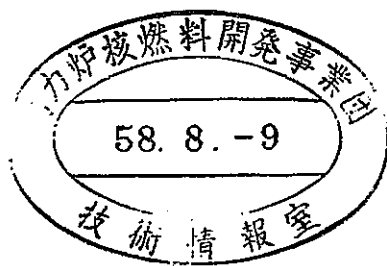


本資料は2003年 3月 18日付けで
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

ナトリウム・スプレー燃焼の解析



1983年4月

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



開示制限

PNC T N241 83-09
昭和58年4月

ナトリウム・スプレー燃焼の解析

宮原信哉*

三塚哲正**

57.6 ~ 57.12

要 旨

ナトリウムのスプレー状漏洩に伴い、室内の温度及び圧力変化の解析コード“SPRAY-III”の検証を目的として、21 m³の容器を用い、ナトリウム・スプレー燃焼試験を計画した。試験容器は、法規上の耐圧制限(1.9 Kg/cm²)を受けるので、最高圧力の目安を得ることが必要であり、又、試験条件を選定することを目的として、予備計算を実施した。その結果、以下のことがわかった。

1) スプレーゾーンの液滴個数濃度を一定にした場合は、スプレー拡がり角が大きく、ナトリウム漏洩率が高い程、セル内の温度・圧力の上昇率が大きくなり、そのピーク値も高い。又、セル内温度・圧力はスプレー終了時にピーク値となり、その後は急激に低下する。酸素と水蒸気の濃度は、ナトリウムが燃焼するにつれて減少し、スプレー終了後は一定値になる。

水素は、スプレー開始と共に除々に発生するが、雰囲気中に酸素が存在している間は再結合が考慮されているため水素濃度はきわめて低い所でほぼ一定となる。その発生率は、スプレー拡がり角が大きく、ナトリウム漏洩率が高い程、高くなる。

2) 初期酸素濃度が3 v/oと21 v/oの場合を比較すると、セル内温度・圧力ともに、後者は前者の約2倍のピーク値を示した。又、初期酸素濃度が高い場合の方が水蒸気の減少は少なく、水素の発生量も少ない。

3) ナトリウム漏洩率、又はスプレー拡がり角が大きい方が、セル内温度・圧力ともに高いピーク値を示すが、スプレー拡がり角が一定でナトリウム漏洩率が異なる場合と、ナトリウム漏洩率が一定でスプレー拡がり角が異なる場合を比較すると、その影響は前者の方が明らかに大きい。又、ナトリウム漏洩率は、セル内温度・圧力の上昇率に大きく影響している。



COMMERCIAL
PNC[Z]N241 83-09
April, 1983

Sodium Spray Fire Analysis

Sinya Miyahara*
Norimasa Mitsutsuka**

ABSTRACT

Sodium spray fire experiments using a 21 m³ vessel were performed in order to validate the computer code SPRAY-III which assesses temperature-pressure transients resulting from a sodium spray release in a vessel. Precalculations were conducted to predict the peak pressure versus the design value (1.9 kg/cm²G) and to select experimental conditions. The following results were obtained:

1) When the number concentration of droplets in a spray zone was held constant, the rates of increase in pressure and temperature and their peak values became higher with wider spray cone angle and a higher sodium leakage rate. The gas pressure and temperature reached the peak values at the end of sodium injection and then decreased rapidly.

The concentrations of oxygen and water vapor decreased during the sodium combustion and were constant after the termination of sodium injection. Hydrogen was generated slowly as the sodium was injected. But its concentration reached a low constant value thereafter since SPRAY accounts for oxygen-hydrogen reactions. The rate of hydrogen generation increased with the spray cone angle and the sodium leakage rate.

2) In the case of a 21 v/o initial oxygen content, the peak pressure and temperature were about twice higher than those in the 3 v/o case. A higher initial oxygen concentration predicts lower water vapor consumption and hydrogen generation.

3) The peak pressure and temperature increased with the sodium leakage rate or the spray cone angle. Comparing of the calculational results between cases of (a) varying the sodium leakage rate under a constant spray cone angle and (b) varying the spray cone angle under a constant sodium leakage rate, it was found that the peak pressure and temperature were more sensitive to the former than the latter. In particular the

sodium leakage rate affected the rates of increase in pressure and temperature.

4) The peak pressure and temperature and the amount of generated hydrogen increased with the initial concentration of water vapor. But a variation in the concentration (from 1500 to 15000 vppm) showed only small differences in the peak pressure and temperature.

5) The peak pressure and temperature increased as the droplet diameter decreased. The peak values for a 0.85 mm diameter were about three times as high as those for a 4.572 mm diameter.

From these results, it was concluded that the sodium leakage rate, initial oxygen content and droplet diameter were the important factors in evaluating the gas pressure and temperature in a vessel during a sodium spray fire.

