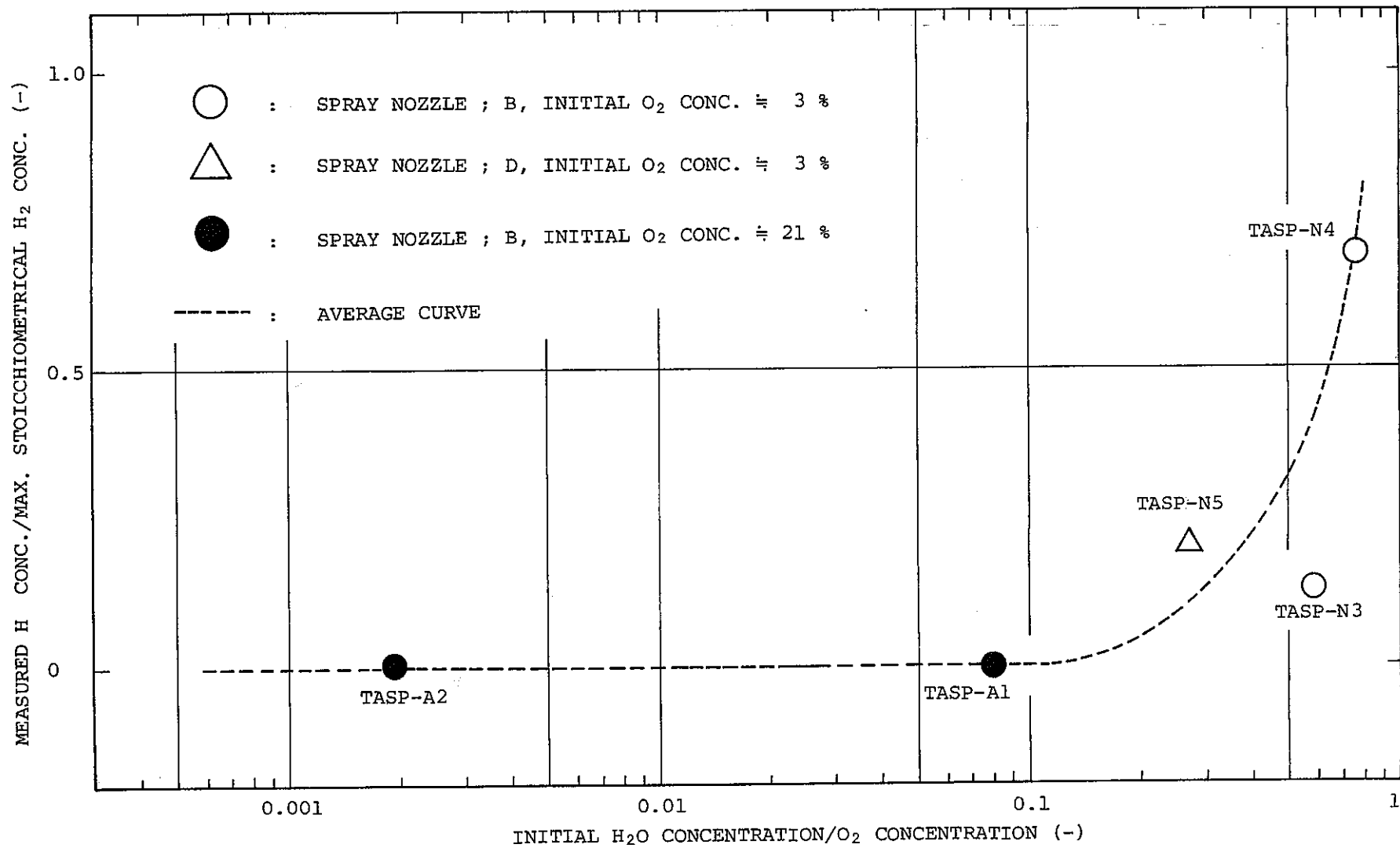


Fig.6.11 Hydrogen Generation Characteristics in TASP Experiment

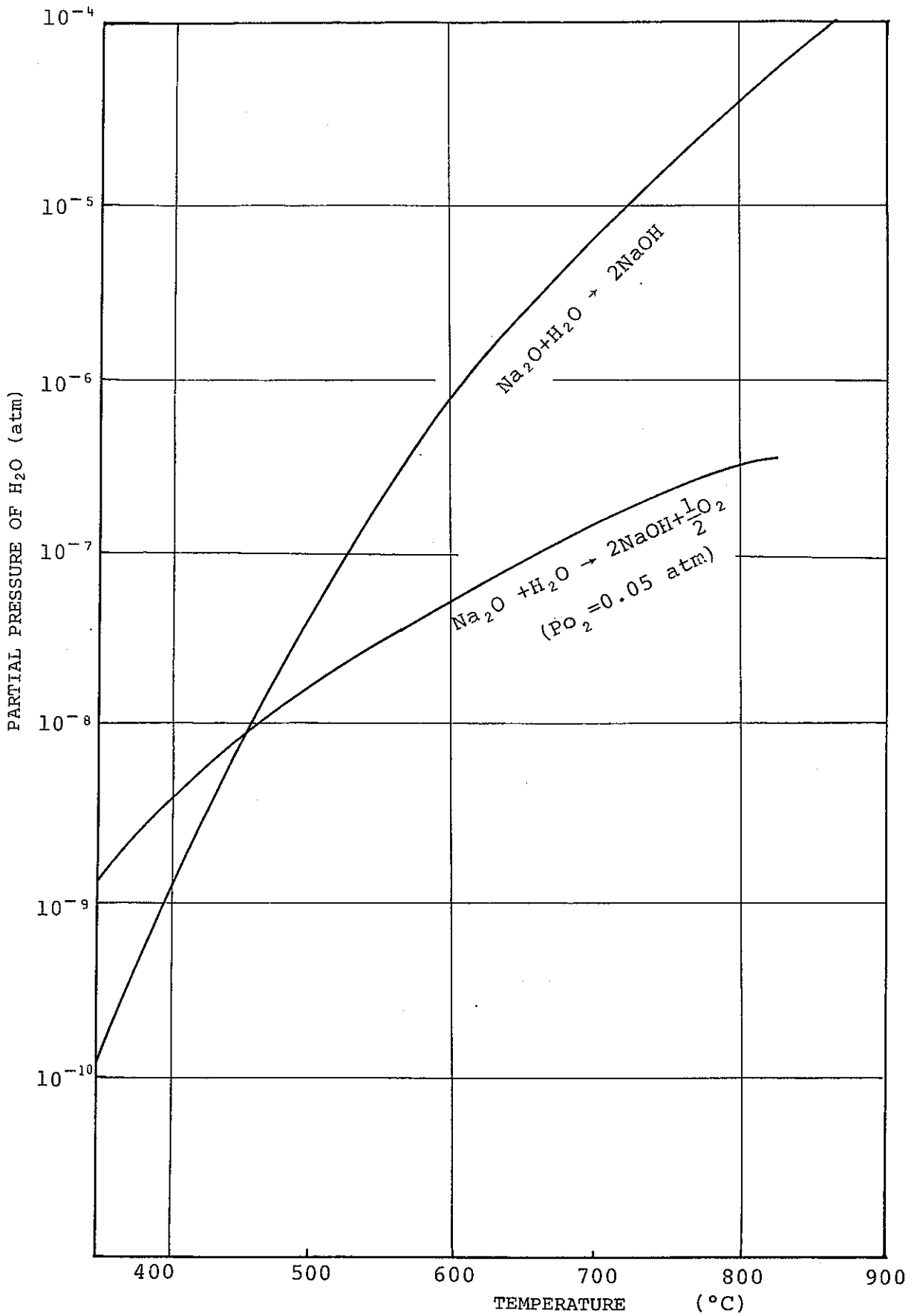


Fig.6.12 Equilibrium H₂O Pressure for the Reaction with Sodium Oxide

Table 3.1 Example of Spray Fire Test

研究機関	実 験 条 件									結 果 例	
	装置規模	RUN NO.	Na 噴出量	Na 噴出率	噴出時間	Na 温度	Na 粒径	O ₂ 濃度	湿分量	ガス圧上昇	最高温度
HEDL (米)	850 m ³	CSTF-AB3	48 kg	343 g/sec	140 sec	600 °C	670 -MMD	21 %	—	0.4kg/cm ²	上昇度 458 °C
	17m High	" NT1	82 "	3.41	4.8 h	545 °C	320 380 MMD	"	—	0.05 "	97 °C
	(上から噴出)			(1.05x10 ² sec) 6.84 (6.72x10 ⁴ sec)							但し軸方向 で大きな差 がある。
CEA (仏)	3.7 m ³ (下から噴出)	FP 216 bis	-		-	550°C				1.8kg/cm ²	1600 °C
		209	0.387 kg		1 sec	"				0.5 "	380 "
		280	1.50 "		3.5	"				2.5 "	1940 "
		256	0.886 "		"	"				2.46 "	1720 "
		228	0.845 "		1	"				1.14 "	1250 "
		232	0.535 "		2	"				1.8 "	1400 "
		232P	0.429 "		3.5	"				1.6 "	200 "
