

Na 燃焼解析コードの整備

(大規模空気雰囲気試験データを用いた
スプレー燃焼モデルの検証)



1987年1月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N 9410 87-006
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

1987年1月

Na 燃焼解析コードの整備

(大規模空気雰囲気試験データを用いたスプレー燃焼モデルの検証)

森井 正* , 姫野 嘉昭*

要 旨

SAPFIRE試験施設のSOLFA-2試験容器(内容積:約100m³)を使った、空気雰囲気中での大規模・長時間ナトリウムスプレー火災試験のデータを行い、ASSCOPSコードのスプレーモデルについて試験後解析を実施した。解析の結果、標準的な入力データによるガス温度およびガス圧力等に関する計算結果は、実験値を下回った。そこで、以下の5つの項目について、パラメータサーベイを実施した。

- (1) 燃焼速度定数の影響
- (2) ガス浮力の影響
- (3) プール燃焼の影響
- (4) ガス輻射の影響
- (5) スプレー液滴径の影響

(1)～(4)の範囲では、実験値と解析値との差異を定量的に説明することは困難であったが、(5)において、入力パラメータを選定することで解析値は実験値と一致した。

* 大洗工学センター、安全工学部、プラント安全工学室

Jan., 1987

Development of Sodium Fire Analysis Code
(Validation of Spray Fire Model)

Tadashi Morii * , Yoshiaki Himeno *

Abstract

In the study, the test results from SOLFA-2 of the SAPPFIRE facility were used. But, the calculated results using the standard input data underestimated the test results. So, the other calculations by changing the following parameter were conducted.

- (1) Burning rate constant of a sodium droplet.
- (2) Gas buoyant force.
- (3) Pool burning effect.
- (4) Emmissivity of aerosol containing gas.
- (5) Spray droplet size.

Changing the above parameter from (1) to (4) did not make any significant improvement, in other words, the results still underestimated the test results. But, changing of the (5) parameter improved the calculated results. However, the best estimated results was with a spray droplet whose size is a half of a real one.

* FBR Plant Safety Sec., Safety Engineering Div., OEC.

要 旨	I
目 次	III
List of Tables	IV
List of Figures	V
I. 序文	1
II. ナトリウムスプレー燃焼試験の概要と結果	2
III. 解析条件	3
III. 1 解析モデル	3
III. 2 解析データ	3
III. 2.1 S O F I R E 部	3
III. 2.2 S P R A Y 部	3
IV. 解析結果および検討	5
IV. 1 容器内ガス温度	5
IV. 2 ガス圧力	5
IV. 3 酸素濃度変化	5
V. 検討	6
(1)燃焼速度定数の影響	6
(2)試験容器上部空間の影響 (ガス浮力の効果)	7
(3)プール燃焼の影響	8
(4)ガスふく射率の影響	8
(5)スプレー液滴径の影響	9
VI. 結論	11
(参考文献)	12
APPENDIX A 燃焼抑制槽下部空間の影響	37
APPENDIX B 酸素濃度計の遅れ	39
APPENDIX C 燃焼速度相関式の適用範囲のチェック	42
APPENDIX D 遠心型加圧フルコーンノズルの液滴径実験式について	43

L i s t o f t a b l e s

Table II.1 Test Conditions of RUN-E1..... 13

L i s t o f F i g u r e s

Fig II.1	SOLFA-2 Overview	14
Fig II.2	Gas Temperature and Sodium Spray Rate	15
Fig II.3	Gas Temperature	16
Fig III.1	Calculational Model of SOLFA-2	17
Fig III.2	Details of Structures below Fire Suppression Plate	18
Fig III.3	Volume of Divisions of SOLFA-2	19
Fig IV.1	Temperature within Spray Corn (the lowest mesh)	20
Fig IV.2	Outside Temperature of Spray Corn	20
Fig IV.3	Gas Pressure	21
Fig IV.4	Oxygen Concentration.....	21
Fig V.1	Temperature within Spray Corn (Effect of Burning Velocity Constant)	22
Fig V.2	Outside Temperature of Spray Corn (Effect of Burning Velocity Constant)	22
Fig V.3	Gas Pressure (Effect of Burning Velocity Constant)	23
Fig V.4	Oxygen Concentration (Effect of Burning Velocity Constant).....	23
Fig V.5	Effect of Gas Buoyant Force (Gas Velocity)	24
Fig V.6	Effect of Gas Buoyant Force (Inner Gas Temperature)	24
Fig V.7	Effect of Gas Buoyant Force (Outer Gas Temperature)	25
Fig V.8	Effect of Gas Buoyant Force (Gas Pressure)	25
Fig V.9	Effect of Gas Buoyant Force (Oxygen Contentration)	26
Fig V.10	Temperature within Spray Corn (Effect of Gas Buoyancy)	26
Fig V.11	Temperature outside of Spray Corn (Effect of Gas Buoyancy).....	27

L i s t o f F i g u r e s (C o n t i .)

Fig V.12 Gas Pressure (Effect of Gas Buoyancy) 27

Fig V.13 Oxygen Concentration (Effect of Gas Buoyancy) 28

Fig V.14 Temperature within Spray Corn (Effect of Pool Fire) 28

Fig V.15 Temperature outside of Spray Corn (Effect of Pool Fire) 29

Fig V.16 Gas Pressure (Effect of Pool Fire) 29

Fig V.17 Oxygen Concentration (Effect of Pool Fire) 30

Fig V.18 Temperature within Spray Corn (Effect of Gas Emissivity) 30

Fig V.19 Temperature outside of Spray Corn (Effect of Gas Emissivity) 31

Fig V.20 Gas Pressure (Effect of Gas Emissivity) 31

Fig V.21 Oxygen Concentration (Effect of Gas Emissivity) 32

Fig V.22 Temperature within Spray Corn (Effect of Proplet Size) 32

Fig V.23 Oxygen Concentration (Effect of Proplet Size) 33

Fig V.24 Temperature within Spray Corn (Effect of Proplet Size 0.1cm) 33

Fig V.25 Outside Temperature of Spray Corn (Effect of Proplet Size 0.1cm) 34

Fig V.26 Gas Pressure (Effect of Proplet Size 0.1cm) 34

Fig V.27 Oxygen Concentration (Effect of Proplet Size 0.1cm) 35

Fig B.1 Sampling System of Oxygen Meter 40

Fig B.2 Correction of Oxygen Concentration Test Data 41

I 序 文

高速増殖炉原型炉（以下“もんじゅ”という）では、冷却材であるナトリウム（以下、Naと略す）が大量に漏洩した場合を想定し、さまざまな設計上の配慮がなされている。これは、漏洩したNaの顕熱ばかりでなく、雰囲気中の酸素や水蒸気との反応熱や発生するエアロゾルが、建屋や機器に重大な影響を及ぼすと考えられる為である。ところでNa燃焼は、その形態によってスプレー燃焼とプール燃焼とに分けることができる。“もんじゅ”設計では、これらの燃焼による影響の評価を、スプレー燃焼解析コード“SPRAY-ⅢM”及びプール燃焼解析コード“SOFIRE-MⅡ”をカップリングさせた“ASSCOPS”コードで行っている。

設計評価に用いたこれらのコードの検証については、まずSOFIRE-MⅡコードは、内容積21m³の試験容器を使用したNaプール燃焼試験¹⁾のデータを用いて低酸素濃度雰囲気²⁾の検証を行い、次に西独KfKのFAUNA装置を使用したNaプール燃焼試験³⁾のデータで、空気雰囲気⁴⁾の検証を行っている。SPRAY-ⅢMコードについては、前述の内容積21m³の試験容器を使用したNaスプレー燃焼試験⁵⁾のデータを用いてその検証⁶⁾を行っている。ただし、この検証に用いた試験は、実機における事故条件と比較すると、その規模もさることながら、スプレー時間が約1分と短い。実機では数十分にわたってNaスプレー漏洩が継続する。このため、より大規模かつ長時間にわたる試験データでの検証が望まれた。そこで、昭和60年にSAPFIRE施設を使用した大規模長時間Naスプレー燃焼試験Run-E1⁷⁾を実施した。本研究では、このRun-E1のデータを用いてSPRAY-ⅢMコード（正確には、ASSCOPSコードのSPRAYモジュール）の検証を行ったので、その結果をここに報告する。

本報告書では、Naスプレー燃焼試験の概要と結果を第Ⅱ章に、基準ケースの解析条件を第Ⅲ章に、解析結果を第Ⅳ章、パラメータサーベイの結果を第Ⅴ章に示す。

II Naスプレー燃焼試験Run-E1の概要と結果

試験には、大洗工学センターの大規模Na漏洩燃焼試験施設「SAPFIRE」に設置してある内容積約100m³の鋼製耐圧試験容器「SOLFA-2」を用いた。

Table. II.1に試験条件を、Fig. II.1にSOLFA-2の概略図を示す。試験は、SOLFA-2を密閉にして行った。

主要な結果として、ガス圧力変化をFig. II.2に、ガス温度変化をFig. II.3に示す。これらの図からわかるように、発生圧力は最大1.2kg/cm²-g、平均ガス温度は、最高700℃にもなり、スプレー燃焼の激しいことがよくわかる。詳細な結果、装置及び方法等は文献⁷⁾を参考にされたい。

III 解析条件

III.1 解析モデル

SOLFA-2をFig. III.1に示すようにモデル化する。

ASSCOPSコードの2セルモデルを使用し、燃焼抑制板上のNa燃焼を考慮に入れるため燃焼抑制板より上の空間を仮想的に2分割する。燃焼抑制槽内に貯留されるNaは床構造材の一部としてモデル化する。また、SOLFA-2試験容器の天井と側壁部とは、解析コード上は側壁として扱う。

III.2 解析データ

III.2.1 コードのSOFIRE部

Na受皿、保温材及び床のより詳細なモデル図をFig. III.2に示す。試験では、スプレーノズルから落下したNaは、燃焼抑制板上を燃えながら流れ、連通穴より貯留槽に流下して溜まってゆく。しかし、解析ではコードの制約から、漏洩Naは抑制板上に溜まってゆくものとし、貯留槽内のNaは別途400℃のNaとしてその顕熱を考慮することとした。

SOLFA-2の容器内雰囲気を上下方向で2つのセルに分割する際の分割境界をどこにするかはコード上は任意に決めることが出来るが、ここでは、下から高さ1mのところに分けることにした。この分割に従うと、開口部直径は3.6mで、下部のセルであるセル1の天井と上部のセルであるセル2の床はそれぞれ仮想的な境界となる。各部初期温度は、貯留槽内の400℃のNaを除くと全て30℃である。

SOLFA-2の容器内体積データをFig. III.3に示す。

III.2.2 コードのSPRAY部

スプレーの特性を予め把握する目的で、Naスプレー燃焼試験の前にスプレーノズルの水試験を実施し、下に示すデータを得た。コードのSPRAY部の入力データの中でスプレー液滴に関するものは、これらのデータをそのまま使用した。

体積平均径	0.2196cm
表面積平均径	0.1643cm
コーン角	36°
漏洩流量	0.51kg/s
漏洩ナトリウム温度	505℃
スプレー落下高さ	3.98m
液滴初速度	10.3m/s

(ノズル出口径が8.7mmφで、流量が0.51kg/sにより求まる)

コーンメッシュ数 5

その他、主要なデータとして、以下の3つがある。

反応速度定数 1000ft/hr (酸素)
の補正係数 300ft/hr (水蒸気)

これらの値は、21m³空気雰囲気ナトリウムスプレー燃焼試験でSPRAYコードを検証した時の推奨値である。⁶⁾

反応生成物割合 (Na₂O₂とNa₂Oとの生成比割合)

Na₂O₂/Na₂O : 40/60 O₂質量濃度 > 11.3%
Na₂O₂/Na₂O : 0/100 O₂質量濃度 < 11.3%

これらは、もんじゅの空気雰囲気でのナトリウム燃焼評価で用いられているデータである。

ガスの輻射特性

完全不透明とする。

- ① Naプール → 雰囲気ガス 輻射率 0.65
② 雰囲気ガス → 壁, 天井 輻射率 0.73
(外部)

これは、もんじゅのナトリウム燃焼評価において、雰囲気ガス温度・圧力を保守的に評価する時に用いられるデータである。

IV 解析結果

前節に示したデータを用いたASSCOPSコードによる計算結果と、RUN-E1で得た試験データとを比較した結果を以下に述べる。

IV.1 容器内ガス温度

スプレーコーンの内部温度の比較をFig. IV.1に、スプレーコーンの外部温度のそれをFig. IV.2に示す。

まず、スプレーコーンの内部温度に関しては、Fig. IV.1より、試験データは、計算コードの燃焼域ゾーン温度に近い値となった。これは、試験ではスプレー中に熱電対に多数の発火Na液滴がふれていることを考えると、妥当な結果であろう。また、Fig. IV.2からわかるように、コーン外部ガス温度に関しては、計算コードは、試験値と比べるとかなり低い温度にしか予測していないことがわかる。

IV.2 ガス圧力

計算コードで、ガス温度が上述したように過小評価されていることから当然の結果として、計算結果は試験値を下回っている。Fig. IV.3にその比較を示す。計算モデルでは、Fig. II.1にある燃焼抑制槽下部空間の存在を無視している。このため、コード解析値は、ガス圧力を高めに評価していることになるが、それでもこのように試験値よりも低い値でしかない。

尚、Appendix Aに、コードの計算モデル上は存在を無視している燃焼抑制槽下部空間の影響について、その存在を考慮に入れた場合の検討結果を示す。

IV.3 酸素濃度変化

Fig. IV.4に、酸素濃度変化の実験値と計算値との比較を示す。試験では、SOLFA-2の酸素濃度測定を容器内ガスをサンプリングラインで吸引することによって行っている。このため、測定には時間遅れを伴うことになるが、Fig. IV.4に示した試験値は、この時間遅れを補正したものである。補正方法はAppendix Bに示した。

図を見ると、実験データは、最初の数分間は酸素濃度があまり変化せず*、その後急激に減少している。減少の勾配は計算値よりも大きく、解析コードが、酸素消費速度（すなわち、Na燃焼速度）を過小評価していることになる。

* 試験容器内においてスプレー燃焼域から、ガスサンプリング吸い込み口までの時間遅れがあるか、サンプリングラインでの遅れが完全には補正しきれていない懸念がある。

V 検 討

前節の結果は、コードのデータとしては「もんじゅ」設計で使用した値を用い、また燃焼速度定数には21m³試験容器を使用したNaスプレー燃焼試験⁵⁾ですでに検証済みの値を使用したものである。しかし、すでに述べたように、特に容器内ガス温度、圧力及び酸素消費速度の計算値が実験値を大きく下回る結果となった。

これらの不一致の原因を検討するため、以下の項目の影響を調べるべくASSCOPSコードによるパラメータサーベを実施した。(なお、Appendix Cに、ASSCOPSコードの燃焼速度相関式の適用範囲について調べた結果を示す。)

- (1) 燃焼速度定数の影響
- (2) ガス浮力の影響
- (3) プール燃焼の影響
- (4) ガス輻射率の影響
- (5) スプレー液滴径の影響

(1) 燃焼速度定数の影響

SPRAYコードの反応速度係数は、以下の式で与えられる。

$$\epsilon_0 = \left(1 + \frac{D_0}{V_0 \tau_B} \right)^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

ここで ϵ_0 : Naと酸素の反応速度係数 (m/h)
 D_0 : N₂中におけるO₂拡散定数 (m²/h)
 τ_B : 燃焼ゾーン半径 (m)
 V_0 : 燃焼速度定数 (m/h)

D_0 についてはSPRAYコードでは次式が採用されている。

$$D_0 = (1.412 \times 10^{-5} T^{1.664}) / p \times 0.36 \dots\dots\dots (2)$$

ここに T : 温度 (°K)
 p : 圧力 (atm)

V_0 についてはSPRAYコードでは300ft/hとしており単位換算すると次のごとくなる。

$$V_0 = 300 \times 0.3048 = 91.44 \text{ (m/h)} \dots\dots\dots (3)$$

$V_0 = 1500$ (ft/h)との可能性もあり、この場合次のようになる。

$$V_0 = 1500 \times 0.3048 = 457.2 \text{ (m/h)} \dots\dots\dots (4)$$

ϵ_0 、 D_0 の目安をつけるために、(1)、(2)式において、 $T \simeq (1000^\circ\text{C} + 500^\circ\text{C}) / 2 \simeq 750^\circ\text{C}$ 、 $p = 1 \text{ atm}$ 、 $\tau_B = 1.1 \text{ mm}$ と仮定するとすると、

$$D。 \sim 1.412 \times 10^{-5} (750 + 273)^{1.684} / 1 \cdot 0.36 \\ \sim 0.595 \quad (\text{m}^2/\text{h})$$

$$\varepsilon。 = \left(1 + \frac{0.595}{457.2 \cdot 0.0011} \right)^{-1} = 0.458$$

となる。

計算コードが、燃焼速度に関して過小評価であったため、 $\varepsilon。$ を1にして（入力データとしては $V。 \sim \infty$ ）計算を実施した。Fig. V.1にコーンの内部温度を、Fig. V.2にコーンの外部温度、Fig. V.3にガス圧力、Fig. V.4に酸素濃度変化を示す。

ⅢとⅣで述べた計算を基準ケースとすると、この基準ケースと比べて計算値は実験値に近づいて来たが、コーンの外部温度とガス圧力に関しては依然として過小評価となっている。

(2) 試験容器上部空間の影響（ガス浮力の効果）

すでにASSCOPSコードのSPRAYモジュールで、内容積21m³の試験容器によるスプレー試験結果⁵⁾は良好に再現されている⁶⁾。またこのことから、今回明らかになったRun-B1試験結果と解析コードによる計算結果との不一致の原因の1つは、試験体系の相異に起因するものと推定する。