* FBR Development Project

** Present Address : Toshiba Corporation, Nuclear System Design
Engineering Department

ナトリウム・スプレー燃焼の解析

目 次

I. 序 文	1
II. “SPRAY”コードの概要	2
III. ナトリウム・スプレー燃焼試験の概要	4
IV. 解 析	5
IV. 1 解析の範囲と内容	5
IV. 2 解析結果と考察	6
V. 試験条件案の作成	10
VI. あとがき	11
VII. 謝 辞	12
参考文献	13

List of Table

Table III	:	Measuring Items of Sodium Spray Fire Tests
Table IV-1	:	SPRAY Code Input Data
Table IV-2	:	Calculation Parameters
Table IV-3	:	Comparative Conditions of Case (1)
Table IV-4	:	Comparative Conditions of Case (2)
Table IV-5	:	Comparative Conditions of Case (3)
Table IV-6	:	Comparative Conditions of Case (4)
Table IV-7	:	Comparative Conditions of Case (5)
Table IV-8	:	Comparative Conditions of Case (6)
Table IV-9	:	Comparative Conditions of Case (7)
Table IV-10	:	Comparative Conditions of Case (8)
Table IV-11	:	Summary of Calculation Results (1)
Table IV-12	:	Summary of Calculation Results (2)
Table V	:	A Plan of Test Conditions

List of Figure

- Fig. II-1 : Sodium Spray Chamber Model
- Fig. II-2 : Gas Convection Model for Cell
- Fig. II-3 : Reaction Model for Sodium Droplet
- Fig. II-4 : Heat Transfer Model for Sodium Droplet
- Fig. III-1 : Schematic Figure of Test Vessel
- Fig. IV.1-1~5: Case (1) Data
- Fig. IV.2-1~5: Case (2) Data
- Fig. IV.3-1~5: Case (3) Data
- Fig. IV.4-1~5: Case (4) Data
- Fig. IV.5-1~5: Case (5) Data
- Fig. IV.6-1~5: Case (6) Data
- Fig. IV.7-1~5: Case (7) Data
- Fig. IV.8-1~5: Case (8) Data

I . 序 文

高速増殖炉の冷却材として使用されているナトリウムは、高温に維持されている為、冷却材漏洩事故が生じた場合には、ナトリウムの顕熱による熱エネルギーのみでなく、雰囲気中の酸素や水蒸気との化学反応による反応エネルギーも放出する。従って、格納容器の安全評価及び格納容器内各室のライナー設計を行う上で、ナトリウムの漏洩に伴う事象の定量的評価が必要である。

ナトリウムの漏洩と燃焼は、その形態から二つの型に大別できる。一つは、バウンダリーの破損が生じた場合に、内圧でナトリウムが噴出し、噴霧状に燃焼するスプレー燃焼である。他の一つは、流出したナトリウムが床上にプールを形成して燃焼するプール燃焼である。これらのナトリウム燃焼解析コードとして、スプレー燃焼は“SPRAY”¹⁾コードが、プール燃焼は“SOFIRE-II”²⁾コードが米国で開発されている。我国では、高速増殖原型炉「もんじゅ」の安全解析にこれらのコードが用いられている。

スプレー燃焼は、プール燃焼に比較して反応に関与するナトリウムの総表面積が大きくなるので、エネルギーの放出割合が大きく、格納容器内の温度と圧力の急上昇をもたらす。従来、米国においては、AI社の0.5 m³の容器や、HEDLの850 m³の容器によるスプレー燃焼試験が行われている。“SPRAY”コードの検証も実施されているが、その詳細は公表されていない。一方、我国では、内容積2 m³の容器によるスプレー燃焼試験³⁾が行われているのみであり、さらに規模の大きい試験が必要であった。又、特に我国においては、水蒸気の影響についても十分検討しておく必要がある。そこで“SPRAY”コードの検証を目的として、内容積21 m³の容器による、ナトリウム・スプレー燃焼試験を三菱重工業㈱高砂研究所に委託して実施した。

今回は試験に先立ち、試験条件を選定する事と、試験容器が法規上の耐圧制限(1.9 Kg/cm²g)を受ける為、試験で予想される最高圧力の目安を得る事を目的として実施したパラメーターサーベイの結果について報告する。

“SPRAY”コードの概要を第II章に、ナトリウム・スプレー燃焼試験の概要を第III章に、解析結果と考察を第IV章に、試験条件案の作成を第V章に記述した。又、予備計算を実施中にコードの問題点がいくつか判明したので、それらをAPPENDIXとして記載した。

Ⅱ．“SPRAY”コードの概要

“SPRAY”は、米国のHEDL (Hanford Engineering Development Laboratory) において開発されたコードで、高速増殖炉の格納容器空間内で、ナトリウム・スプレー液滴が放出された時の熱と質量の移行、液滴の動き、ガスの対流、及び燃焼熱力学を解析することができる。米国では、高速増殖炉の冷却材漏洩事故で想定される雰囲気酸素濃度と液滴サイズの範囲については、実験^{4), 5)}により検証されている。

我国では、米国ANL (Argonne National Laboratory) のコードセンターより、公開コードとして“SPRAY-Ⅲ”を入手した。その後、日米高速炉協定により改良バージョンである“SPRAY-ⅢA”コードを入手した。さらに、“SPRAY-ⅢA”コードは、昭和55年に、高速増殖原型炉“もんじゅ”の一次収納構造の設計⁶⁾に用いる為に、壁、床等の構造材中への熱移行モデルを追加して温度分布を求められるように改良された。このバージョンは、“SPRAY-ⅢM”コードと呼ばれている。

¹⁾
“SPRAY”のモデルについて以下に述べる。

“SPRAY”では、Fig. II-1に示すように、セルをナトリウム・スプレー液滴で満たされた内部領域を含む、円柱にモデル化している。スプレーの領域は、コーン状をしており、衝突面の面積とそれに対する角度によって定義される。これにより、ジェット状に放出され、その後、天井に衝突してスプレー液滴が形成される場合や、オリフィスによりスプレー液滴が形成される場合を模擬することができる。