		218	0.521 "		2	"				1.6 "	760 "
		245	1.02 "		2	"				2.4	1700 "
PNC-HITACHI	1.93 m ³ (下から噴出)	RUN-1	0.4 kg	43.5 g/sec	9.2 sec	300 °C	50 ~60MMD	21 %	≒ 0	0.68kg/cm ²	
		2	" "	48.8	8.2 "	"		6 "	"		
		3	" "	50.0	8.0 "	"		0 "	"		
		4	" "	30.8	13.0 "	"		21 "	"		
		5	" "	35.7	11.2 "	500 °C		6 "	"		
		TS-1	0.387 kg		19.5 sec	530 °C		21 "		1.2 "	
		2	0.364 "		7.7 "	"		12.6 "		1.2 "	
		3	0.381 "		7.6 "	"		6.5 "		1.0 "	

Table 3.2 Measuring Items

区 分	名 称	位 置	方法, 計器	点 数	備 考
温 度	各部温度 (ガス, コンクリート, ライナ)	Fig. 3.7 参照	CA熱電対	約100点	
圧 力	容器内圧力	セル内	歪式圧力計	2	
	ライナ隙間圧力	ライナすきま	〃	2	
流 量	Na 噴出流量	噴出弁手前	電磁流量計	1	
O ₂ 濃 度	ガス中O ₂ 濃度	セル内ガス	オルザット分析器	1	OFF ライン
			磁気式O ₂ モータ	1	応答速度: 5秒 (計器仕様表)
湿 分 濃 度	ガス中湿分濃度	〃	露 点 計	1	応答速度: 約20分(実測)
			吸 湿 管	1	OFF ライン
H ₂ 濃 度	ガス中H ₂ 濃度	〃	触媒式H ₂ モニタ	1	モニタ
			サンプリングをし ガスクロ法にて	1	OFF ライン
Naエアロゾル	ガス中浮遊エアロゾル	〃	エアロック式 サンプリング法	1~2	OFF ライン
			光学式濃度計 カスケードインパ クタ法	1	ON ライン
				1	OFF ライン