すなわち、文献(5)の試験では、天井からNaをスプレーさせているのに対して、Run-B1試験では容器の高さ方向途中からNaをスプレーさせており、スプレーノズルの位置が異なる。スプレーノズルの位置の違いによる影響を一番受けると考えられるのは、ガス浮力による対流である。ちなみにASSCOPSコードでは、ガス浮力の有効高さは、スプレー落下高さであり、このことは天井からNaがスプレーされることを前提にモデル化されていることを示している。これに対して、Run-B1では、浮力の有効高さは、Naスプレー高さではなく容器の高さと考えるのが妥当であり、これよりコードではRun-B1におけるガスの浮力を実現象より小さ目に評価している可能性がある。

このような理由から、コードを改修して、ASSCOPSコードの浮力計算項を0.5倍、1倍、2倍（他の条件はすべて同じ）の3通りで計算を行い、浮力がどの程度計算結果に影響を及ぼすか検討を行った。

Fig. V.5に、計算で得たスプレーコーン内のガス流速とその時間変化を浮力パラメータにして示す。予想通り、ガス流速は浮力にほぼ比例して増加している。なお、Fig. V.5のガスの流れ方向は垂直方向上向きである。

Fig. V.6, Fig. V.7にスプレーコーン内のガス温度（最下層）と、スプレーコーン外のガス温度を示す。浮力が大きくなると、スプレーコーン内のガス温度は低下し、他方スプレーコーン外のガス温度は上昇している。この結果は、浮力が大きくなると、ガス流速が増加し、それによってスプレーコーン内外のガス交換とそれに伴う熱移動が激しくなるため、このため温度の高かったスプレーコーン内の温度は低くなり、スプレーコーン外の温度は逆に高くなる。圧力については、スプレーコーン外の温度の影響を受け易いため（スプレーコーン外のガス体積の方が大きい）、Fig. V.8に示したように浮力が大きいと

高くなる。浮力の酸素濃度に与える影響については、結果をFig. V. 9に示す。興味深いことに酸素濃度の時間変化は、浮力の影響（ガスの流れ、混合）をほとんど受けてない。これは、ASSCOPSコードのスプレーモデルでは、酸素濃度は空間1点近似、すなわち、セル内の酸素濃度はどこも一様であると仮定しているからである。

浮力を2倍にしたケースと、試験結果との比較をFig. V. 10, Fig. V. 11, Fig. V. 12, Fig. V. 13に示す。基準ケース（IV章で述べた計算結果）に比べてわずかに実験値に近づいたが、不一致は依然として大きい。

ここに示した結果から、浮力項を増加させることによって、コード計算値と試験結果との不一致は、多少改善されることが明らかになった。

(3) プール燃焼の影響

基準ケースでは、スプレー燃焼と同時にプール燃焼も起こっているとの想定のもとで計算を実施している。しかし、解析モデル上は、スプレー燃焼とプール燃焼とは相互間のガスの行き来を通してのみ影響を及ぼし合っている。そこで、スプレー燃焼とプール燃焼との物理的相互作用の程度を調べる目的で、極端なケースとしてプール燃焼のない場合を想定した計算を行った。

計算結果のうち、Fig. V. 14にスプレーコーン内の温度を、Fig. V. 15にスプレーコーン外の温度を、Fig. V. 16にガス圧力を、またFig. V. 17に酸素濃度変化を、それぞれ試験データ、基準ケースの計算値とともに示す。Fig. V. 17に示した様に、プール燃焼を考慮しないと酸素消費速度は非常に小さくなり、計算値は試験値とまったく合わなくなる。しかし、ガス温度と圧力は逆にプール燃焼を考慮しない方が試験値に近づいている。これは奇異に思えるが、プール燃焼で発生した熱は、その大部分が計算上はガスに伝わることなく、受皿を通して容器側に逃げているためである。さらに、プール燃焼を考慮しない場合、それだけ酸素消費量は少なくなり、結果的にスプレー燃焼がより高い酸素濃度雰囲気を生じ、スプレー燃焼とプール燃焼とが同時に起こっている場合よりもガス温度と圧力が高く計算される。

(4) ガスの輻射率の影響

基準ケースでは、プールからの輻射に関してガスが完全不透明であるとして解析している。ここでは、このガスの輻射率の影響を調べるために、ガスは透明であるとして計算を行ってみた。実際のガスの輻射率は、エアロゾル濃度等により変化するが、上記2つの極端なケースの中間に存在するはずである。

計算結果のうちFig. V. 18にスプレーコーン内の温度、Fig. V. 19にスプレーコーン外の温度、Fig. V. 20にガス圧力、Fig. V. 21に酸素濃度変化を、それぞれ試験値と基準ケースの計算値とを比較する。まずFig. V. 18及びFig. V. 19よりガス温度と圧力に関しては、ガスが透明と想定したケースの方が、不透明なケースよりも高くなっている。一般にプール燃焼のみの場合、ガスの温度と圧力は、ガスが不透明と想定して計算した場合の方が高くなる。これは、プー

ルからの輻射が、直接ガスを温めるためである。しかし、スプレー燃焼の生じている今回のケースでは、これとは反対の結果となった。一般に、プールとスプレーの混合燃焼の場合、ガスを温める要因としては、プール表面からと比べ高温のスプレー粒子からの熱移行が支配的となる。しかるに、スプレー粒子からガスへの輻射率は、コード内で酸素濃度の関数として決められており、輻射によるガスへの熱エネルギー移行量は上記両ケース（ガス不透明・透明）とも同じである。それに対して、ガスが不透明なケースでは、ガスから壁への輻射が生じているため、その分だけ、透明なケースに比べて、ガス温度は低くなるためであると考え*。（透明なケースでは、ガスから壁への輻射はない）

(5) スプレー液滴径の影響

最後に、スプレー液滴径の影響を調べた。スプレー液滴径は、計算結果に対してもまた試験結果に対しても大きな影響を与えるパラメータの1つである。試験の際は、これを精度よく求めておく必要があり、そのためRun-E1では水試験を行って測定している。また、この水試験で得た液滴径をASSCOPS コードによる基準ケースの計算の入力データとして用いたことは既に説明した通りである。ところで、水で決定した液滴径とNaでのそれとの間の相関についてはAppendix Dに加圧フルコーンノズルで生成した液滴について文献調査結果を示したが、それによると、水試験で得たデータをNaに適用しても、殆んど誤差は生じない。

さて、スプレー液滴径の影響を調べる計算では、既に述べた基準ケース（体積平均液滴径0.22cm）に対して液滴径を0.1757cm, 0.1318cm, 0.1cm の3通りに変化させた**計算を実施した。Fig. V. 22に外部ガス温度、Fig. V. 23に酸素濃度変化に関する計算結果を示す。Fig. V. 23から液滴径0.1cmを用いたケースでは、計算値は試験で得た酸素減少速度と非常に良い一致を見せている。また、同様な液滴径での外部ガス温度変化もこれまでのすべての計算結果よりも実験値に近い。従って、試験値ともっともよく合う液滴径0.1cmでの計算値と、基準ケースでのその比較をFig. V. 24から図V. 27に示す。0.1cmのケースでガス圧力が実験値を上廻っているのは、Appendix A に示した様に、解析で受皿下の空間を考慮に入れていないため、この空間を考慮に入れた計算を行うと最高ガス圧力は約0.94 kg/cm²gとなり実験値に近づく。

ここに示した結果から、スプレー液滴径を水試験データの約半分にすると、計算値は試験値に最も近づくことが明らかになったが、これには、次の解釈が成り立つ。すなわち、解析コードのスプレー燃焼モデルが不正確で、コードで計算されるナトリウム燃焼速度は実際の液滴径の約半分の値を用いて計算を行う必要があるということである。この他、本文中では言及していないが、実際の試験ではNaスプレー液滴が下方のNa受皿に落下する際に激しく飛び散り、この時に生じた飛沫の燃焼が観察されている。解析コードではこのような飛沫の燃焼まではモデル化されていない。このため、結果的に燃焼発熱量の大きい試験結果が解析計算値を大きく上廻ることになったことも原因の1つと推定する。

* 以上の説明からわかるように、ガスが透明とした解析は矛盾している。すなわち、スプレー

粒子からガスへの輻射は、ガスが不透明であるように扱い、ガスから壁へのふく射は透明であるように扱っている。これは、スプレー粒子からガスへのふく射率率以外のふく射率は入力では与えられるが、スプレー粒子からガスへのふく射率は入力では与えられないためである。

** 0.1cm以下では、コード上の制約により計算実行不可能

VI 結 論

昭和60年に、SAPFIRE 試験施設の試験容器SOLFA-2を使った空気雰囲気中での大規模長時間Naスプレー燃焼試験を実施したが、その時に得たデータを用いてASSCOPSコードの検証解析を実施した。

最初に解析の基準ケースとして、従来より標準的に使用されているコードの入力パラメータセットを用いた計算を行った。その結果、酸素濃度減少速度、(すなわち計算で得たNa燃焼速度)が試験値の約1/2とコードが過少評価となり、またこのため、ガス温度と圧力もかなり試験値を下回った。

そこで、以下の5項目について、ASSCOPSコードのパラメータサーベイを実施した。

- (1) 燃焼速度定数の影響
- (2) ガス浮力の影響
- (3) プール燃焼の影響
- (4) ガス輻の影響
- (5) スプレー液滴径の影響

(1)~(4)を検討した結果は、実験値を解析値との差異を定量的に説明することは出来なかった。しかし(5)において、スプレー液滴径を実測値の約1/2にすることで、計算値と実験値との不一致は大幅に改善され、特に酸素消費速度の一致は良好となった。

また、輻射に関して、ガスが透明として仮定した入力データは、スプレーコード内の輻射率と矛盾のあること、また、プール燃焼とスプレー燃焼とを同時に考えた場合、スプレー燃焼のみの場合よりもガス温度がかならずしも高くはならないことも判明した。

これより、ASSCOPSコードでは、コード内の燃焼速度を今回の実験条件の範囲では実際の液滴径の約1/2として計算する必要のあることが明らかになった。

(参 考 文 献)

- 1) 八木., 他., 「一次収納構造健全性試験」, PNC SJ222 77-08(1), (1977年7月)
- 2) 八木., 他., 「一次収納構造健全性試験」, PNC SJ222 77-08(2), (1977年7月)
- 3) W. Cherdron., Ch. Hosemann, "The Sodium Fire Tests FAUNA-5 and FAUNA-6," KfK PSB-Bericht Nr.1667 (K1.11) (1982)
- 4) O. Miyake., et al., "Comparison of Sofire MII Predictions with the Results of German FAUNA F5 and F6 Tests" PNC SN941 85-67, (March, 1985)
- 5) 中原., 他., 「ナトリウム・スプレー燃焼試験」, PNC SJ222 82-16 (1), (1982年12月)
- 6) 宮原., 他., 「ナトリウム・スプレー燃焼の解析 (II)」, PNC SN241 83-10, (1983年7月)
- 7) 森井., 他., 「大規模ナトリウムスプレー燃焼試験」 (執筆中)
- 8) W. E. Ranz., et al., Chem. Engng. Progr., 48 (1952), 141, 1973
- 9) Turner, G. M and R. W. Maulton : Chem. Eng. Progr., (1953)
- 10) 石岡., 他., 化学工学, (1964)
- 11) Chemical Engineer Handbook (3'rd edition), PP18~62, (1973)

Table II. 1 Test Conditions of RUN - E1

Spray Conditions	
(1) Sodium Temperature	505 °C
(2) Spray Flow Rate	36.7 g/min
(3) Mass of Supplied Sodium	1101 g
(4) Spray Duration	30 min
(5) Height of Falling Nozzle	4.23 m
(6) Deliberly Pressure at Spray Nozzle	1.5 kg/cm ² -g
(7) Mean Droplet Diameter*	1.6 mm (Surface Mean Diameter) 2.2 mm (Volume Mean Diameter)
* These Data are obtained by the results of water spray test	
Test Vessel Conditions	
(1) Oxygen Concentration	21 %
(2) Gas Pressure	atmospheric pressure
(3) Vessel Volume	95.5 m ³
Sodium Drainage	
After an hour from sodium spray discharge, sodium temperature decreased below 400 °C and sodium was drained to the tank.	