気体の運動は、液滴からの抗力とガス領域の内側、外側の温度密度差による気体の浮力によってもたらされ、Fig. II-2に示すように quasi-two-dimensional モデルとして取り扱われている。又、乱流条件の横方向の流れによるせん断力も、気体の運動に作用する。中央部分の気体の流れは、浮力が支配的か、液滴による抗力が支配的かによって、上昇又は下降のどちらかになる。

ナトリウム燃焼モデルでは、液滴を対数正規分布として取扱っているが、反応速度を計算する際に、表面積平均直径を用いている。

この簡略化は、液滴からの熱と質量移行に対しては、妥当と考えられる。既に、その表面積に液滴の個数を乗じたものが、全ナトリウム液滴の表面積と等しいからである。

ナトリウムは、酸素や水蒸気のいずれか、又はその両方と反応し、酸化ナトリウム(Na_2O)又は過酸化ナトリウム(Na_2O_2)を生成する。その反応速度は、ナトリウムの燃焼ゾーンへの

物質移動と、酸素や水蒸気の周囲の雰囲気から燃焼ゾーンへの物質移動により支配される。

ナトリウム液滴への熱及び物質移動に用いられるモデルは、Ranz and Marshalの球のまわりの強制対流熱伝達の式を基にしている。Fig. II-3 及び Fig. II-4 に熱移行のモデルを示す。酸素濃度が低く ($< 2 \text{ mol } \%$)、かつナトリウム温度が 530°C 近傍では、反応による熱はナトリウム自身の顕熱に比べて無視できる。空気中では、燃焼熱と顕熱の両方が重要である。ナトリウム液滴は、強制対流を生じながら気体中を落下する。静止状態から重力によって落下する液滴は、気体中である一定の終末速度に近づく。液滴からの熱と質量の移動の計算には、球対称の仮定が用いられ、実際この対称性は、液滴の運動によってほとんど影響されない。さらに、運動する液滴のまわりを境界層がとり囲んでおり、この層は液滴に対して相対的に動いていないガス膜を形成し、その膜の中に燃焼ゾーンが存在すると仮定している。

境界層中を、ナトリウム蒸気は液滴表面から外側へ、酸素と水蒸気は内側へ拡散し、燃焼ゾーンで三者が化学量論的な割合で消費される。燃焼ゾーンの半径 r_B の位置は、反応の化学量論によって必要とされるナトリウム蒸気、酸素、及び水蒸気の到達速度が一致する位置として決定される。

熱収支の条件は、次のようである。即ち、熱が燃焼ゾーンで生成され、反応物の温度は燃焼温度まで上昇する。熱は、燃焼ゾーンから液滴、気体、及び室の壁へ、対流・伝導・輻射によって移行する。又、液滴は、熱を吸収し、蒸発するナトリウムに気化熱を与えている。

Ⅲ．ナトリウム・スプレー燃焼試験の概要

ナトリウム・スプレー燃焼試験は、

- (i)ナトリウム・スプレー燃焼解析コードの検証用データを取得すること
- (ii)エアロゾル濃度や気体成分の濃度変化等のスプレー燃焼に附随する諸現象に関する実験的知見を得ること

を目的として計画された。その後、

- (iii)「もんじゅ」53項目の第29項(ナトリウム漏洩等におけるエアロゾルの挙動、ナトリウムと水分との反応現象について確認すること)

への対応の一部としても位置づけられた。

試験の概略は以下のとおりである。

(1) 試験容器

試験容器は、三菱重工業㈱高砂研究所に既設の内容積 21 m^3 の円筒型密閉容器で、天井部にナトリウム・スプレー発生ノズルを新設した。容器の概略をFig. III-1に示す。⁷⁾

(2) 測定項目

測定項目を、Table-IIIに示す。

今回の試験の為、水蒸気濃度、水素濃度及びNaエアロゾルの測定項目を追加した。

(3) 試験条件

計画されている試験パラメーターは以下の通りである。

- スプレー液滴径
- スプレー噴射角度
- 酸素濃度
- 水蒸気濃度
- 初期ナトリウム温度
- ナトリウム漏洩率
- 漏洩持続時間

IV. 解 析

IV. 1 解析の範囲と内容

“SPRAY-ⅢM”コードを用い、試験に使用する 21 m^3 の試験容器を対象として、ナトリウム・スプレー燃焼の解析を実施した。解析のベースは、 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 100 mm Aq の雰囲気中に、 $400\text{ }^\circ\text{C}$ のナトリウム 50 Kg が4分間スプレーされるケースとした。これは、漏洩率にすると 0.21 Kg/sec で、単位容積当りのナトリウム漏洩率に換算すると $0.01\text{ Kg/sec}\cdot\text{m}^3$ となる。即ち、「もんじゅ」実機の規定事故解析で用いられている一次主冷却系室のスプレー燃焼のケース（雰囲気容積約 $3,700\text{ m}^3$ 、ナトリウム漏洩率 26 Kg/sec ）における単位容積当りのナトリウム漏洩率約 $0.007\text{ Kg/sec}\cdot\text{m}^3$ とほぼ等しい値である。

ナトリウムの液滴分布としては、「もんじゅ」安全審査の事故解析で用いられている平均液滴径 4.572 mm 、幾何標準偏差 2.64 を基準として用いた。

Table IV-1⁸⁾に解析に用いた入力データを示す。入力データのうち、ナトリウムの漏洩率、初期酸素濃度、水蒸気濃度、ナトリウム温度、スプレーコーン拡がり角、及び液滴粒径分布をパラメータとして選び、合計11回の計算を実施した。