	水平面沈降エアロゾル	セル内各部	受止め法	数点	総量測定及び エアロック式
	垂直面および水平下面 付着エアロゾル	〃	付着板法	数点	〃

Table 3.3 Test Procedure

No.	主 要 手 順	摘 要
1	試 験 準 備	<ul style="list-style-type: none"> ・ノズル, 受皿, 熱電対取付 ・マンホール閉 (リークテスト準備)
2	リークテスト	<ul style="list-style-type: none"> ・初期圧 = 0.2 %g にて実施
3	N ₂ ガス置換	<ul style="list-style-type: none"> ・N₂ ガスに置換する
4	雰囲気条件調整	<ul style="list-style-type: none"> ・所定のO₂, H₂O濃度に調整する。
5	ナトリウムの充填	<ul style="list-style-type: none"> ・ナトリウムを高温タンクに圧送充填する
6	噴射前準備	<ul style="list-style-type: none"> ・高温タンクおよび供給系の温度調節 ・各計測装置の準備 ・雰囲気ガス条件の最終確認
7	スプレ火災実験	<ul style="list-style-type: none"> ・所定の時間ナトリウムを噴射 ・温度, 圧力, 気体濃度, エアロゾルの測定
8	完了後処置	<ul style="list-style-type: none"> ・高温タンクからのナトリウムドレン ・その他必要処置
9	リークテスト	<ul style="list-style-type: none"> ・実験後常温に戻ってからリークテスト
10	Naの安定化処理	<ul style="list-style-type: none"> ・CO₂ 処理
11	洗浄, 清掃	<ul style="list-style-type: none"> ・マンホールを開け受皿ごとNaを取出す。 ・ライナ, ノズル, 熱電対 etcの洗浄, 処理