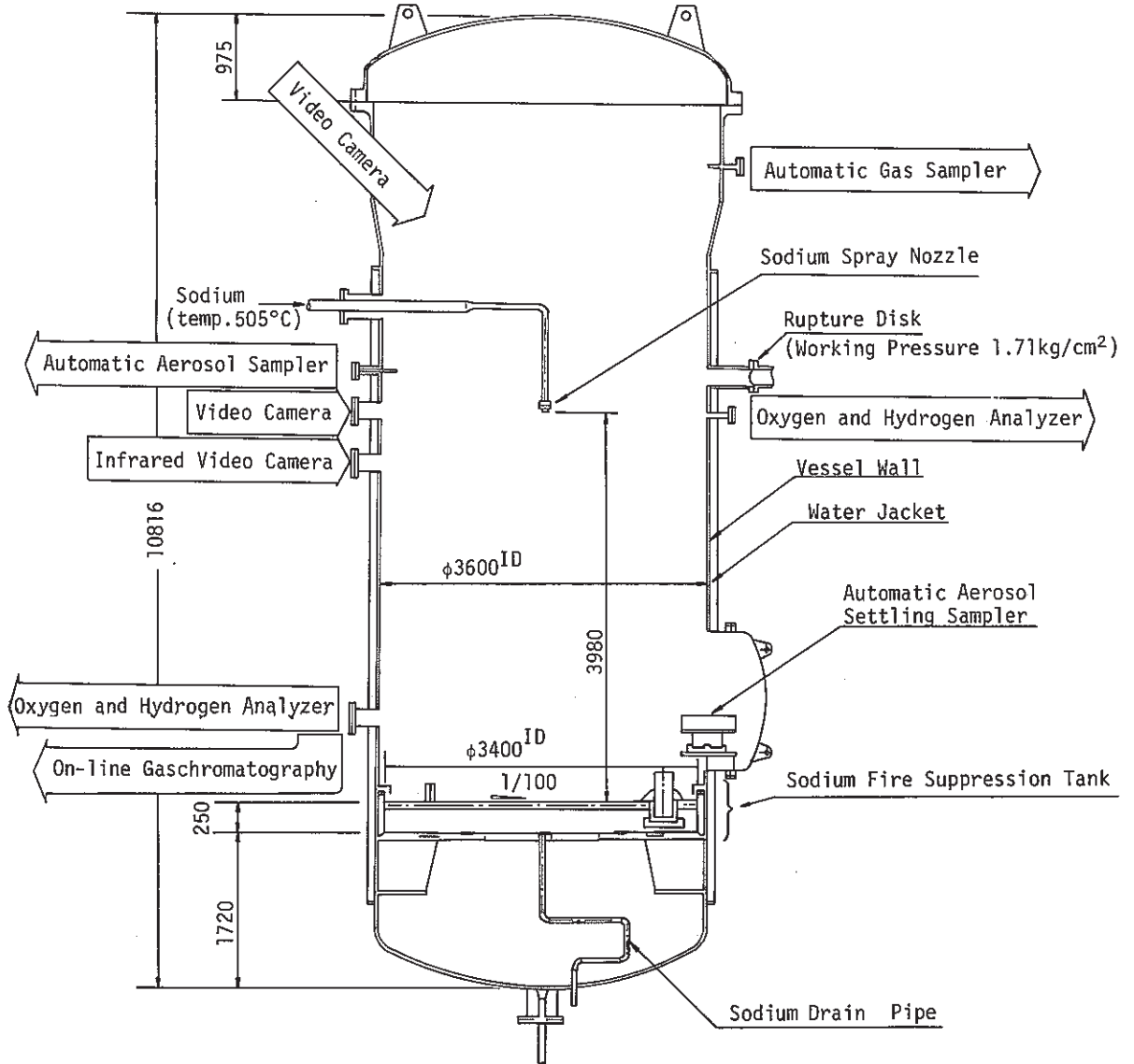


Fig. II. 1 Cross-Sectional Drawing of SOLFA-2

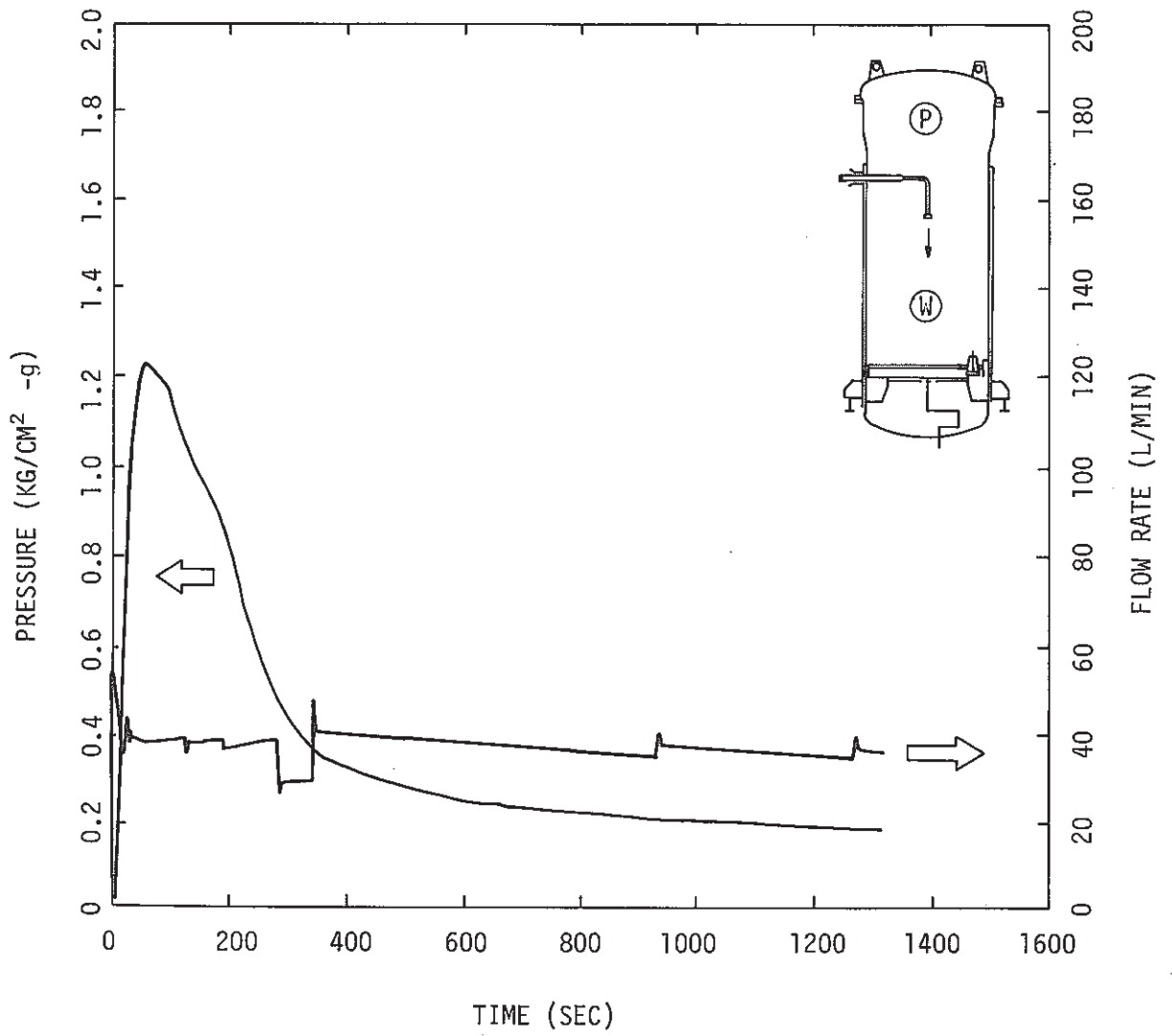


Fig. II. 2 GAS PRESSURE TRANSIENT AND SODIUM SPRAY FLOW RATE

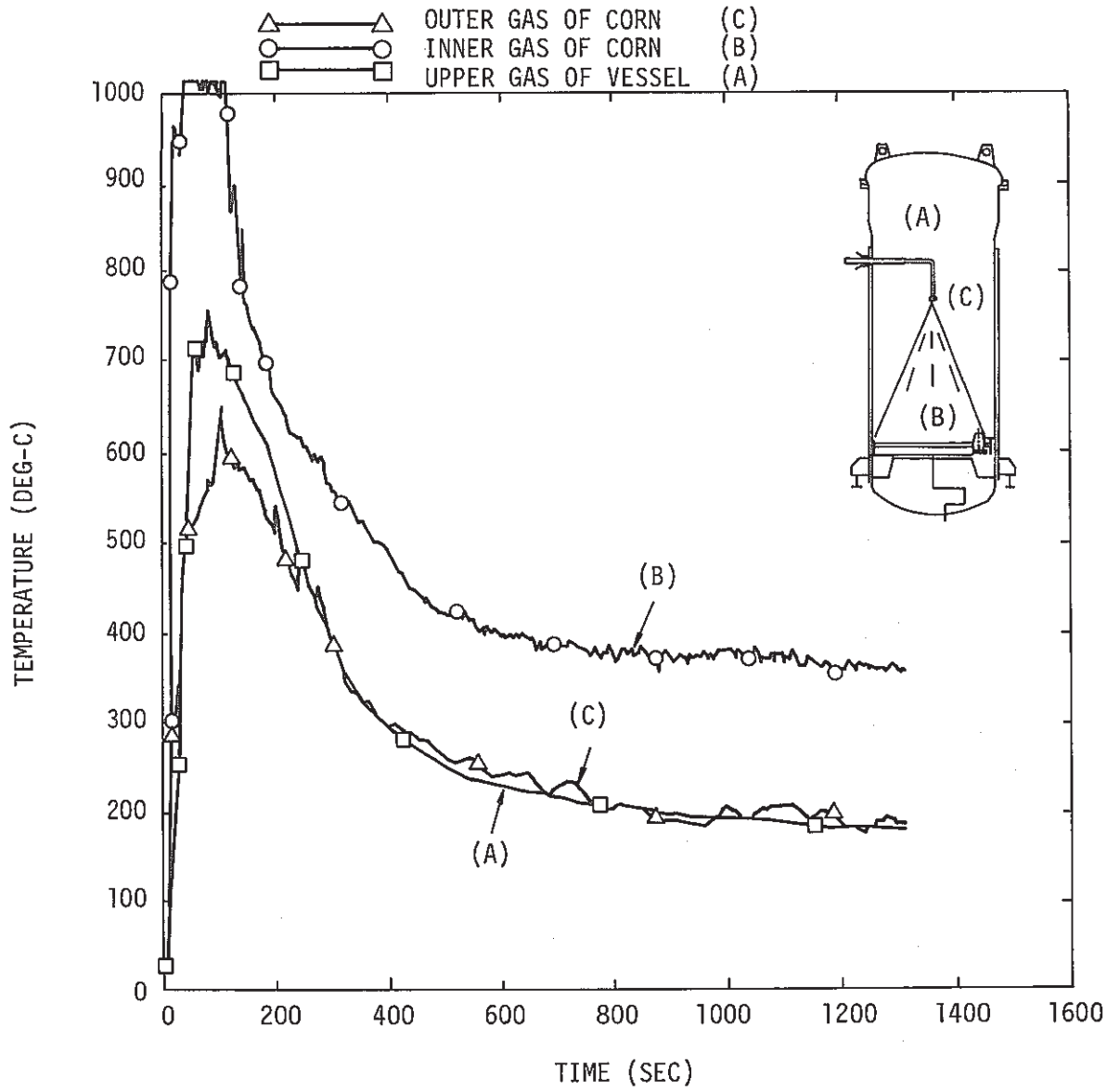


Fig. II. 3 GAS TEMPERATURE TRANSIENTS

Keys

S.S = carbon steel

SUS = stainless steel

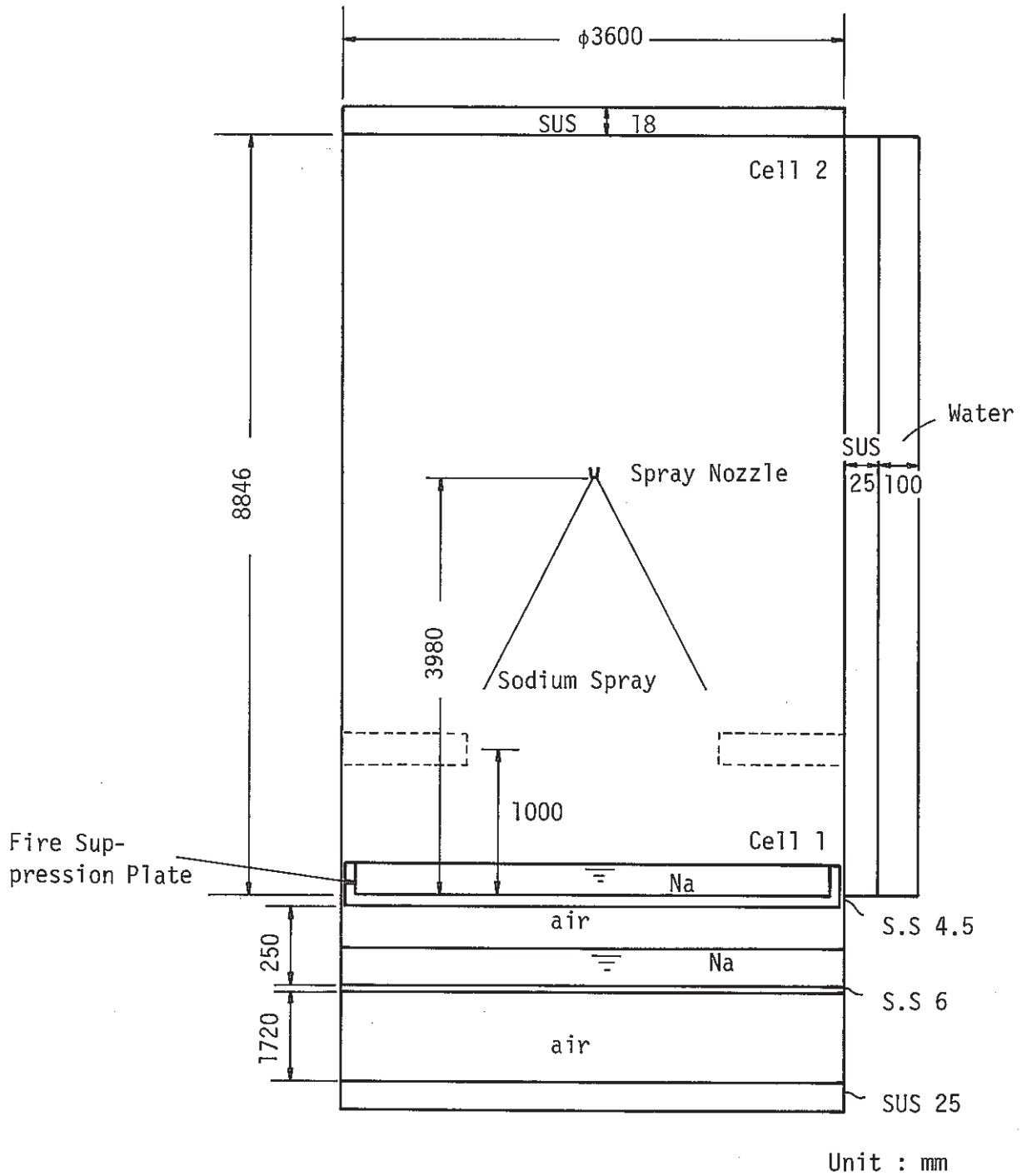


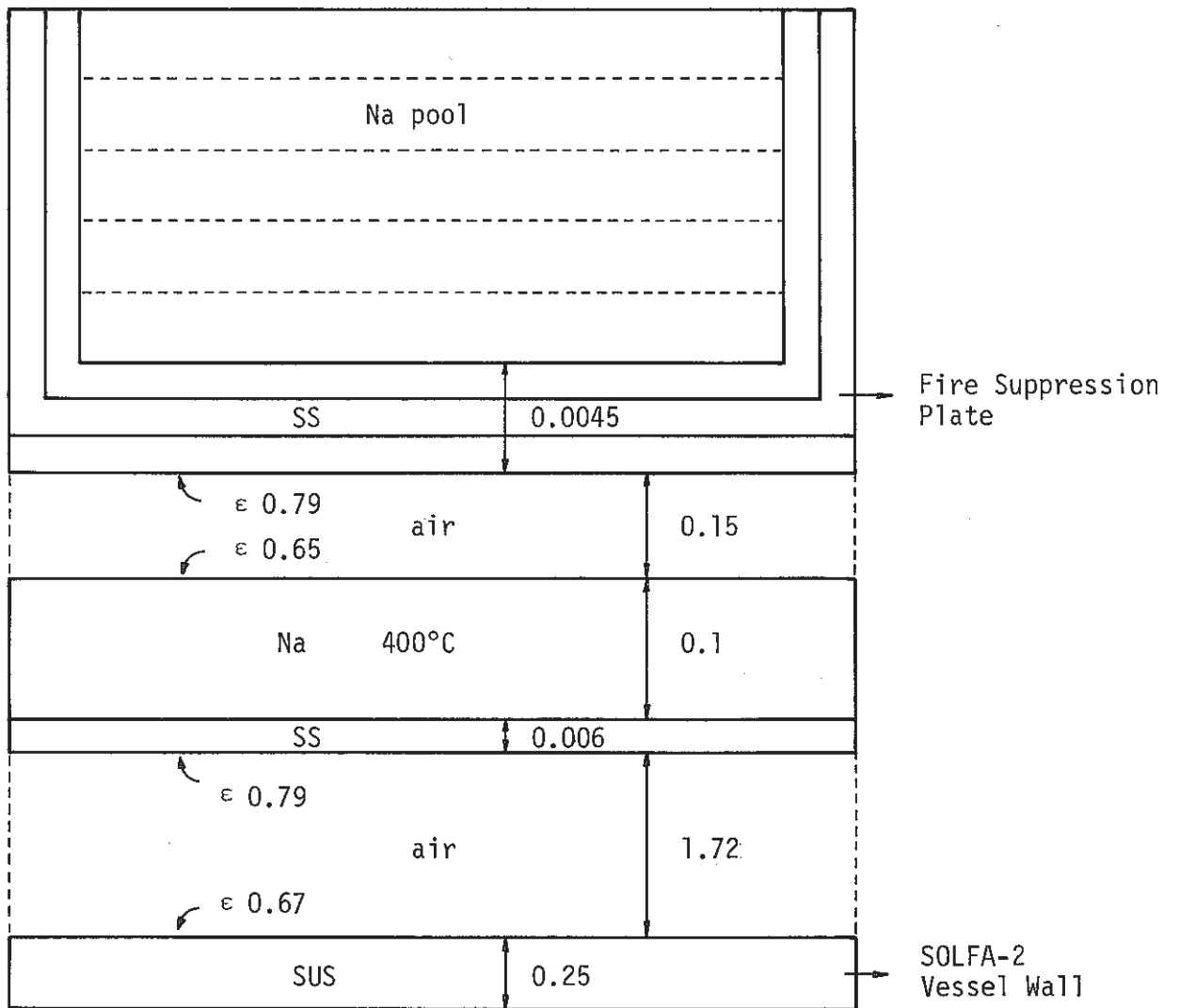
Fig. III. 1 Calculational Model of SOLFA-2

Keys

SS = carbon steel

SUS = stainless steel

ϵ = emmissivity



Unit : m

Fig. III. 2 Details of Structures below Fire Suppression Plate in SOLFA-2

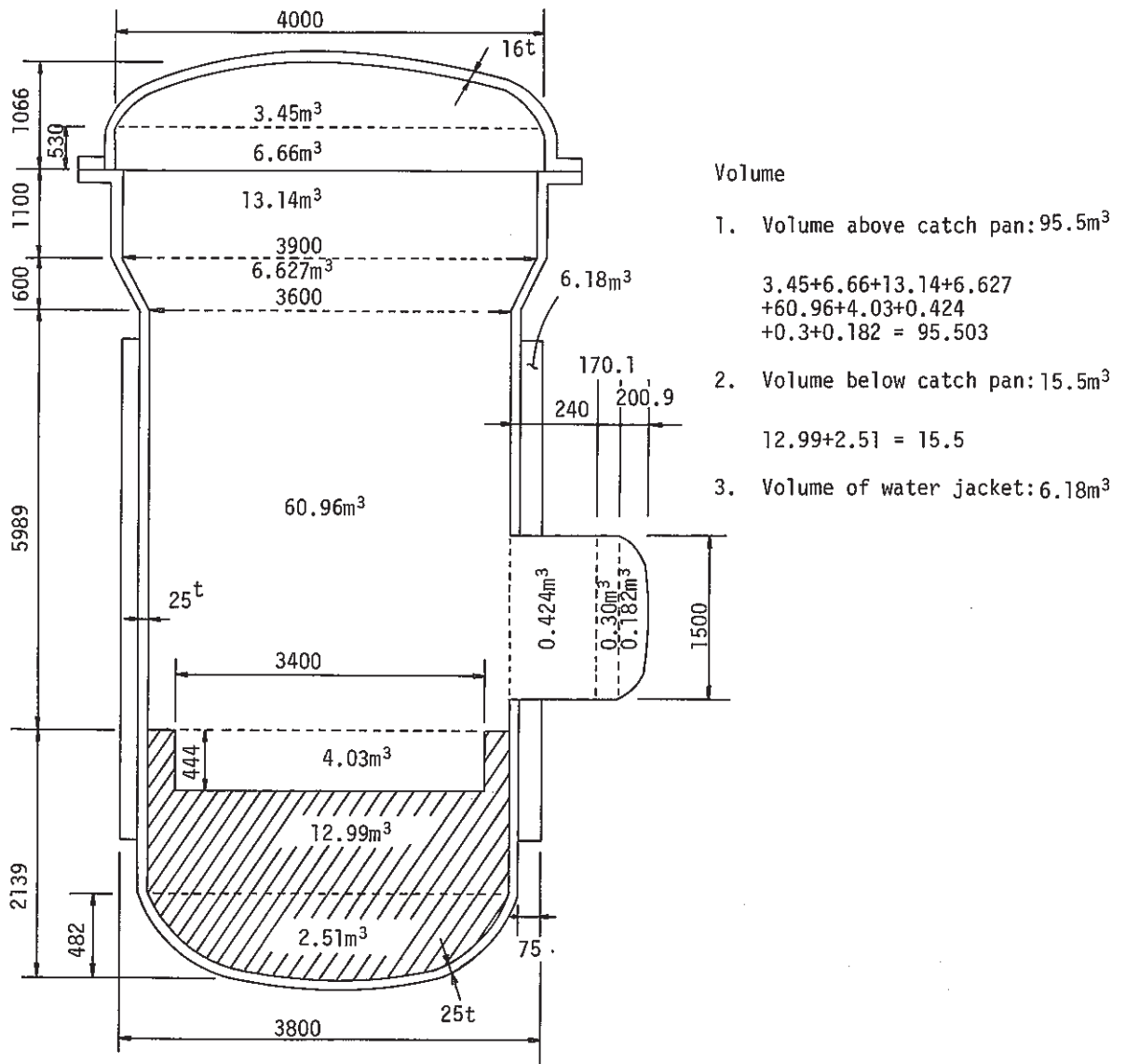


Fig. III. 3 Volume of Each Portion of SOLFA-2

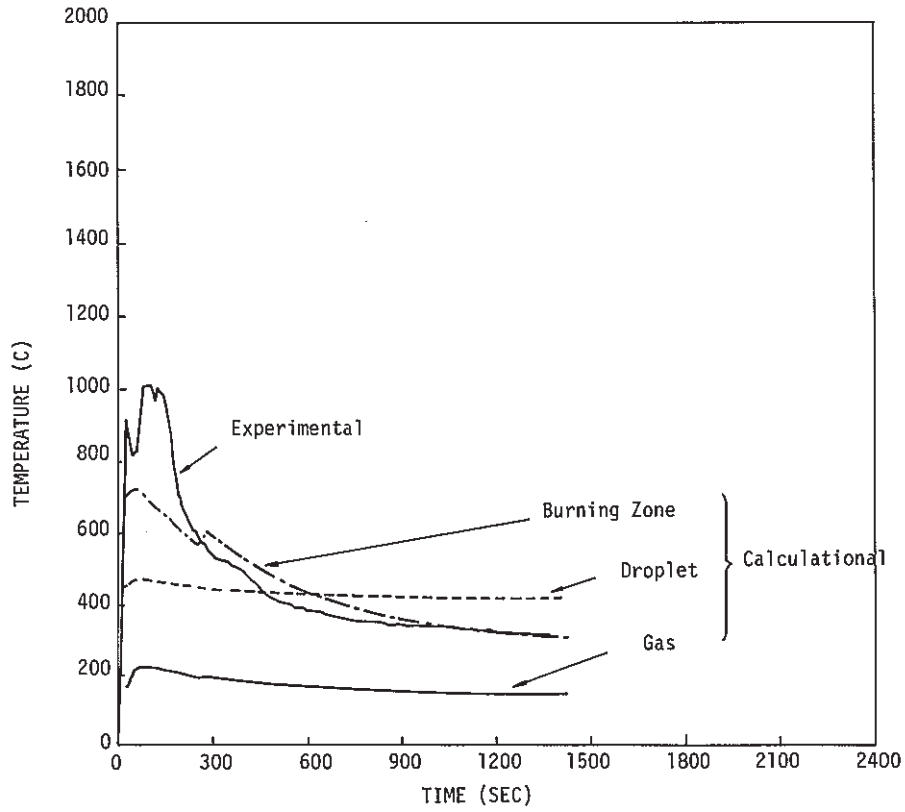


Fig. IV. 1 Temperature within a Spray Corn (the lowest mesh)