パラメーターの変化範囲は、以下のとおりである。

(1) ナトリウム漏洩率

0.83 Kg/sec 、 0.21 Kg/sec 、 0.052 Kg/sec

（ナトリウム漏洩持続時間として1分、4分、16分）

(2) 初期酸素濃度

3%、12%、21%

(3) 初期ナトリウム温度

$400\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $530\text{ }^\circ\text{C}$

(4) スプレーコーン拡がり角

14° 、 28° 、 53°

(5) 初期水蒸気濃度

$1,500\text{ ppm}$ 、 $15,000\text{ ppm}$

(6) 初期平均液滴径

4.572 mm （標準偏差 = 2.64 ）

0.85 mm （標準偏差 = 1.46 ）

これらをまとめたものを Table IV-2 に示した。

入力データのうち、スプレー衝突面については、実際の試験がノズルを用いている為に“SPRAY”コードのモデルと異なっているが、解析では衝突面実効径をノズル口径でおきかえ、熱容量を無視した。

又、酸素量当りの反応熱を保守的にみる為、過酸化ナトリウム (Na_2O_2) は生成せず、全て酸化ナトリウム (Na_2O) が生成するとした。

IV. 2 解析結果と考察

実施した11回の計算結果は、各比較項目から、次の8つのケースに分類できる。

Case 1 : ナトリウム漏洩率の効果(1), 低酸素濃度

Case 2 : ナトリウム漏洩率の効果(2), 高酸素濃度

Case 3 : 初期酸素濃度の効果

Case 4 : 初期酸素濃度及びナトリウム温度の効果

Case 5 : ナトリウム漏洩率の効果(3), スプレー拡がり角一定

Case 6 : スプレー拡がり角の効果

Case 7 : 初期水蒸気濃度の効果

Case 8 : スプレー液滴径の効果

各ケースの比較条件を Table IV-3 ~ Table IV-10 に示す。解析結果のうち、容器内ガス平均温度、ガス圧力、雰囲気中酸素、水蒸気及び水素のモル分率の経時変化を各ケース毎に各1枚のグラフにまとめて示した。以下、各ケース毎に結果を説明し、考察を加える。

(1) Case 1 : ナトリウム漏洩率の効果(1), 低酸素濃度

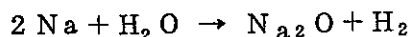
ナトリウムの総装荷量をほぼ50Kgと一定にし、ナトリウムの漏洩時間、即ち漏洩率を変えて、その効果を調べた。酸素濃度が3%の場合の結果を Fig. IV.1-1 ~ 5 に示す。漏洩時間の変化範囲は1分から16分で、これに対応して、漏洩率は $0.83\text{Kg}/\text{sec}$ から $0.052\text{Kg}/\text{sec}$ となる。また、スプレーの拡がり角も、同時に 53° から 14° まで変化させ、スプレーゾーン内の液滴の個数濃度を一定としている。

容器内のガス圧力及びガス平均温度はスプレーの終了時に最大となる。ナトリウムの装荷量がほぼ等しいにもかかわらず、これらの変化率とピーク値はナトリウムの漏洩率の影響を大きく受ける。 $0.83\text{Kg}/\text{sec}$ (A-1) の場合は $0.052\text{Kg}/\text{sec}$ と比較してピーク圧力は約5倍、ピーク温度は約3倍となっている。また、温度及び圧力の上昇率も漏洩率が高いケースほど高い。

図の実線は、RUN A-0の結果であるが、これは、燃焼打ち切り定数(コード内変数名: YMIN)を、初期酸素濃度と初期水蒸気濃度よりも大きな値に設定して、スプレー液滴の燃焼解析を行わずナトリウムの顕熱効果のみを解析した結果である。ナトリウムが燃焼した場合よりガス圧力、ガス温度のいずれも高くなったが、これは、ナトリウムの蒸発熱が、燃焼したナトリウム量より算出されている為に、ナトリウム噴出開始時から燃焼を打ち切ると蒸発熱が考慮されず、したがってガスへの熱移行量が大きくなるのが原因であった。又、計算途中で酸素濃度及び水蒸気濃度が、打ち切り定数以下になって燃焼が起こらなくなった場合は、前のタイム・ステップに於ける蒸発熱が用いられている。したがって、初期から燃焼が起こらない場合のナトリウムの蒸発熱を評価する方法をモデル化する必要がある。これは、今後の“SPRAY”コードの課題の一つである。

酸素と水蒸気は、ナトリウムが燃焼するにつれて減少し、スプレー完了後は一定値になる。これは、“SPRAY”コードではブール燃焼を考慮せず、壁と空間への熱移行のみを考慮している為である。又、顕熱効果の解析では、いずれも変化していない。(Fig.V.1-3~4)

水素は、スプレー開始とともに徐々に発生し、完了後は一定値に達する。これは、“SPRAY”コードではナトリウムと水蒸気が反応して水素が生成する反応式



を仮定しているためである。その発生率は、Na漏洩率が高い程、高くなる。

尚、本解析の結果は、スプレー拡がり角の影響も含まれているが、Case 6で述べるように、本解析の条件では広い方(漏洩率の高い方)が、若干高いピーク圧とピーク温度となる。顕熱効果の解析では、水素は発生していない。(Fig.V.1-5)

(2) Case 2: ナトリウム漏洩率の効果(2), 高酸素濃度

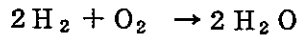
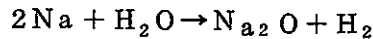
初期酸素濃度が21%の場合について、Case-1と同様にスプレーコーン内の液滴個数濃度を一定にした結果、容器内の圧力・温度ともCase-1と同じ傾向であった。ただし、Case-2の場合の方がピーク値の増加割合がCase-1よりも若干多い。これは、ナトリウムの顕熱、反応による熱の発生が相乗的に加わるためと考えられる。(Fig.V.2-1~5)