Table 3.4 Test Condition of Sodium Spray Fire

実験番号	スプレノズル	漏洩ナトリウム 温度	漏洩ナトリウム 流量	漏洩持続時間	総漏洩 ナトリウム量	初期酸素濃度	初期水分濃度	特 徴	実施順
TASP-N1	フルコーンスプレ B ノズル	501 °C	43.6 l/min	60 秒	43.6 l	0.1% 以下	840 ppm	頭熱効果試験	RUN 1
TASP-N2	同 上	541 °C	34.3 l/min	76 秒	43.4 l	2.85%	1,200 ppm	一次系O ₂ 濃度試験	2
TASP-N3	〃	538 °C	34.5 l/min	63 秒	36.2 l	2.8%	16,500 ppm	湿分効果試験	3
TASP-N4	〃	521 °C	36.7 l/min	75 秒	45.9 l	3.0%	23,000 ppm	"	4
TASP-N5	フルコーンスプレ D ノズル	520 °C	45.5 l/min	59 秒	44.7 l	3.0%	8,000 ppm	粒径効果試験	7
TASP-A1	B ノズル	522 °C	30.7 l/min	18 秒	9.2 l	20.6%	16,500 ppm	二次系O ₂ 濃度試験	5
TASP-A2	〃	512 °C	23.7 l/min	57 秒	22.5 l	20.4%	400 ppm	"	6

- (注) 1. 初期ガス圧は大気圧，初期ガス温度は室温（18.7～31.1℃）である。
2. Bノズルの体積平均径は約1mm，Dノズルの体積平均径は約1.5mmのものである。
3. 総漏洩ナトリウム量は漏洩流量曲線と持続時間より成る面積より算出し，漏洩ナトリウム流量は総漏洩ナトリウム量を持続時間で割った値（平均流量）とした。

Table 4.1 Summary of Water Spary Test

ノズル	ノズルからの距離 (mm)	圧力 = 0.5kg/cm ² g	圧力 = 1.0kg/cm ² g	圧力 = 1.5kg/cm ² g	圧力 = 2.0kg/cm ² g
A	L = 0	スプレ拡がり角 = 67° 流量 = 32 l/min	同左 = 73° 流量 = 43 l/min	同左 = 73° 流量 = 51 l/min	同左 = 70° 流量 = 58 l/min
	L = 1000	θ = 68°	θ = 70°	θ = 72°	θ = 74°
	L = 1750	-	-	-	-
	L = 2500	-	-	-	-
B	L = 0	スプレ拡がり角 = 40° 流量 = 32 l/min	同左 = 40° 流量 = 43 l/min	同左 = 40° 流量 = 52 l/min	同左 = 40° 流量 = 60 l/min
	L = 1000	θ = 44°	θ = 44°	θ = 45°	θ = 46°
	L = 1750	θ = 38°	θ = 38°	θ = 38°	θ = 38°
	L = 2500	θ = 35°	θ = 38°	θ = 36°	θ = 37°
C	L = 0	スプレ拡がり角 = 25° 流量 = 33 l/min	同左 = 28° 流量 = 44 l/min	同左 = 30° 流量 = 52 l/min	同左 = 30° 流量 = 59 l/min
	L = 1000	θ = 38°	θ = 38°	θ = 38°	θ = 38°
	L = 1750	θ = 21°	θ = 30°	θ = 30°	θ = 32°
	L = 2500	θ = 23°	θ = 28°	θ = 30°	θ = 31°
D	距離 L	圧力 = 0.2kg/cm ² g	圧力 = 0.3kg/cm ² g	圧力 = 0.4kg/cm ² g	圧力 = 0.5kg/cm ² g
	L = 0	L=1000とL=2000でのθの平均 = 24° 流量 = 37 l/min	同左 = 29° 流量 = 45 l/min	同左 = 32° 流量 = 52 l/min	同左 = 34° 流量 = 58 l/min
	L = 1000	25°	31°	35°	36°
	L = 2000	23°	26°	29°	31°