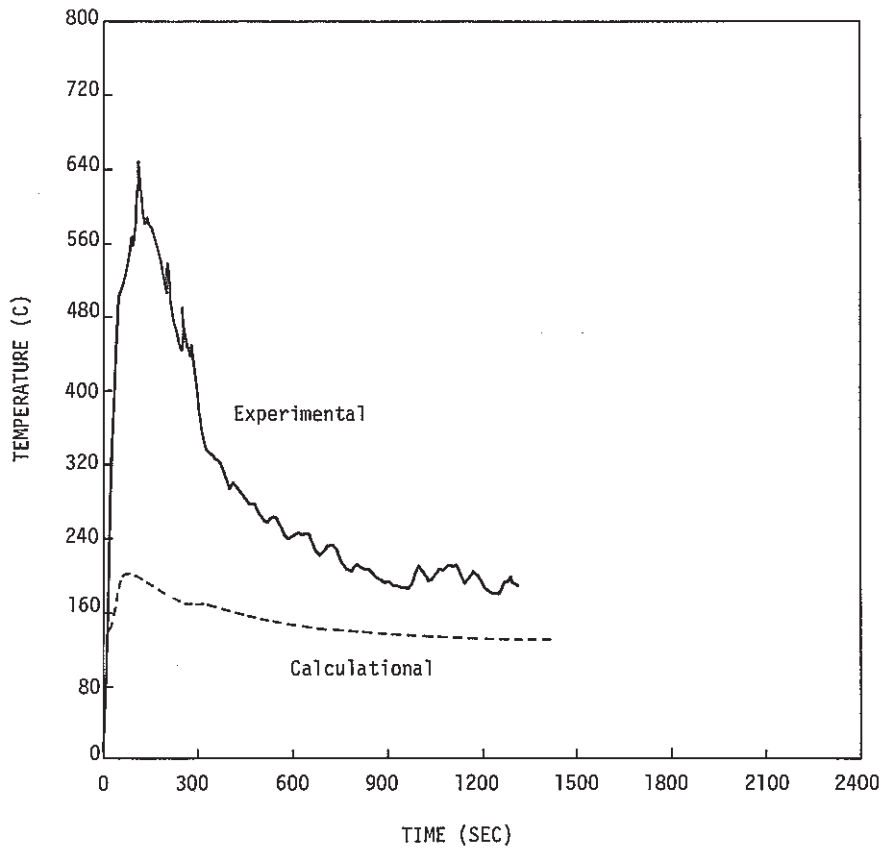


Fig. IV. 2 Temperature Outside a Spray Corn

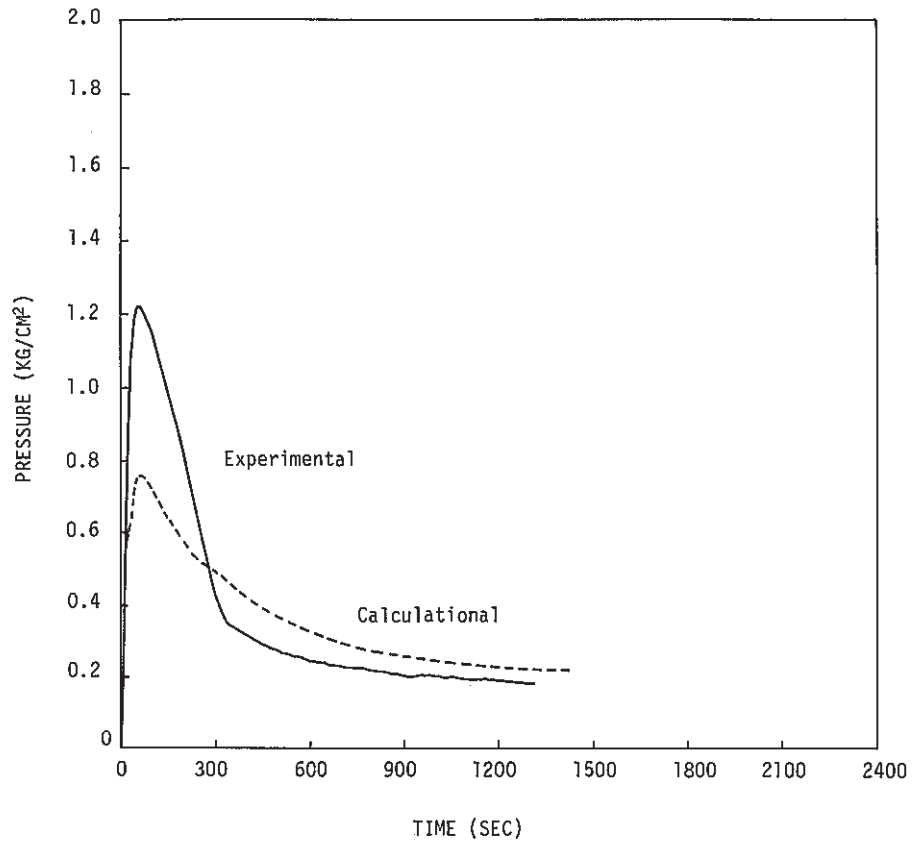


Fig. IV. 3 Gas Pressure

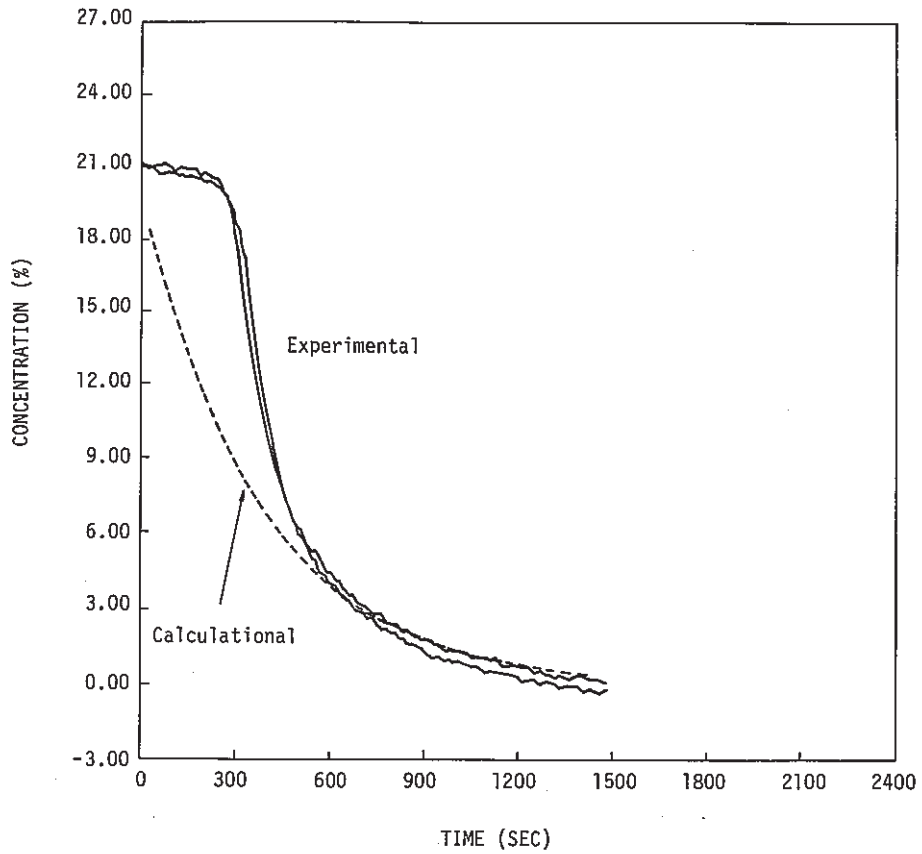


Fig. IV. 4 Oxygen Concentration

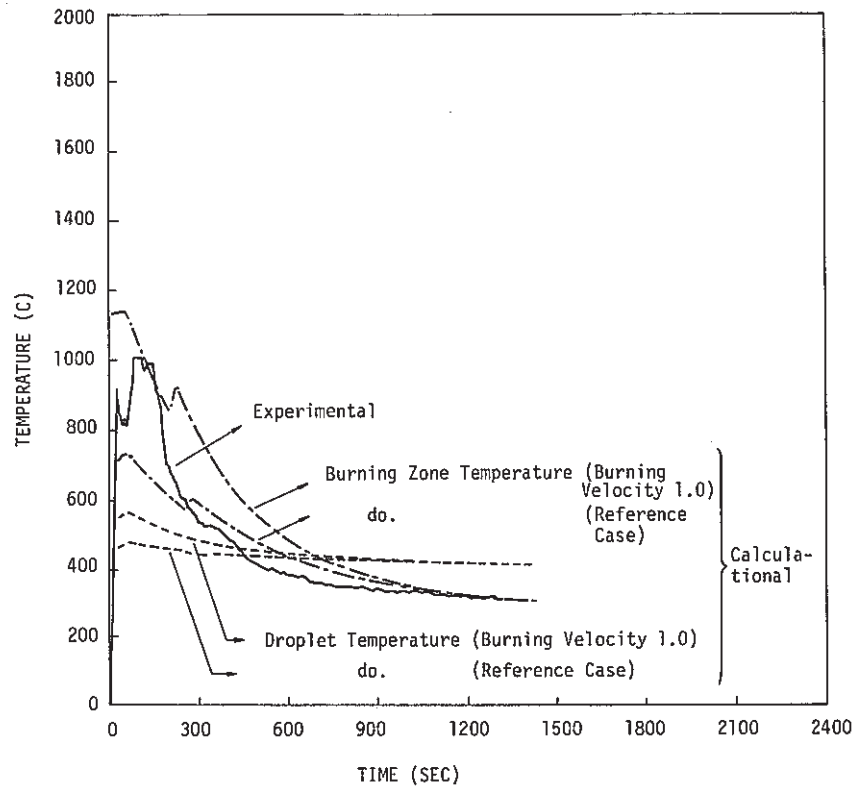


Fig. V. 1 Temperature within a Spray Corn (Effect of Burning Velocity Constant)

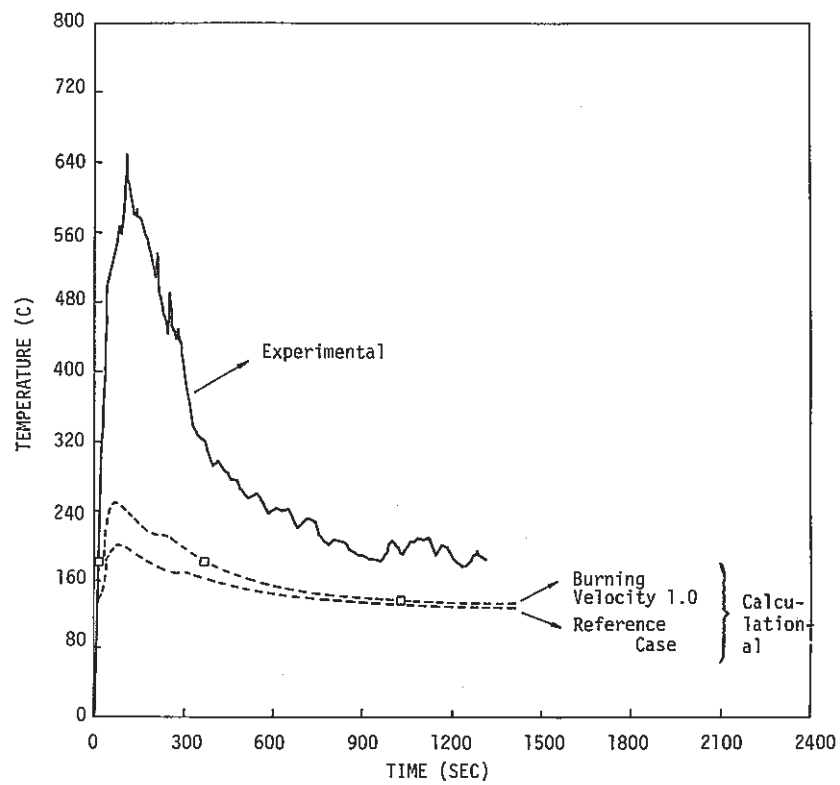


Fig. V. 2 Temperature Outside a Spray Corn (Effect of Burning Velocity Constant)

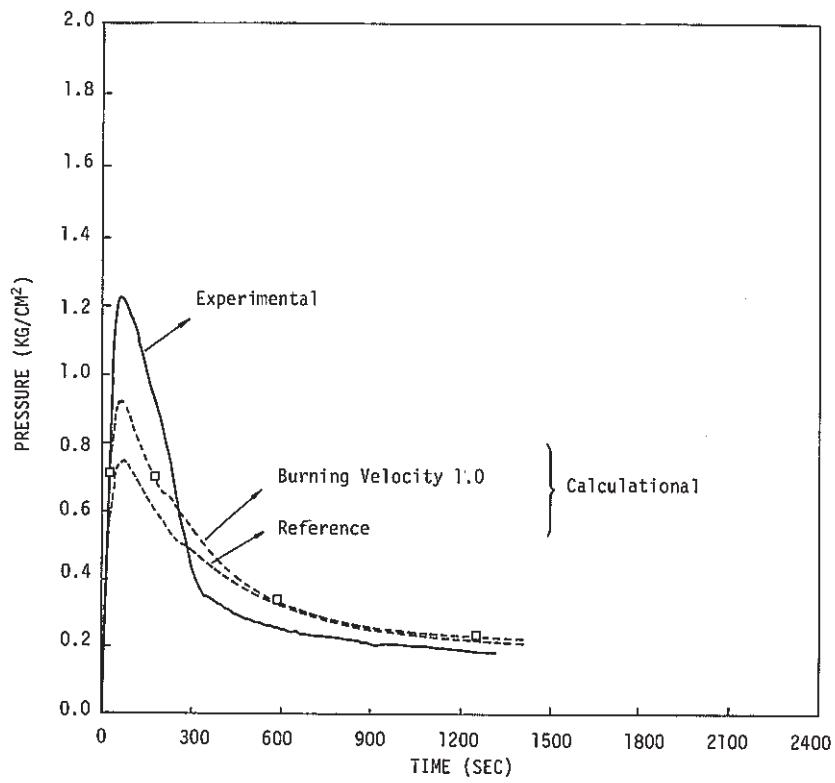


Fig. V. 3 Gas Pressure
(Effect of Burning Velocity Constant)

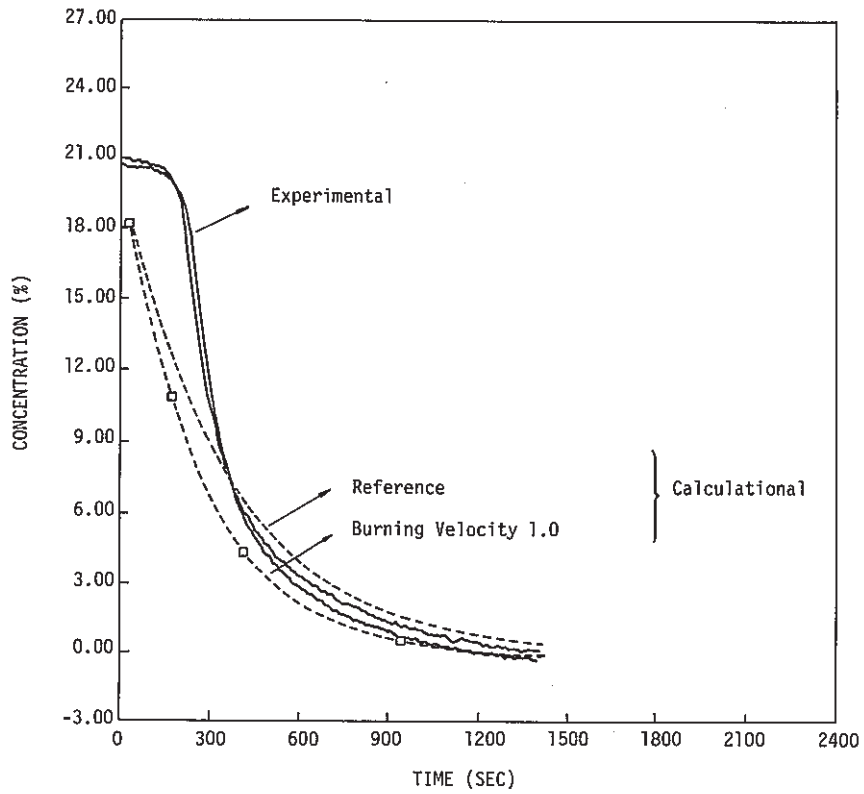


Fig. V. 4 Oxygen Concentration
(Effect of Burning Velocity Constant)