(3) Case 3: 初期酸素濃度の効果

初期酸素濃度が3%と21%の場合を比較すると、容器内の圧力・温度ともに、後者は前者の約2倍のピーク値を示した。(Fig.V.3-1~2)

又、“SPRAY”コードのモデルでは、酸素と水素の反応による水蒸気(H₂O)の生

生を考慮している為、初期酸素濃度が高い場合の方が、水蒸気の減少は少なく、水素の発生量も少ない。(Fig.V.3-3~5)



(4) Case 4 : 初期酸素濃度及びナトリウム温度の効果

容器内の圧力・温度に大きな影響を及ぼす因子は、初期酸素濃度が3%と21%の場合については、初期ナトリウム温度よりも初期酸素濃度である。

酸素濃度が同じであれば、初期ナトリウム温度が高い方が圧力・温度とも高い値を示した。(Fig.V.4-1~5)

(5) Case 5 : ナトリウム漏洩率の効果(3), スプレー拡がり角一定

これは、Case-2と類似のケースであるが、Case-2ではスプレー拡がり角を変えて液滴の個数濃度を一定としていたのに対し、スプレー拡がり角を一定の53°とし、ナトリウム漏洩率のみによる効果を見たものである。ピーク圧力の増加割合は120%となり、Case-2の場合よりも若干小さな値となっている。(Fig.V.5-1~5)

(6) Case 6 : スプレー拡がり角の効果

ナトリウム漏洩率、又はスプレー拡がり角が大きい方が、容器内の圧力・温度ともに高い値を示した。ただし、拡がり角を28°から53°にした場合のピーク圧力の上昇は、10%程度である。

スプレー拡がり角を一定にし、ナトリウム漏洩率を比較した場合(Case-5)と、ナトリウム漏洩率を一定にし、スプレー拡がり角を比較した場合を比べると、容器内の圧力・温度への影響は前者の方が明らかに大きい。

又、ナトリウム漏洩率は、圧力・温度の立ち上がりに大きく影響している。

(Fig.V.6-1~5)

(7) Case 7 : 初期水蒸気濃度の効果

初期水蒸気濃度が1,500ppmと15,000ppmの場合を比較すると、容器内の圧力・温度は後者の方が高いピーク値を示すが、その影響はナトリウム温度や酸素濃度に比べると小さい。

しかし、水素の発生量は水蒸気濃度が高い場合の方が多くなった。(Fig.V.7-1~5)

(8) Case 8 : スプレー液滴径の効果

ナトリウム液滴径の影響を比較すると、液滴径が小さい方が、容器内の圧力・温度ともにピーク値は高くなる。4.572 mm (CRBR, もんじゅ並) と 0.85 mm の場合を比較すると、後者は前者の約3倍のピーク値を示し、ピークの出現時刻も早くなった。又、液滴径が小さい方が酸素の減少が大きく、水素の発生率、及び発生量も大きくなった。

(Fig.V.8 - 1 ~ 5)

以上の結果をまとめると、Table V - 11, Table V - 12 のようになる。これらの表から明らかのように、容器内の圧力・温度のピーク値を評価する上で、Na 漏洩率、初期酸素濃度、液滴径が重要な因子であることがわかったが、これらのうち、液滴径の影響については我国でこれまで検討されておらず、今回の解析で初めてその影響の大きさが明らかにされた。

V . 試験条件案の作成

以上の解析結果をもとにして、試験条件案を作成した。これを Table - V に示す。

液滴径が 0.85 mm で、酸素濃度が 21% の場合は、試験容器の法規上の耐圧制限 (1.9 Kg/cm^2) を超える解析結果となったが、本試験容器は内高が 3 m と低い為に、液滴径を大きくすると着火する前に落下してしまふ可能性がある。従って、液滴径は 1 mm 程度として、おだやかな試験から開始し、各試験結果を反映しながら次の試験を行うこととした。

VI あとがき

ナトリウム・スプレー燃焼試験は、以前に実施したスプレー燃焼実験と比較して、セル容積で約10倍、ナトリウム載荷量で約100倍である。このため“SPRAY”コードをはじめとする解析コードの検証データが得られるのみならず、実機のナトリウム・スプレー漏洩事故による影響をよりよく理解する上で、有益なデータが得られるものと期待される。

今回の予備解析を実施した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 同じ量のナトリウムの漏洩であっても、セル内ガスのピーク圧力、ピーク温度は漏洩率 (Kg/sec) の影響を受け、漏洩率が高いほど、ピーク値も高くなる。
- (2) 酸素濃度が21v/oと3v/oの場合を比較すると、当然のことながらセル内ガスのピーク圧力値、ピーク温度値は、21v/oの方が高い。
- (3) 同じ漏洩量、同じ漏洩率の場合、容器内のピーク圧力、ピーク温度は、ナトリウムの液滴径に大きく依存し、平均液滴径が小さいほど、ピーク値は高くなる。

以上のような知見をもとに、試験計画を作成したが、解析コードがよりきびしい条件の解析に対しても使用できることを確認できるように、ナトリウムの漏洩率は実機の想定事故をスケールダウンしたものよりも高目の値を用い、液滴径はかなり小さ目のものを用いる予定である。後者については、本試験容器の内高が3mと低い為に、液滴径を大きくすると着火する前に落下してしまいう可能性があるため、このことも考慮している。又、空気雰囲気での試験も2回実施する予定である。