(注) L点での
スプレ拡がり角θの定義:

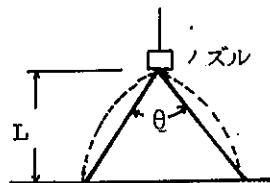


Table 5.1 Summary of Test Result

実験番号			TASP -N1	TASP -N2	TASP -N3	TASP -N4	TASP -N5	TASP -A1	TASP -A2
実験 条件	スプレノズル	-	B	B	B	B	D	B	B
	漏洩ナトリウム温度	°C	501	541	538	521	520	522	512
	漏洩ナトリウム流量	g/min	43.6	34.3	34.5	36.7	45.5	30.7	23.7
	漏洩持続時間	sec	60	76	63	75	59	18	57
	総漏洩ナトリウム量	g	43.6	43.4	36.2	45.9	44.7	9.2	22.5
	初期酸素濃度	%	0.1以下	2.85	2.8	3.0	3.0	20.6	20.4
	〃 湿分濃度	V ppm	840	1200	16500	23000	8000	16500	400
	〃 水素濃度	ppm	80	3300	80	0	0	0	0
	〃 ガス温度	°C	26.3	30.1	31.1	21.1	20.4	22.4	18.7
	〃 ガス圧	mmHg	0	0	0	0	0	0	0
	セル漏洩率	%/day	141	65	43	22.3	11.7	19.2	20.3
圧力・ 温度結果	ピークガス圧	kg/cm ² g	0.39	0.69	0.72	0.62	0.62	1.16	1.25
	ピークガス圧時間	sec	60	40	38	40	59	16	20
	圧力上昇速度	kg/cm ² sec	0.018	0.048	0.08	0.07	0.03	0.22	0.156
	局所ガスピーク温度	°C	317	580	580	543	547	955以上	1214
	受皿Na最高温度	°C	370	460	473	470	480	740	880
	天井ライナ最高温度	°C	36	60	52	44	42	70	98
	側壁ライナ最高温度	°C	34	53	63	53	50	66	90
	コンクリート最高温度	°C	28	35	39	28	28	37	40
雰囲気濃度	到達酸素濃度	%	0.1以下	0.8	0.45	1.0	1.3	8.0	1~3
	〃 湿分濃度	V ppm	-	300	2500	-	540	1800	300以下
	〃 水素濃度	ppm	2300	700	2100	16000	1600	0	0
エアロゾル	発生エアロ(サンプル濃度 リンク値)	g-Na ₃ /m ³	5~10	5~10	5~10	5~10	5~10	30~80	50~100
	(沈降量, 付着量より推定)	"	-	-	22	21	26.1	75.7	163.2
	エアロゾルの平均粒径	μm	2.5	2.8	3.0	2.4	2.	3.4	3.0
	エアロゾルの床面沈降量	g-Na/m ²	-	-	50	44	35	160	350
	エアロゾルの天井付着量	g-Na/m ²	0.86	5.2	0.63	1.6	11	8.9	27
	エアロゾルの側壁付着量	g-Na/m ²	0.64	11.3	2.7	3.4	7.2	11.4	20.2
	エアロゾルの配管持込量	g-Na	-	-	7.1	5.2	3.7	10.0	49.2

Table 5.2 Description on Cascade Impactor

TITLE	CONTENUES	NOTE
(1) TYPE	Andersen-3371	
(2) MEASURABLE PARTICLE DIAMETER	0.41 μm 29.9 μm	FROM SPEC. TABLE
(3) THE NO. OF STAGE	8 STAGE	
(4) MAX. TEMP.	815 °C	
(5) FLOW RATE	2.83 ~ 21.1 N /min.	
(6) SIZE OF FLOW HOLE AND THE NO. OF HOLE		
STAGE 1	Dc = 1.615 mm ϕ , N = 264	
STAGE 2	Dc = 1.181 mm ϕ , N = 264	
STAGE 3	Dc = 0.914 mm ϕ , N = 264	
STAGE 4	Dc = 0.711 mm ϕ , N = 264	
STAGE 5	Dc = 0.533 mm ϕ , N = 264	
STAGE 6	Dc = 0.343 mm ϕ , N = 264	
STAGE 7	Dc = 0.254 mm ϕ , N = 264	
STAGE 8	Dc = 0.254 mm ϕ , N = 156	