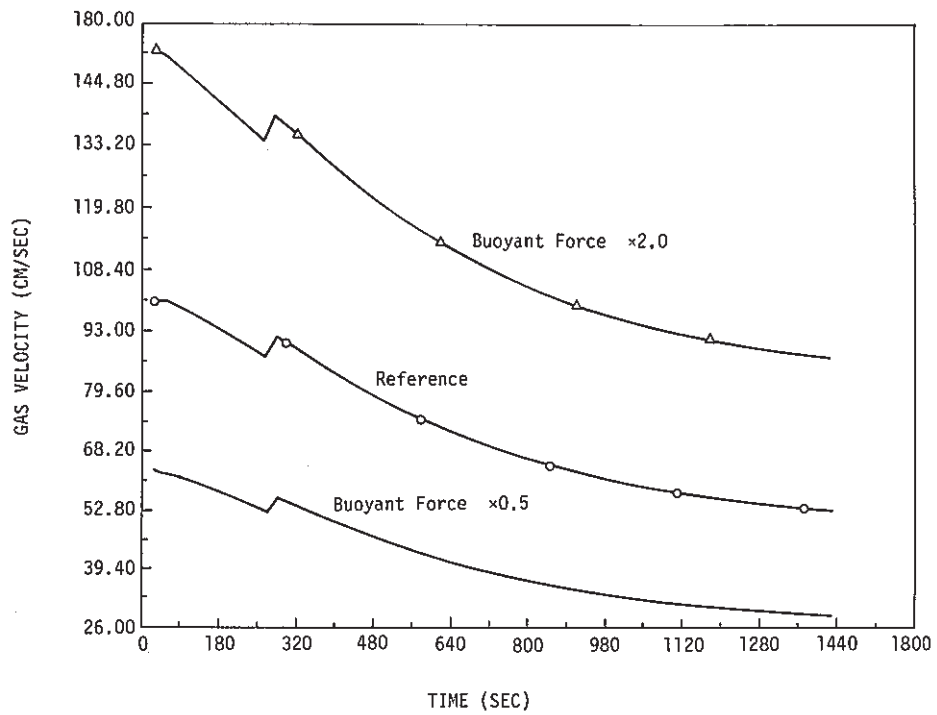


Fig. V. 5 Effect of Gas Buoyant Force (Gas Velocity), Calculational

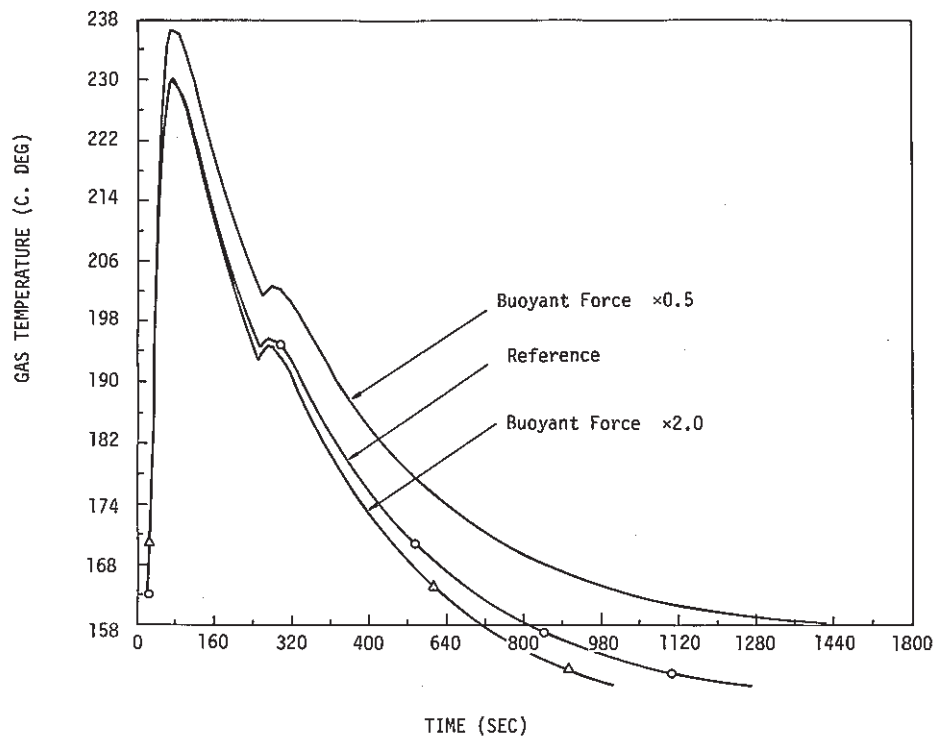


Fig. V. 6 Effect of Gas Buoyant Force (Gas Temperature within a Spray Corn), Calculational

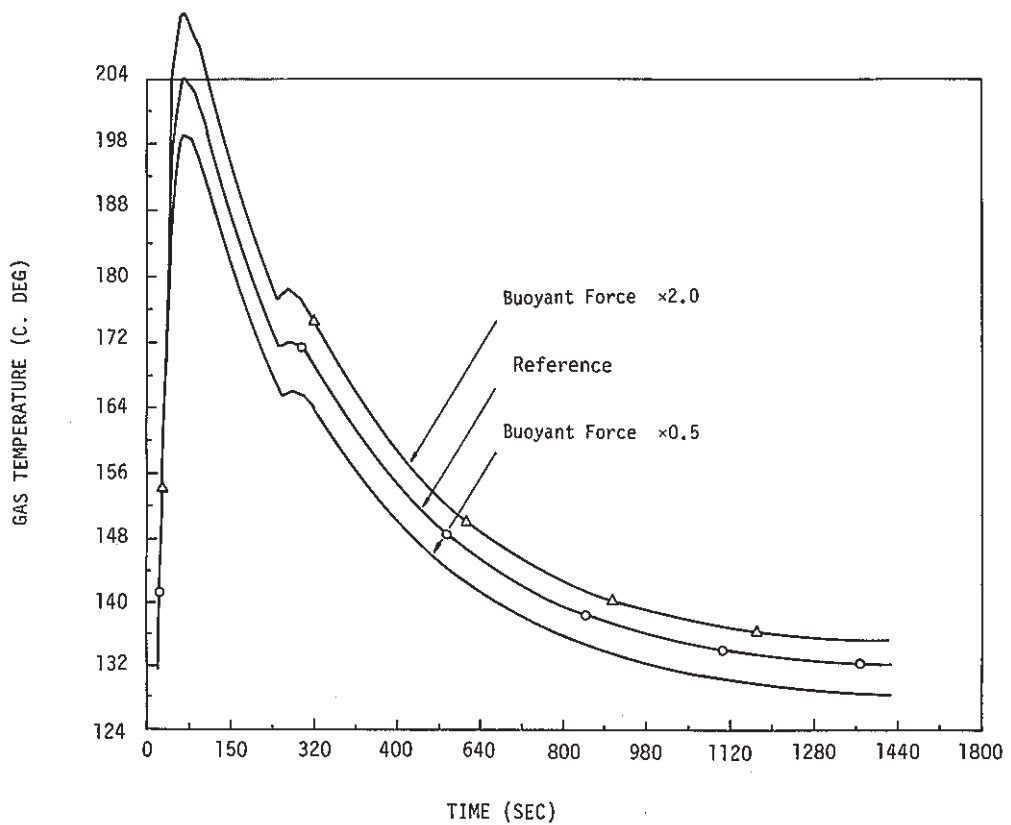


Fig. V. 7 Effect of Gas Buoyant Force (Gas Temperature Outside a Spray Corn), Calculational

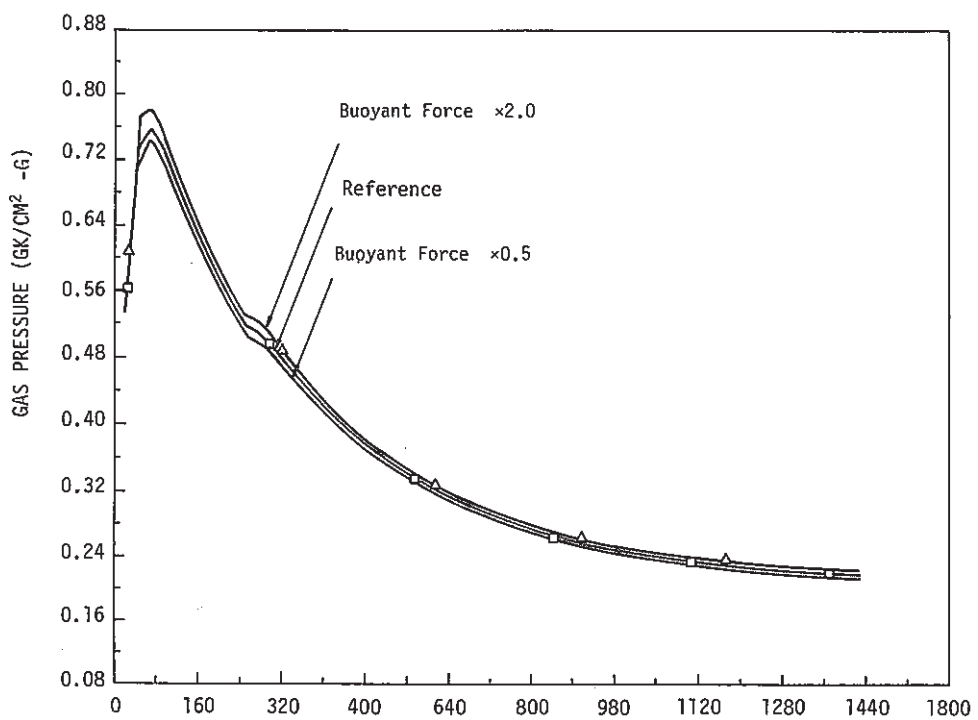


Fig. V. 8 Effect of Gas Buoyant Force (Gas Pressure), Calculational

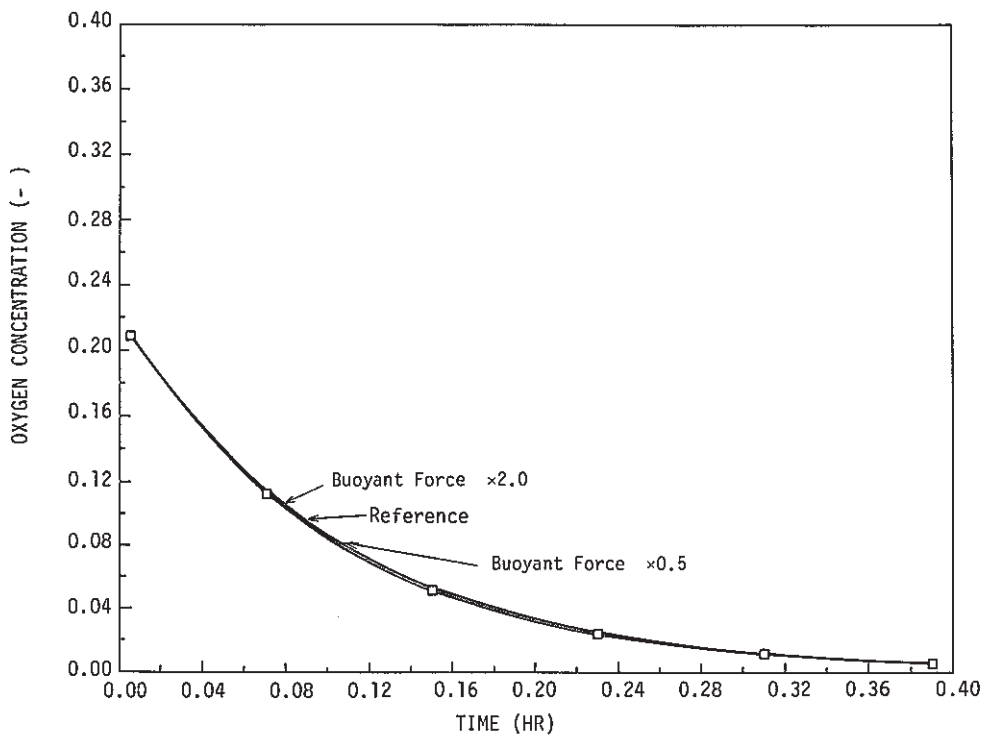


Fig. V. 9 Effect of Gas Buoyant Force (Oxygen Concentration), Calculational

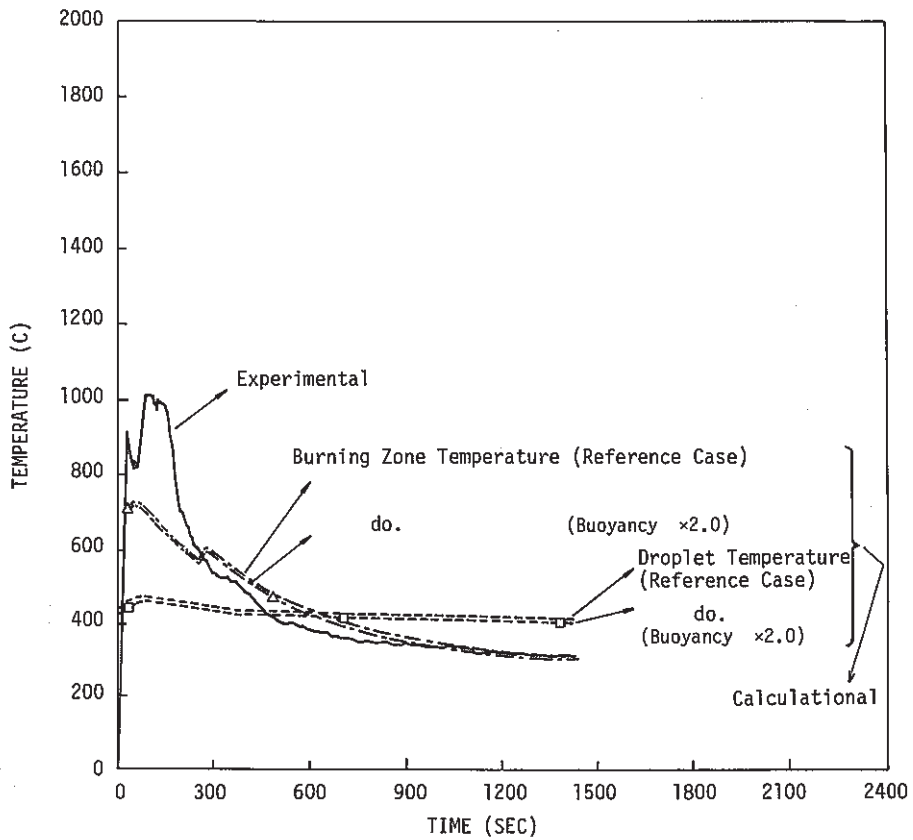


Fig. V. 10 Temperature within a Spray Corn (Effect of Gas Buoyancy)

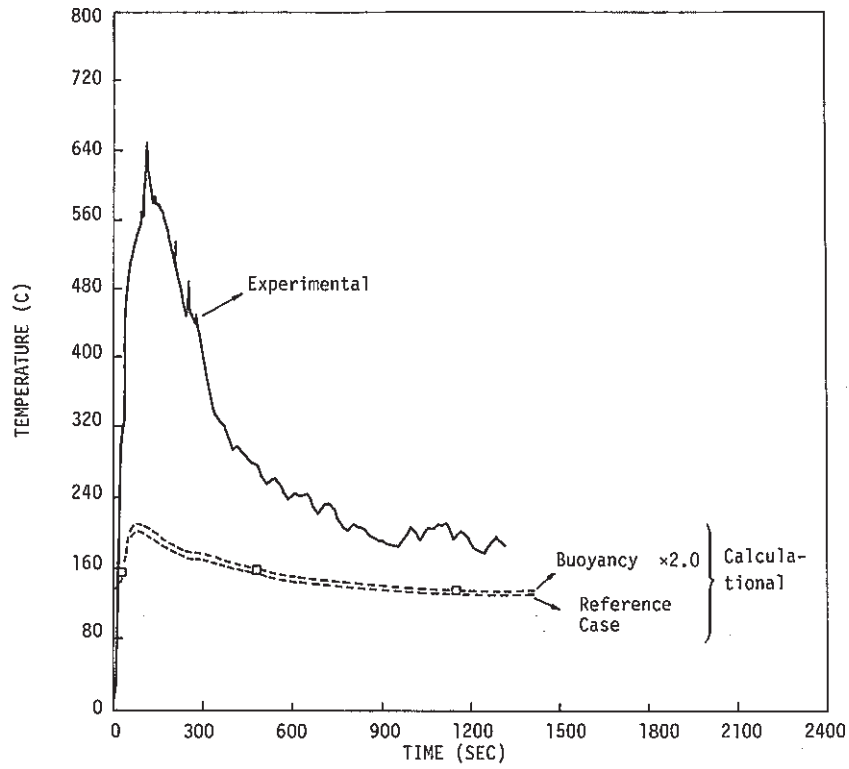


Fig. V. 11 Temperature Outside a Spray Corn (Effect of Gas Buoyancy)