一方、本解析であまり効果の見られなかったスプレー広がり角の効果については、ノズルの手配等の試験準備は進めているが、試験計画からははずす予定である。

Ⅶ 謝 辞

本解析の遂行にあたって、三菱重工業㈱高砂研究所の関係各位に多大の御助言、御尽力を賜った。特に燃焼伝熱研究室の佐野主任には、常に適切かつ有益な御助言を頂いた。ここに深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) P.R.Shire, "SPRAY CODE USER'S REPORT", HEDL-TME
76-94 UC 79 a, i, p (March 1977)
- 2) P.Beiriger, J.Hopenfeld, etc., "SOFIRE-II USER REPORT",
AI-AEC-13055 LMFBR SAFETY UC-79P (March 1973)
- 3) 佐川憲彦, 他, "ナトリウム噴霧燃焼事故解析コードの開発試験", PNC SJ202
78-14 (1978.3)
- 4) "Quarterly Technical Progress Report, LMFBR Safety Programs,
January-March 1971", AI-AEC-12992, Atomics International, May
31, 1971.
- 5) "Quarterly Technical Progress Report, LMFBR Safety Programs,
January-March 1972", AI-AEC-13026, Atomics International, May
1972.
- 6) "一次収納構造の設計", PNC ZJ222 81-04 (1980.11)
- 7) 八木 隆, 他, "一次収納構造健全性試験", PNC SJ222 77-08(1), (1977.7)
- 8) 佐野 保, "Naスプレ火災予備解析条件提案の件" 私信メモ, NS-81-29,
(1981.10)

Table III Measuring Items of Sodium Spray Fire Tests

Na スプレー燃焼試験測定項目

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 4. 2 参照	C A 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 マ	ホルザット分析器	1	OFFライン
			磁気式 O ₂ モニタ	1	モニタ
湿 分 濃 度	ガス中湿分濃度	"	露 点 計	1	
			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	"	サンプリング法	1~2	OFFライン
			光学式濃度計	1	ON ライン
			カスケード インパクト法	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	
	垂直面沈着 エアロゾル	"	沈 着 板 法	数 点	

<注> エアロゾル計測は今後の進捗により方法等の変更がありうる。

Table N-1 SPRAY Code Input Data

SPRAYコードインプット変数

Ⓟはパラメータにとることを示す

名 称	単 位	区 分			数 値	備 考
		寸法	スプレ	他		
初期平均液滴径	cm		○		Ⓟ	
セル壁面積	m ²	○			42.4	
初期ガス圧	Kg/cm ²			○	1.043	100mm Ag相当
初期ガス温度	℃			○	20℃	
初期Na温度	℃			○	Ⓟ	
初期湿分温度	mol %			○	Ⓟ	
雰囲気容積	m ³	○			21.0	
スプレコーン高さ	m		○		3	
一定Na漏洩率	Kg/s			○	Ⓟ	
Naスプレ時間	sec		○		Ⓟ	
スプレ衝突面実効径	m		○		0.001	スプレノズル使用の為
スプレコーン頂角	rad		○		Ⓟ	
初期O ₂ 濃度	mol %			○	Ⓟ	
実効セル径	m	○			3	
セルの高さ	m	○			3	
壁の熱容量/面積	Kcal/m ² ℃	○			5.15	
衝突面熱容量/面積	"	○			~ 0	今回のテストではスプレノズルのものを主体とする。したがって熱容量無視。
液滴径の標準偏差	-		○		Ⓟ	
スプレコーンメッシュ数	-		○		~10	≤ 100
Na ₂ O ₂ 生成割合	-			○	0.0	反応を保守的にみるために0.0
衝突面メッシュ数	-		○		適当な値	≤ 100
壁メッシュ数	-	○			4	≤ 100
床メッシュ数	-	○			4	≤ 100
衝突面ギャップ熱伝導率	Kcal/m h℃		○		~0.0	
壁ギャップ熱伝導率	"				0.03	
床ギャップ熱伝導率	"				0.03	
衝突面外側伝熱量	Kcal/m h				0.0	
壁の "	"				0.0	
床の "	"				0.0	

Table N-1 SPRAY Code Input Data(Continued)

SPRAYコードインプット変数

名 称	単 位	区 分			数 値	備 考
		寸法	スプレ	他		
(壁, 床とも同一値)						
メッシュ幅	m	○			0.08	モルタル
					0.133	コンクリート
					0.133	"
					0.133	"
熱伝導率	Kcal/mh℃			○	0.4	
					1.8	
					1.8	
					1.8	
メッシュ初期温度	℃			○	~20℃	各メッシュ共
ギャップ幅	m	○			~0	"
メッシュ密度	Kg/m ³			○	2,000	
					"	
					"	
					"	
メッシュ比熱	Kcal/Kg℃			○	0.2	
					"	
					"	
					"	