Table 5.3 Summary of Cell Leak Rate

RUN NO.	LEAK RATE BEFORE FIRE	LEAK RATE AFTER FIRE
TASP-N1	141 %/DAY	114 %/DAY
TASP-N2	65 %/DAY	37 %/DAY
TASP-N3	43 %/DAY	45 %/DAY
TASP-N4	22 %/DAY	41 %/DAY
TASP-N5	12 %/DAY	20 %/DAY
TASP-A1	19 %/DAY	10 %/DAY
TASP-A2	20 %/DAY	12 %/DAY

(NOTE) LEAK RATE WAS MEASURED AT 0.2 kg/cm²g.

Table 6.1 Physical Property of Sodium and Water

FLUID	SURFACE TENSION (kg/m)	SPECIFIC WEIGHT (kg/m ³)	VISCOSITY (kg.sec/m ²)
SODIUM (530°C)	0.00739	825.0	2.31 x 10 ⁻⁵
WATER (20°C)	0.0157	998.2	1.022 x 10 ⁻⁴

Table 6.2 Flow Chart of Spray Fire Calculation

FLOW CHART	NOTE
<pre> graph TD START([START]) --> SUB_INPUT[SUB. INPUT] SUB_INPUT --> SUB_DTPOOL[SUB. DTPOOL] SUB_DTPOOL --> SUB_FUKID[SUB. FUKID] SUB_FUKID --> SUB_NDROPT[SUB. NDROPT] SUB_NDROPT --> TIME_ZERO[TIME = 0,] TIME_ZERO --> J1(()) J1 --> TIME_INCREMENT[TIME = TIME + DT] TIME_INCREMENT --> SUB_LEAK[SUB. LEAK] SUB_LEAK --> J2{OUTPUT} J2 -- YES --> SUB_OUTPUT[SUB. OUTPUT] J2 -- NO --> SUB_HENKAN[SUB. HENKAN] SUB_OUTPUT --> SUB_HENKAN SUB_HENKAN --> SUB_SPRAY_BOX subgraph SUB_SPRAY_BOX [SUB. SPRAY] SUB_DIFUSE[SUB. DIFUSE] SUB_CONVEC[SUB. CONVEC] SUB_HCCAL[SUB. HCCAL] end SUB_SPRAY_BOX --> SUB_SPOOL[SUB. SPOOL] SUB_SPOOL --> SUB_LINER[SUB. LINER] SUB_LINER --> SUB_GASPAC[SUB. GASPAC] SUB_GASPAC --> J1 </pre>	<ul style="list-style-type: none"> • インพุットデータの読み込み • プール火災時のタイムステップDTの計算 • 液滴落下の計算により空間メッシュおよびスプレ火災時タイムメッシュDTの計算 • 液滴個数 etc の計算 • セル外リークによる補正計算 • アウトプットルーチン • 前タイムステップのものを変換する。 • スプレ火災熱・物質伝達計算 • ガスの自然循環計算 • 壁 etc への熱伝達率計算 • Na プールでの熱, 物質伝達計算 • ライナ, コンクリートの伝熱計算 • ガス空間の計算

Table 6.3 Maximum Aerosol Concentration

CATEGORY	RUN NO.	MAXIMUM AEROSOL CONCENTRATION	FRACTION OF AEROSOL RELEASE	SODIUM DISCHARGE DURATION
		(g-Na/m ³)	(%)	(sec.)
SPRAY FIRE IN AIR-FILLED CONDITION	TASP-A1	76	9 ~ 18	18
	TASP-A2	163	20 ~ 40	57
SPRAY FIRE UNDER LOW OXYGEN CONC.	TASP-N3	22	19 ~ 38	63
	TASP-N4	21	19 ~ 38	75
	TASP-N5	26	22 ~ 44	59
COLUMNAR FIRE UNDER LOW OXYGEN CONC.	RUN- 9	8	7 ~ 14	60
	RUN-10	9	22 ~ 45	220
	RUN-11	39	23 ~ 46	272
	RUN- 6	11	6 ~ 13	52
COLUMNAR FIRE IN AIR-FILLED CONDITION	RUNII -1	84	10 ~ 21	30
	RUNII -2	87	10 ~ 21	38
	RUNII -3	81	10 ~ 19	58