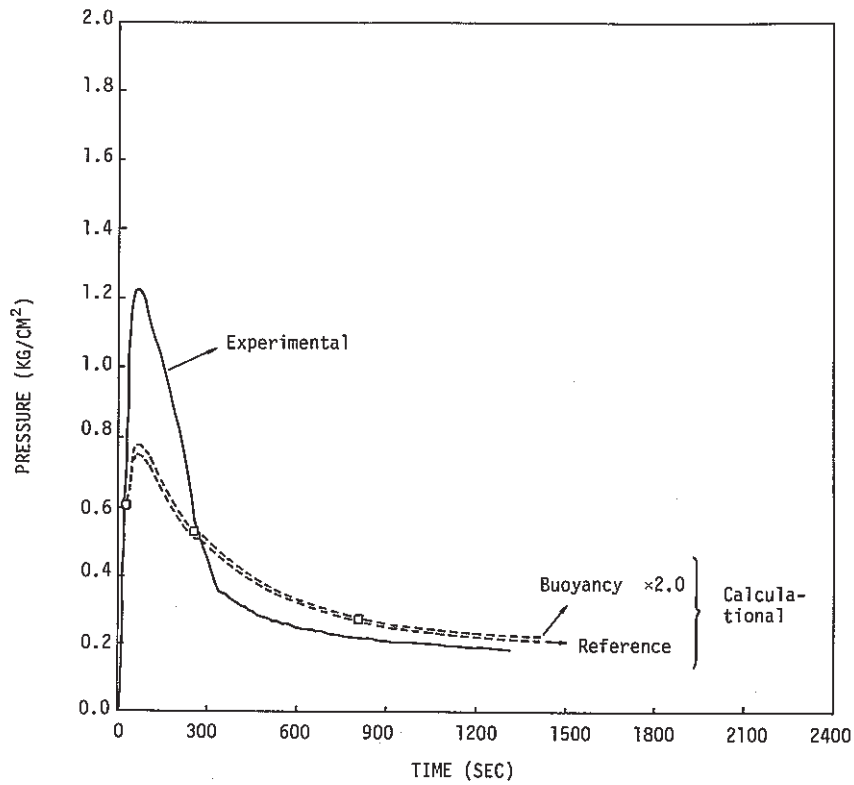


Fig. V. 12 Gas Pressure (Effect of Gas Buoyancy)

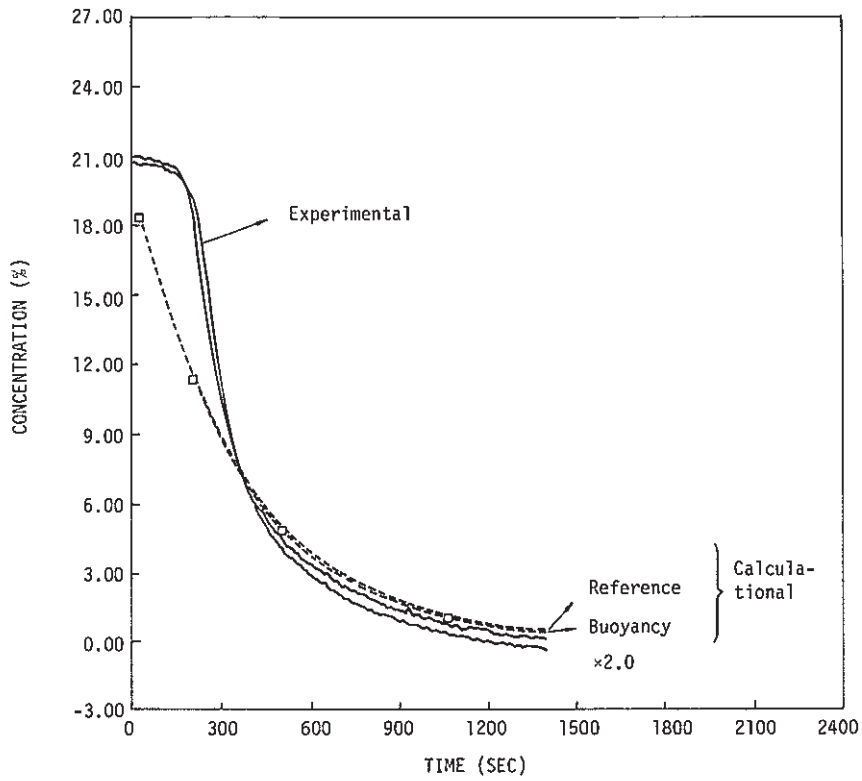


Fig. V. 13 Oxygen Concentration (Effect of Gas Buoyancy)

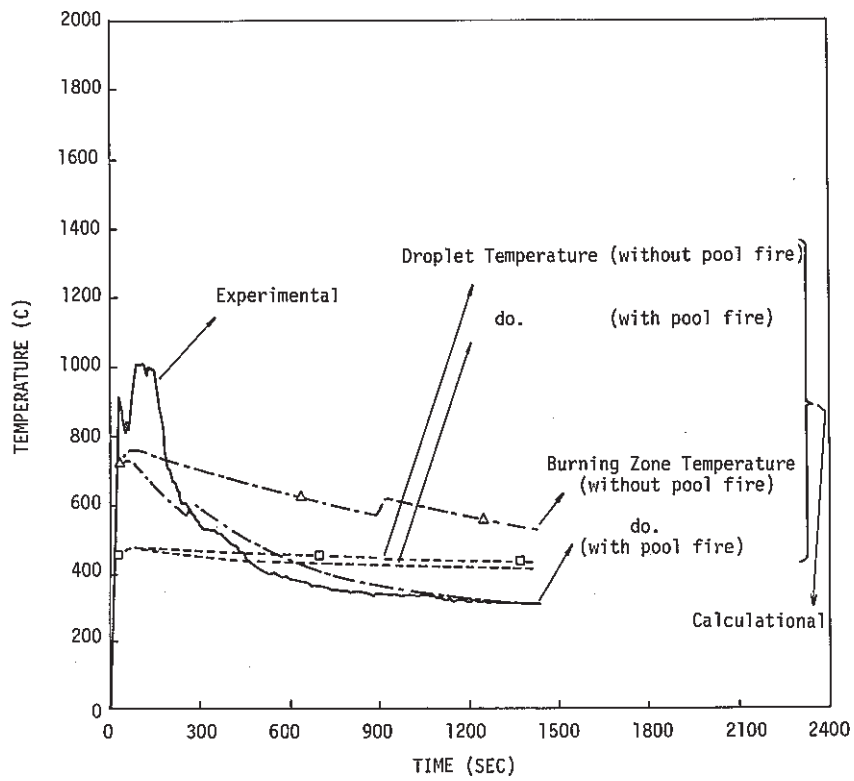


Fig. V. 14 Temperature within a Spray Corn (Effect of Pool Fire)

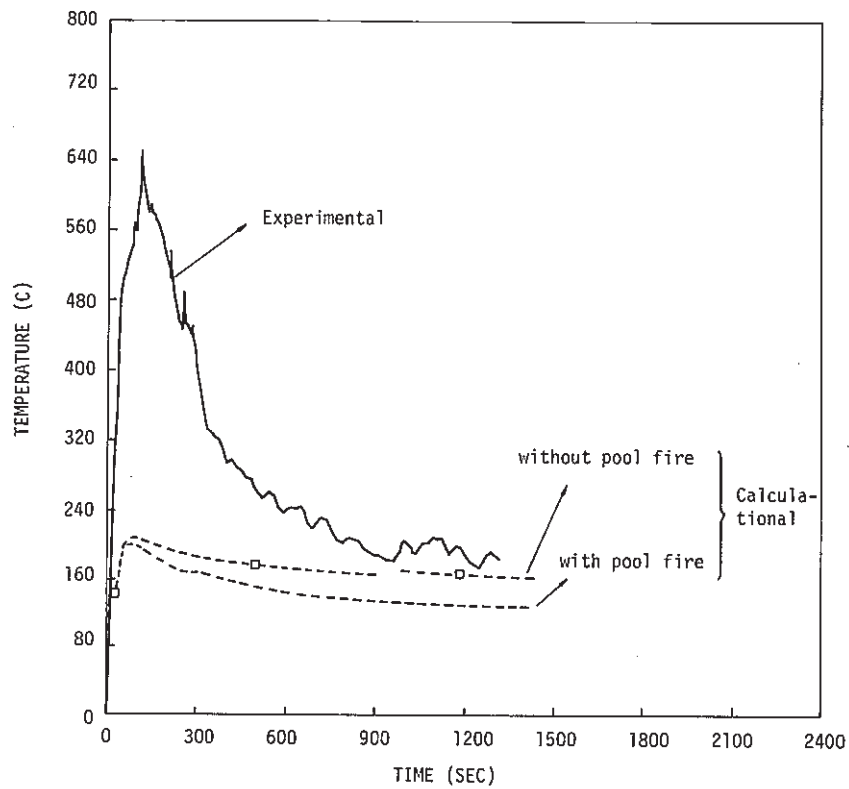


Fig. V. 15 Temperature outside a Spray Corn (Effect of Pool Fire)

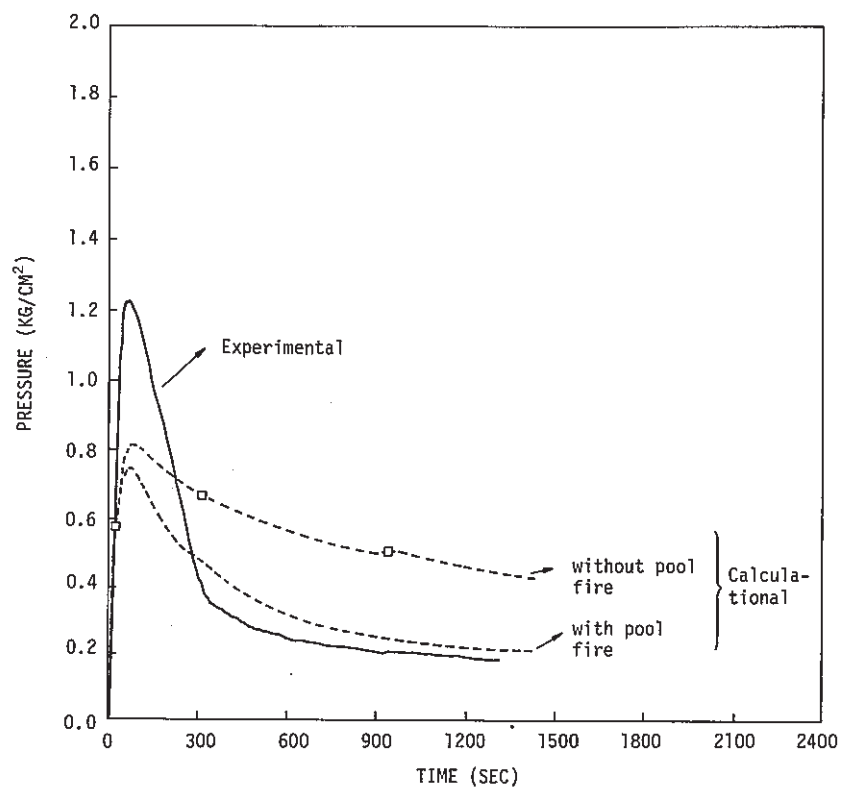


Fig. V. 16 Gas Pressure (Effect of Pool fire)

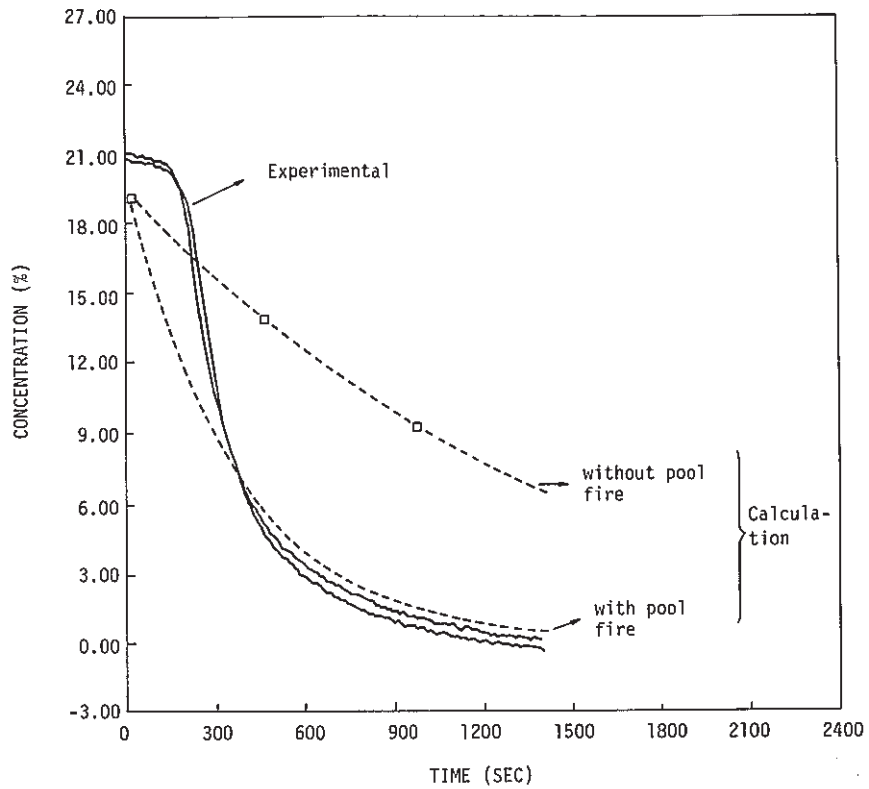


Fig. V. 17 Oxygen Concentration (Effect of Pool Fire)

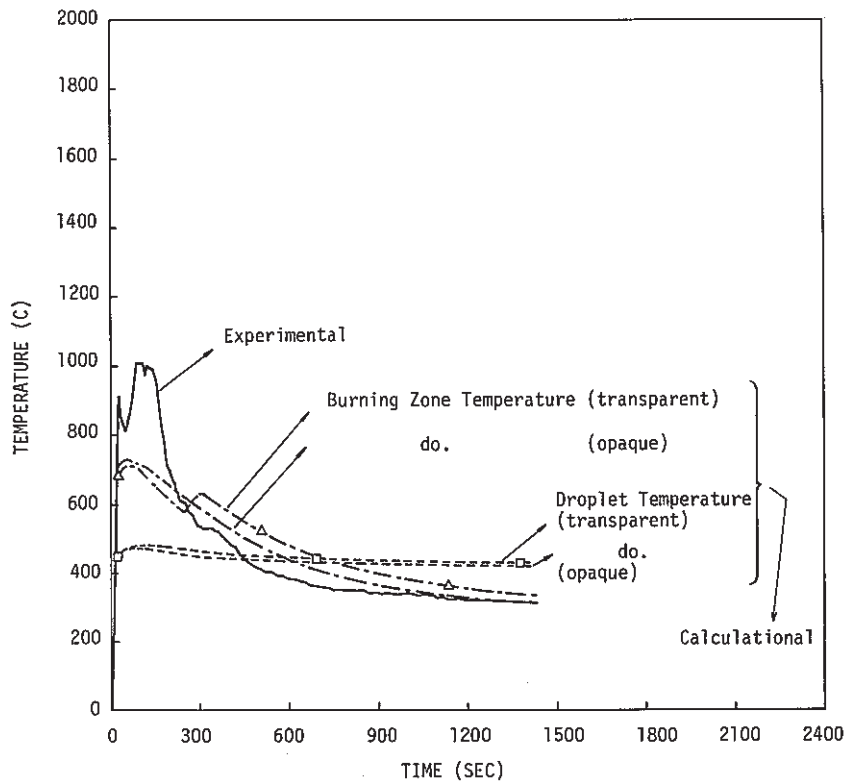


Fig. V. 18 Temperature within a Spray Corn (Effect of Gas Emissivity)

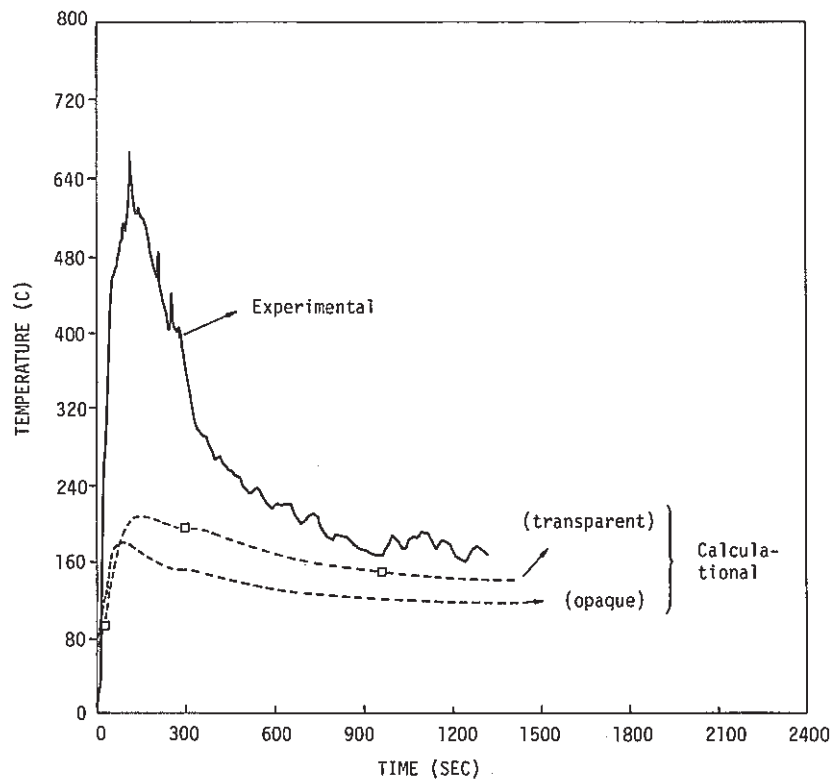


Fig. V. 19 Temperature outside a Spray Corn (Effect of Gas Emissivity)