Table N-2 Calculation Parameters

計算パラメータ

区分	液滴径 (標準 偏差)	スプレー 拡がり角	ナトリウム 漏洩率	ナトリウム スプレー 継続時間	初期 ナトリウム 温度度	初期 酸素 濃度	初期 湿度 濃度	note
	(mm)	(DEG)	(Kg/s)	(min)	(℃)	(%)	(ppm)	
A-0	4.572 (2.64)	53°	0.83	1	400	3	1500	燃焼打切定数により 燃焼させなかったもの (顕熱効果)
A-1	"	53°	0.83	1	400	3	1500	
A-2	"	28°	0.21	4	400	3	1500	
A-3	"	14°	0.052	16	400	3	1500	
A-4	"	53°	0.83	1	400	21	1500	
A-5	"	28°	0.21	4	400	21	1500	
A-6	"	53°	0.83	1	530	3	1500	
A-7	"	53°	0.83	1	530	21	1500	
A-8	"	53°	0.21	4	400	21	1500	
A-9	"	53°	0.83	1	400	3	15000	
B-1	0.85 (1.46)	53°	0.83	1	400	21	1500	

Table N-3 Comparative Conditions of Case (1)

Case (1)の比較条件

比較項目	区分	LINE	スプレー拡がり角	ナトリウム漏洩率	ナトリウムスプレー時間
	A-0	————	53°	0.83 Kg/s	1分
	A-1	-----	53°	0.83 Kg/s	1分
	A-2	-----	28°	0.21 Kg/s	4分
	A-3	-----	14°	0.052 Kg/s	16分
固定値	初期平均液滴径(偏差)		4.572mm (2.64)		
	初期ナトリウム温度		400℃		
	初期酸素濃度		3.0%		
	初期水蒸気濃度		1500ppm		

Table N-4 Comparative Conditions of Case (2)

Case (2)の比較条件

比較項目	区分	LINE	スプレー拡がり角	ナトリウム漏洩率	ナトリウムスプレー時間
	A-4	————	53°	0.83 Kg/s	1分
	A-5	-----	28°	0.21 Kg/s	4分
固定値	初期平均液滴径(偏差)		4.572 mm (2.64)		
	初期ナトリウム温度		400℃		
	初期酸素濃度		21%		
	初期水蒸気濃度		1500 ppm		

Table N-5 Comparative Conditions of Case (3)

Case (3)の比較条件

比較項目	区分	LINE	初期酸素濃度		
	A-1	————	3.0%		
	A-4	-----	21.0%		
固定値	初期平均液滴径(偏差)		4.572 mm (2.64)		
	スプレー拡がり角		53°		
	ナトリウム漏洩率		0.83 Kg/s		
	ナトリウムスプレー時間		1分		
	初期ナトリウム温度		400℃		
	初期水蒸気濃度		1500 ppm		

Table N-6 Comparative Conditions of Case (4)

Case (4)の比較条件

比較項目	区分	LINE	初期ナトリウム温度	初期酸素濃度	
	A-1	————	400℃	3.0%	
	A-6	-----	530℃	3.0%	
	A-4	-----	400℃	21.0%	
	A-7	-----	530℃	21.0%	
固定値	初期平均液滴径(偏差)		4.572 mm (2.64)		
	スプレー拡がり角		53°		
	ナトリウム漏洩率		0.83Kg/s		
	ナトリウムスプレー時間		1分		
	初期水蒸気濃度		1500ppm		

Table N-7 Comparative Conditions of Case (5)

Case (5)の比較条件

比較項目	区分	LINE	ナトリウム漏洩率	ナトリウムスプレー時間	
	A-4	————	0.83 Kg/s	1分	
	A-8	-----	0.21 Kg/s	4分	
固定値	初期平均液滴径(偏差)		4.572 mm (2.64)		
	スプレー拡がり角		53°		
	初期ナトリウム温度		400℃		
	初期酸素濃度		21%		
	初期水蒸気濃度		1500 ppm		

Table N-8 Comparative Conditions of Case (6)

Case (6)の比較条件

比較項目	区分	LINE	スプレー拡がり角		
	A-5	—————	28°		
	A-8	-----	53°		
固定値	初期平均液滴径(偏差)		4.572 mm (2.64)		
	ナトリウム漏洩率		0.21 Kg/s		
	ナトリウムスプレー時間		4分		
	初期ナトリウム温度		400℃		
	初期酸素濃度		21%		
	初期水蒸気濃度		1500 ppm		

Table N-9 Comparative Conditions of Case (7)

Case (7)の比較条件

比較項目	区分	LINE	初期水蒸気濃度		
	A-1	————	1500 ppm		
	A-9'	-----	15000 ppm		
固定値	初期平均液滴径(偏差)		4.572 mm (2.64)		
	ナトリウム漏洩率		0.83 Kg/s		
	ナトリウムスプレー時間		1分		
	初期ナトリウム温度		400℃		
	初期酸素濃度		3%		
	スプレー拡がり角		53°		

Table IV-10 Comparative Conditions of Case (8)

Case (8)の比較条件

比較項目	区分	LINE	初期平均 液滴径 (偏差)		
	A-4	————	4.572 mm (2.64)		
	B-1	-----	0.85 mm (1.46)		
固定値	スプレー拡がり角		53°		
	ナトリウム漏洩率		0.83 Kg/s		
	ナトリウムスプレー時間		1分		
	初期ナトリウム温度		400℃		
	初期酸素濃度		21%		
	初期水蒸気濃度		1500 ppm		

Table N-11 Summary of Calculation Results (1)

解析結果のまとめ (1)