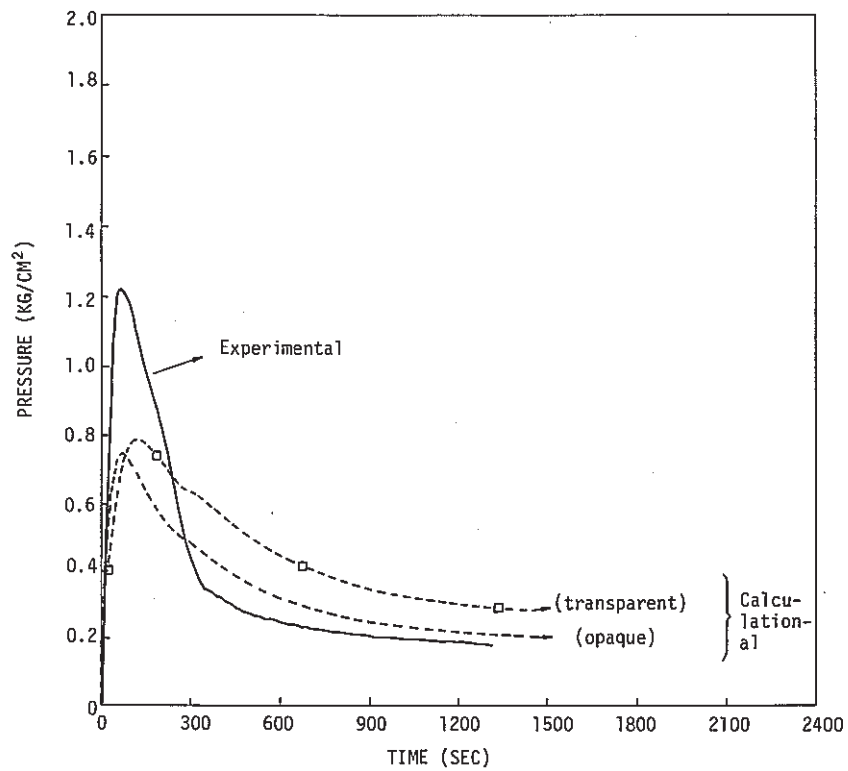


Fig. V. 20 Gas Pressure (Effect of Gas Emissivity)

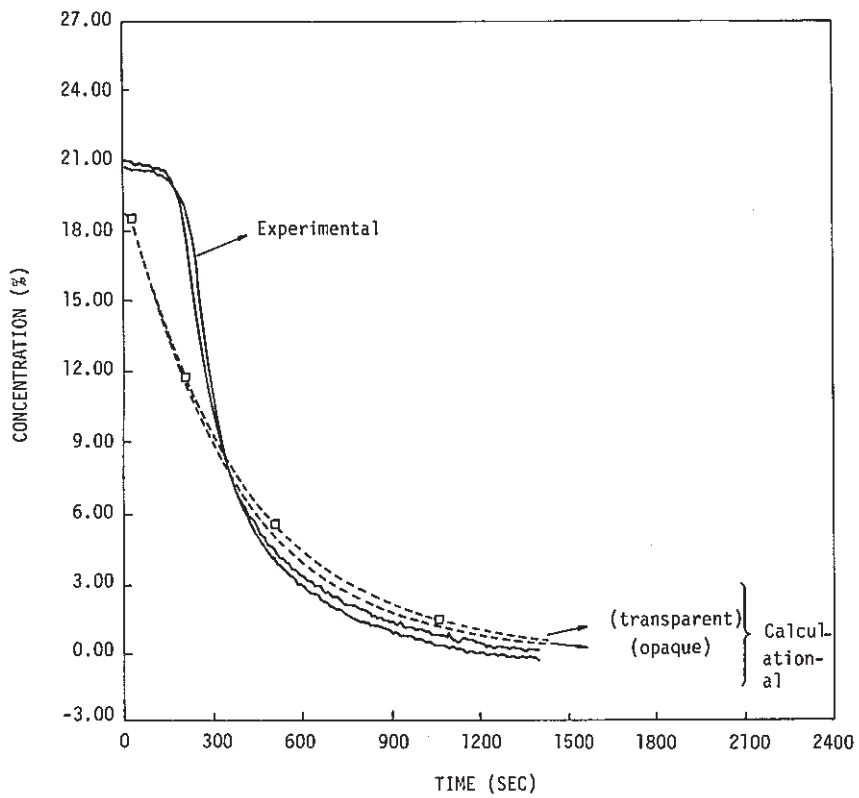


Fig. V. 21 Oxygen Concentration (Effect of Gas Emissivity)

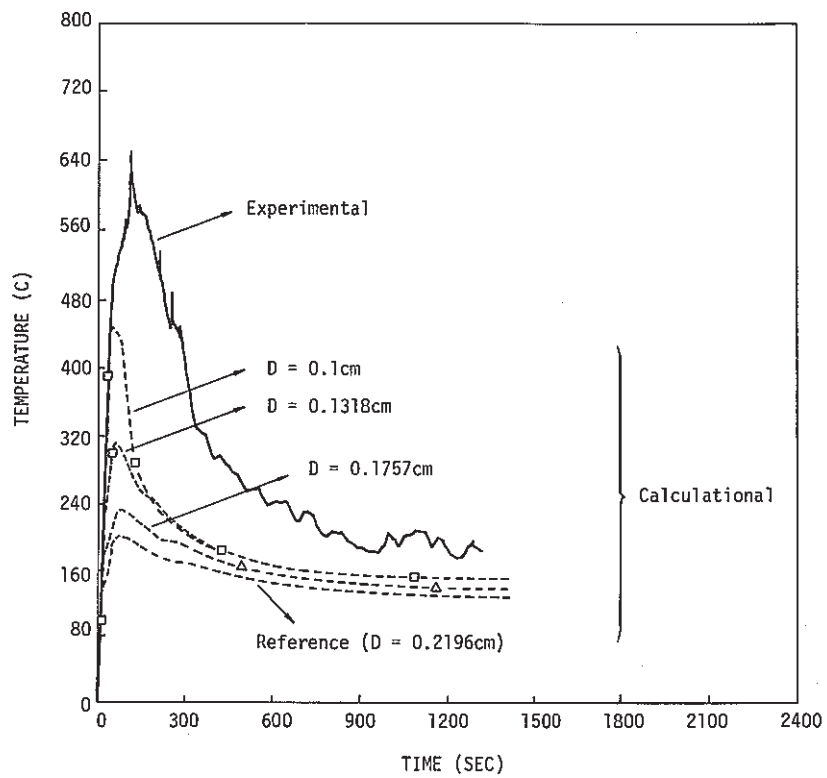


Fig. V. 22 Temperature within a Spray Corn (Effect of Droplet Size)

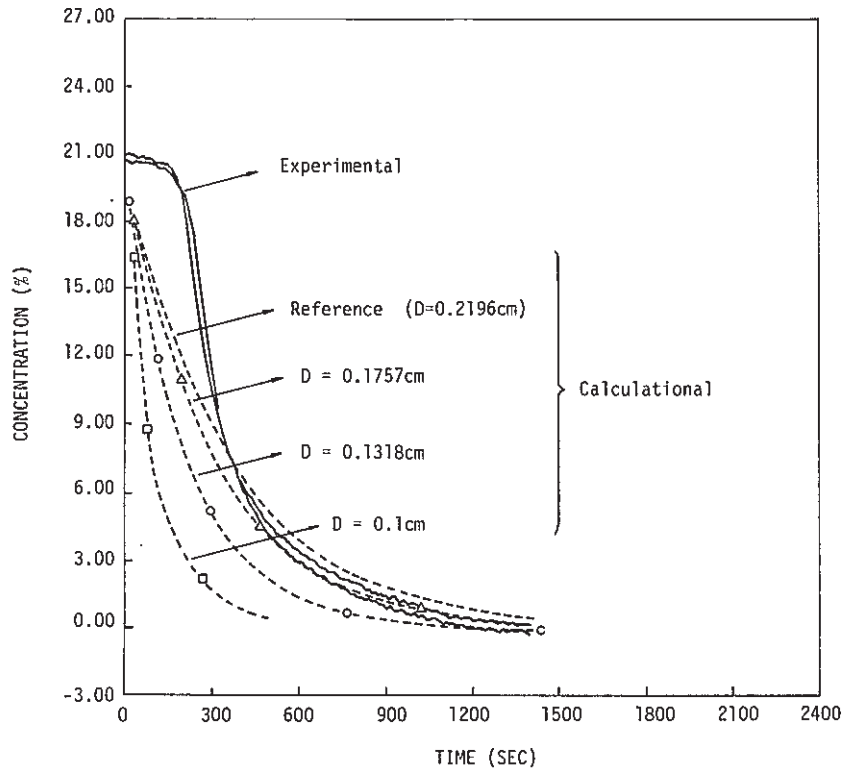


Fig. V. 23 Oxygen Concentration (Effect of Droplet Size)

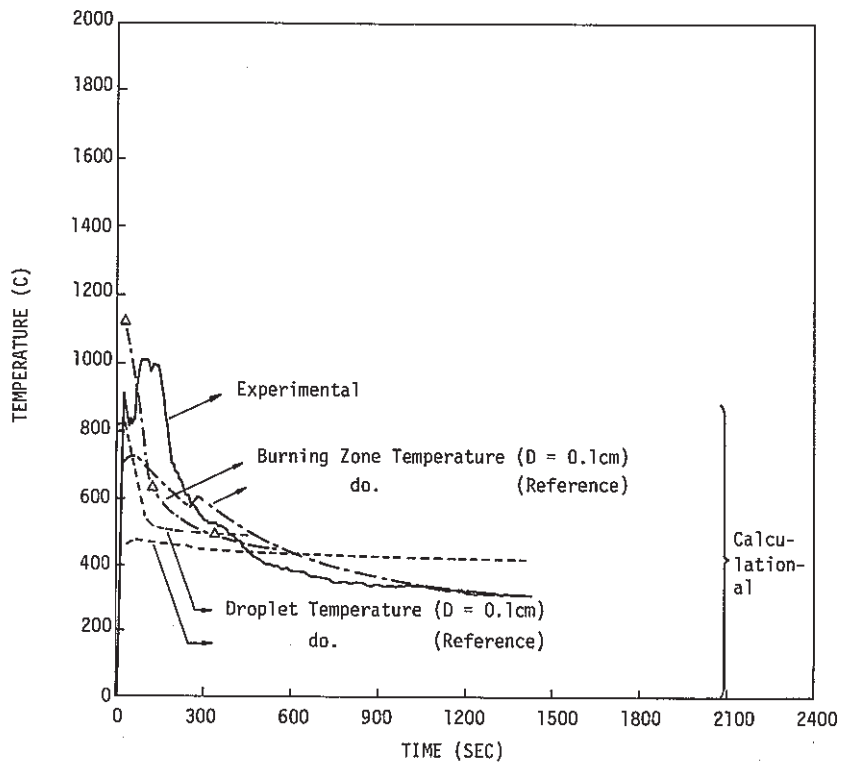


Fig. V. 24 Temperature within a Spray Corn (Effect of Droplet Size 0.1cm)

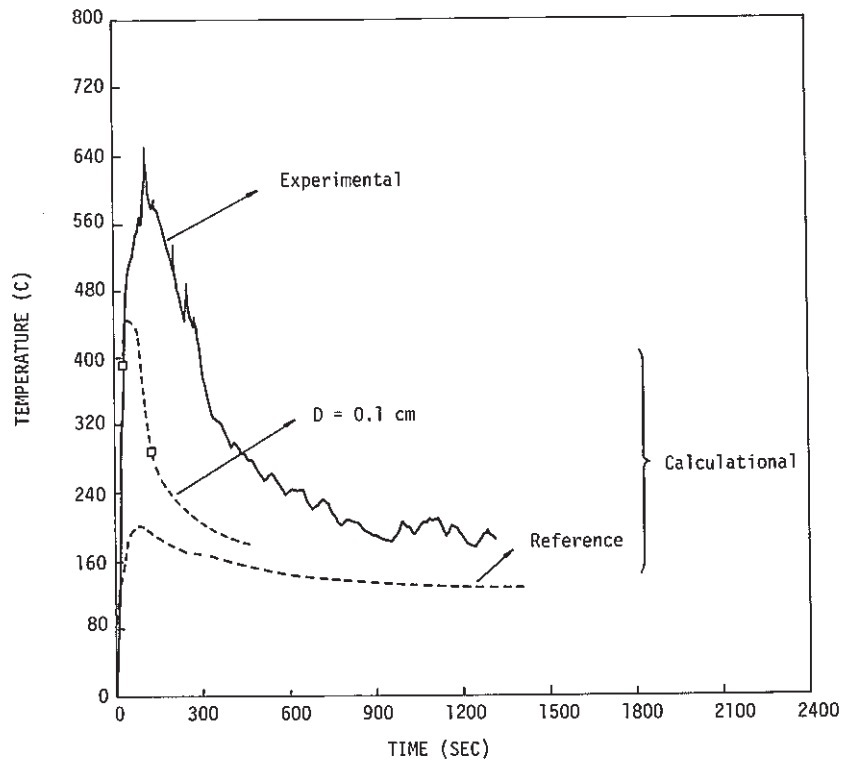


Fig. V. 25 Temperature outside a Spray Corn
(Effect of Droplet Size 0.1cm)

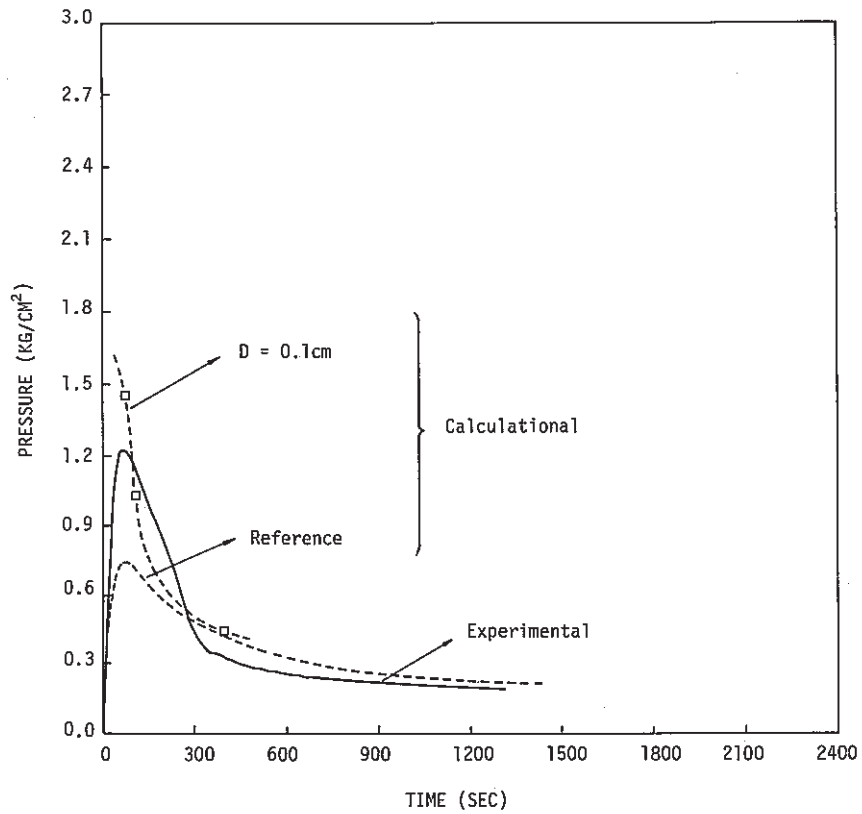


Fig. V. 26 Gas Pressure
(Effect of Droplet Size 0.1cm)

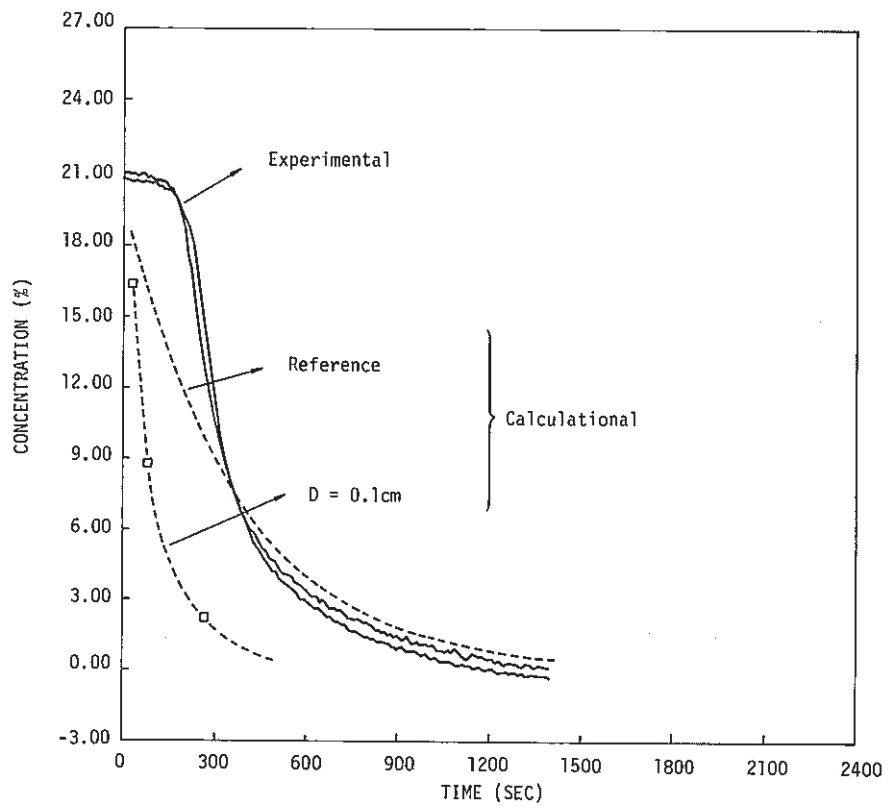


Fig. V. 27 Oxygen Concentration (Effect of Droplet Size 0.1cm)

A p p e n d i x

Appendix A 燃焼抑制槽下部空間の影響

Fig. III.3に示す通り、燃焼抑制槽下部空間は容積が15.5m³あり、しかも燃焼抑制板と容器とは若干のガス流通がある。

Fig. IV.2, Fig. IV.3のガス圧力最大値と、ガス温度最大値の計算値と実験値とは時間軸に対しては一致しているが、その値の間には以下の矛盾がある。

ガス圧力と温度との間には、理想気体として、

$$P_i V = (n_{N_2} + n^{i_{O_2}}) R T_i \quad (A-1)$$

$$P_f V = (n_{N_2} + n^{f_{O_2}}) R T_f \quad (A-2)$$

P : 圧力 (Pa) V : 容積 (m³)

n : モル数 (mol) T : 温度 (k)

R : 気体定数 8.3169 (J/k/mol)

添字 i → 初期状態

f → 最終状態

の関係がある。

最終状態として、上記のそれぞれの図で最高圧力となった時点 (約1.2分後) を考えると、

$$P_f = 2.24 \cdot 9.804 \times 10^4 \text{ (Pa)}$$

$$n^{f_{O_2}} = 15\% \rightarrow \text{酸素消費速度は、実験結果より } 21\%/4 \text{ 分とする。}$$

となる。

(A-1) 式より、

$$n_{N_2} + n^{i_{O_2}} = \frac{P_i V}{R T_i} \quad n_{N_2} : n^{i_{O_2}} = 0.79 : 0.21$$

$$\therefore n_{N_2} = \frac{P_i V}{R T_i} \cdot 0.79 \quad n^{i_{O_2}} = \frac{P_i V}{R T_i} \cdot 0.21 \quad \text{従って } n^{f_{O_2}} = \frac{P_i V}{R T_i} \cdot 0.15$$

(A-2) 式より、

$$T_f = \frac{P_f V}{\frac{P_i V}{R T_i} \cdot 0.94 \cdot R} = \frac{P_f}{P_i} \cdot \frac{1}{0.94} T_i = 2.24/0.94 \cdot 300 \\ = 715 \text{ (k)} : \underline{442^\circ\text{C}}$$

しかし、実験結果をみると、ガス最高温度は600℃を越えている。

これは、抑制槽下部空間へ圧力が解放されたためである。すなわち、(A-1) 式、(A-2) 式の代わりに

$$P_i (V_1 + V_2) = (n_{N_2} + n^{i_{O_2}}) R T_i \quad (A-3)$$

$$P_f V_1 = (n^{f_{N_2, 1}} + n^{f_{O_2, 1}}) R T_f \quad (A-4)$$

$$P_f V_2 = (n^{f_{N_2, 2}} + n^{f_{O_2, 2}}) R T_f \quad (A-5)$$

$$n^{f_{N_2, 1}} + n^{f_{N_2, 2}} = n_{N_2}, \quad n^{f_{O_2, 1}} + n^{f_{O_2, 2}} = n_{O_2}^f \quad (A-6)$$

(A-4) 式, (A-5) 式より

$$\begin{aligned}
 n_{N_2, 1}^f + n_{O_2, 1}^f + n_{N_2, 2}^f + n_{O_2, 2}^f &= \frac{P_f}{R} \left(\frac{V_1}{T_{1f}} + \frac{V_2}{T_{2f}} \right) = n_{N_2} + n_{O_2}^f \\
 &= \frac{P_i (V_1 + V_2)}{R T_i} \cdot 0.94 \\
 \therefore \frac{V_1}{T_{1f}} + \frac{V_2}{T_{2f}} &= \frac{P_i}{P_f} \frac{(V_1 + V_2)}{T_i} \cdot 0.94 \quad (A-7)
 \end{aligned}$$

ここで, $V_1 = 0.95\text{m}^3$ $V_2 = 15.5\text{m}^3$ $T_{2f} = 70^\circ\text{C}$ (TE 2090, 2091, 2092)

であるから

$$\begin{aligned}
 T_{1f} &= \left(\frac{1}{2.24} \frac{110}{300} \cdot 0.94 - \frac{15.5}{343.15} \right)^{-1} \cdot 95.5 \\
 &= 879\text{k} = 605^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

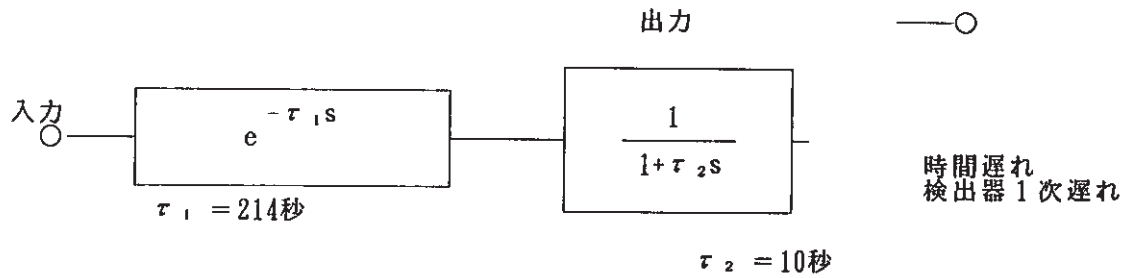
となり, 実験結果とよく合う。

以上の検討により, 試験中の容器内ガス圧力を評価する時は, 燃焼抑制槽下部の15.5m³空間の体積を考慮に入れなければならないことが明らかになった。

Appendix B 酸素濃度計の応答遅れ

Fig. B-1に酸素計サンプリング系統図を示す。

この酸素計の検出遅れを，下図のように（むだ時間）+（1次遅れ）でモデル化する。



出力を $y(t)$ ，入力を $x(t)$ とすると，

$$\tau_2 \frac{d y(t)}{d t} + y(t) = x(t - \tau_1) \quad (B-1)$$

となる。

よって，出力 y から，入力 x を求めるには，

$$x(t) = \tau_2 \frac{d y(t + \tau_1)}{d t} + y(t + \tau_1) \quad (B-2)$$

より，計算すればよい。

試験時のデータを用いて，上式に従って数値微分して， x を求めたグラフをFig. B-2に示す。

図には，(B-2)式の右辺の第1項と第2項の補正值も記入した。全補正後のデータは，もちろん第1項と第2項との和であるが，図から第2項，すなわち，サンプリング配管部での時間遅れが支配的であることがわかる。

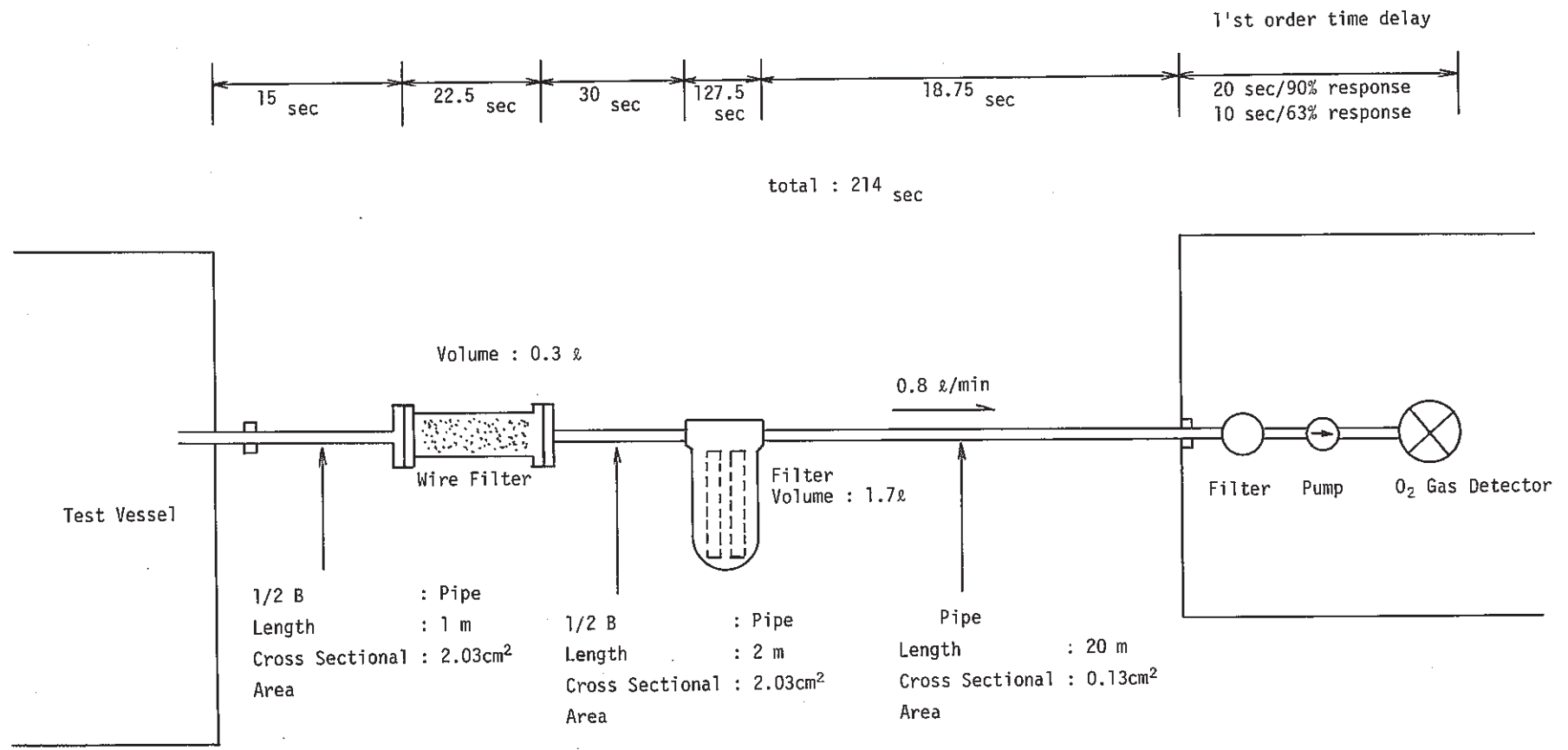


Fig. B. 1 Sampling System of Oxygen Meter

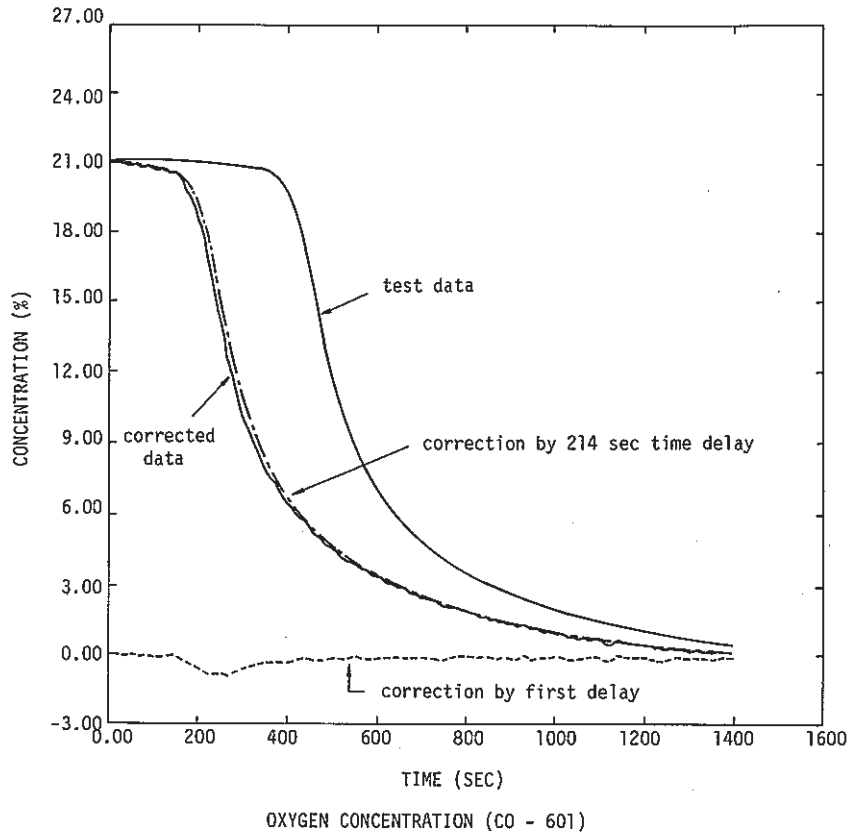
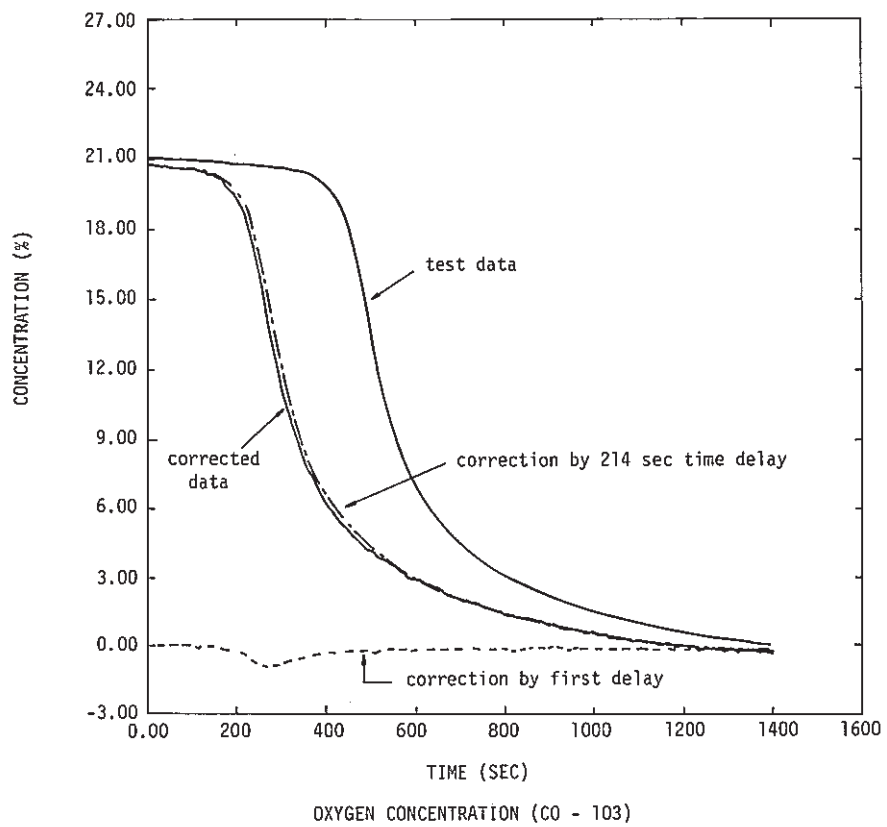


Fig. B. 2 Correction of Oxygen Concentration Test Data

Appendix C 燃焼速度相関式の適用範囲のチェック

ASSCOPSコードでは、Na液滴からの蒸発速度は、空気に関する次式のRanz-Marshallの相関式⁹⁾を使用している。

$$Nu = 2 + 0.6 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (0.6 < Pr < 380, 1 < Re < 10^5)$$

空気のプラントル数 Pr は、0.7であるため、この式をNaスプレー燃焼に適用するに当たっては Pr については適用範囲内の問題はない。レイノルズ数 $Re (= uD/\nu)$ については、ASSCOPSコードの解析結果から Re 数が最も大きくなる値を求めると、

Na液滴の落下速度： u_{Na}

$$u_{Na} = 10 \text{ (m/s)}$$

スプレーコーン内の平均ガス流速： u_{gas}

$$u_{gas} = 1 \text{ (m/s) (上向き)}$$

よって、相対速度 u は、

$$u = u_{Na} + u_{gas} = 11 \text{ (m/s)}$$

スプレー液滴径 D は 1.643×10^{-3} (m) , 空気の動粘性係数 ν は 2.96×10^{-7} (m²/s)であるため、 Re は、

$$Re = \frac{uD}{\nu} \approx 6 \times 10^4$$

となり、上式の適用範囲内にある。

結論として、今回の実験条件の範囲では、上式の相関式を適用することに問題はない。

Appendix D 遠心型加圧フルコーンノズルの液滴径実験式について

遠心型加圧フルコーンノズルの液滴径に関する実験データについて文献調査をしたところ、異種流体間でのスプレー液滴径の実験式として、以下の3つがあった。

$$\frac{D_{Na}}{D_{H2O}} = \left(\frac{Q_{Na}}{Q_{H2O}} \right)^{-0.044} \left(\frac{\sigma_{Na}}{\sigma_{H2O}} \right)^{0.7} \left(\frac{\mu_{Na}}{\mu_{H2O}} \right) \left(\frac{\delta_{Na}}{\delta_{H2O}} \right)^{-0.44} \quad (D-1) \quad 9)$$

$$= \left(\frac{Q_{Na}}{Q_{H2O}} \right)^{-1.0} \left(\frac{\sigma_{Na}}{\sigma_{H2O}} \right)^{0.62} \left(\frac{\mu_{Na}}{\mu_{H2O}} \right)^{0.26} \quad (D-2) \quad 10)$$

$$= \left(\frac{\sigma_{Na}}{\sigma_{H2O}} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_{Na}}{\mu_{H2O}} \right)^{0.2} \left(\frac{\delta_{Na}}{\delta_{H2O}} \right)^{-0.3} \quad (D-3) \quad 11)$$

ここで、
 D : スプレー液滴平均径
 Q : スプレー体積流量
 σ : 表面張力
 μ : 粘性係数
 δ : 密度

水、Na の物性値はそれぞれ、

	水 (20℃)	Na (530℃)
σ (kgw/m)	0.00739	0.0157
μ (kgsec/m ²)	1.022×10^{-4}	2.31×10^{-5}
δ (kg/m ³)	998.2	825.0

であるから、水とNa とのスプレー平均液滴径の比は、

$$\frac{D_{Na}}{D_{H2O}} = 1.395 \quad (D-1)$$

$$0.989 \quad (D-2)$$

$$1.146 \quad (D-3)$$

となり、実験相関式であることを考えると、水試験で得られた液滴径をNa にそのまま適用しても充分良い近似であると考えられる。