区分	最高ガス 圧力 ($\text{Kg/cm}^2\text{G}$)	最高ガス 平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)	最終酸素 濃度 (v/o)	最終水蒸気 濃度 (Vppm)	最終水素 濃度 (Vppm)	備考
A-0	0.43331	140.66	3.0	1500.0	0.0	顕熱効果
A-1	0.39919	132.30	2.7092	1400.7	103.55	ナトリウム漏洩率効果
A-2	0.19864	75.862	2.7125	1403.3	100.95	解析ベース
A-3	0.081197	42.787	2.7728	1408.0	95.968	ナトリウム漏洩率効果
A-4	0.79204	251.73	19.389	1440.8	89.508	酸素濃度効果
A-5	0.34084	121.61	19.499	1446.1	82.156	ナトリウム漏洩率効果
A-6	0.52401	167.42	2.6974	1400.9	103.54	Na 温度効果
A-7	0.89317	280.67	19.381	1442.2	88.282	"
A-8	0.36439	128.27	19.515	1445.4	82.504	スプレー拡がり角効果
A-9	0.41667	137.27	2.6958	1403.40	1010.5	水蒸気濃度効果
B-1	2.4483	809.71	6.3977	1665.1	111.84	滴液径効果

Table IV - 12

Summary of Calculation Results (2)

解析結果のまとめ(2)

影響項目 パラメーター	容器内の 圧力・温度の 立ち上がり	圧力・温度の ピーク値	水素発生率	水素発生量
スプレー 拡がり角		影響大		
ナトリウム 漏洩率	影響大	影響大	影響大	
初期酸素濃度	影響大	影響大		影響小
初期水蒸気濃度		影響小		影響大
初期 ナトリウム温度	影響小	影響小		
液滴径	影響大	影響大	影響大	影響小

 影響大

 影響小

 影響なし

Table V A Plan of Test Conditions

試 験 条 件 案

No.	平均粒径	スプレー 拡がり角	初期 酸素濃度	初期 湿分濃度	初期ナトリ ウム温度	備 考
			(%)	(ppm)	(℃)	
1	1 mm級	30°	~0	~0	530	顕熱効果試験
2	"	"	3	"	"	一次系O ₂ 濃度試験
3	"	"	3	~10000	"	湿分効果試験
4	"	"	21	~0	"	二次系O ₂ 濃度試験
5	"	55°	3又は21	~0	"	スプレー拡がり角効果試験
6	"	30°	"	"	400	Na温度効果試験
7	5 mm級	55°	3	~1500	530	液滴径効果試験
8	"	"	21	~0	"	"

注 (1) 以上の中から試験結果を反映しつつ必要6ケースに絞る。

(2) 試験進捗によっては本表の見直しを行うものとする。

(3) Na漏洩率(15~50Kg/min), Na漏洩量(約50Kg), Na漏洩時間(1~4min)を目安とする。

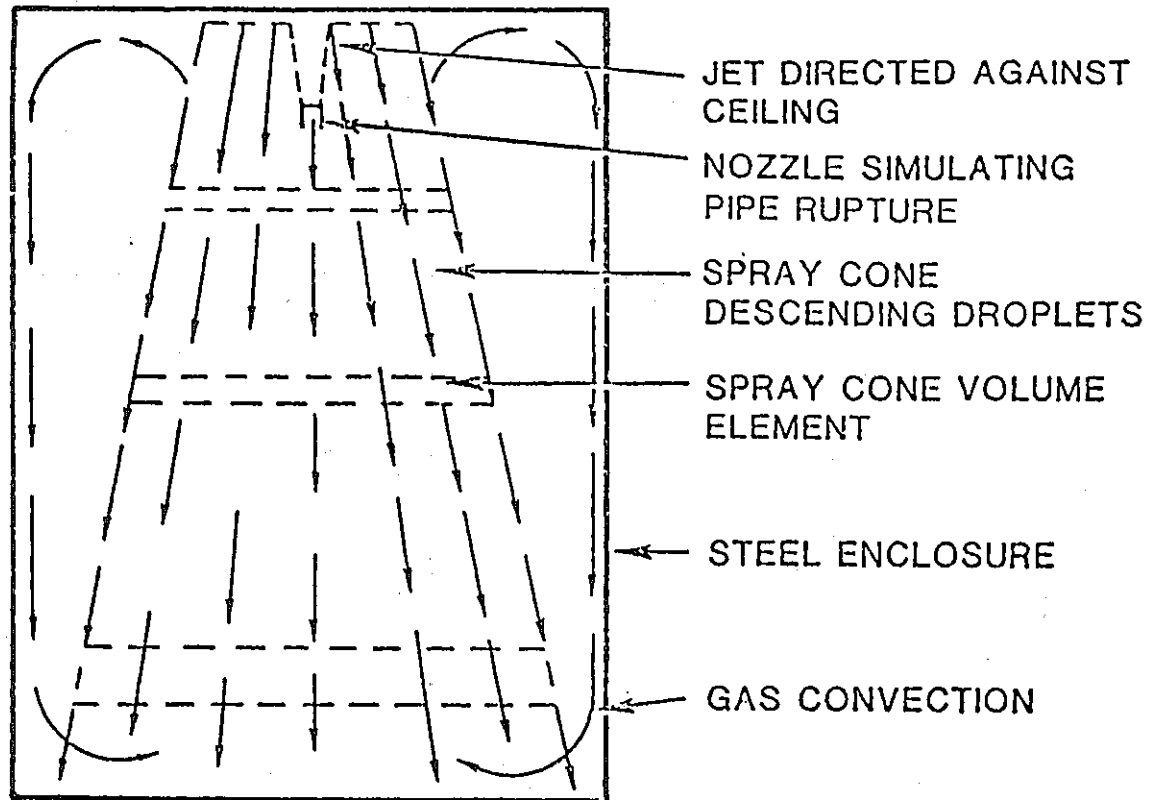


Figure II -1 Sodium Spray Chamber Model

容器内のナトリウム・スプレーモデル

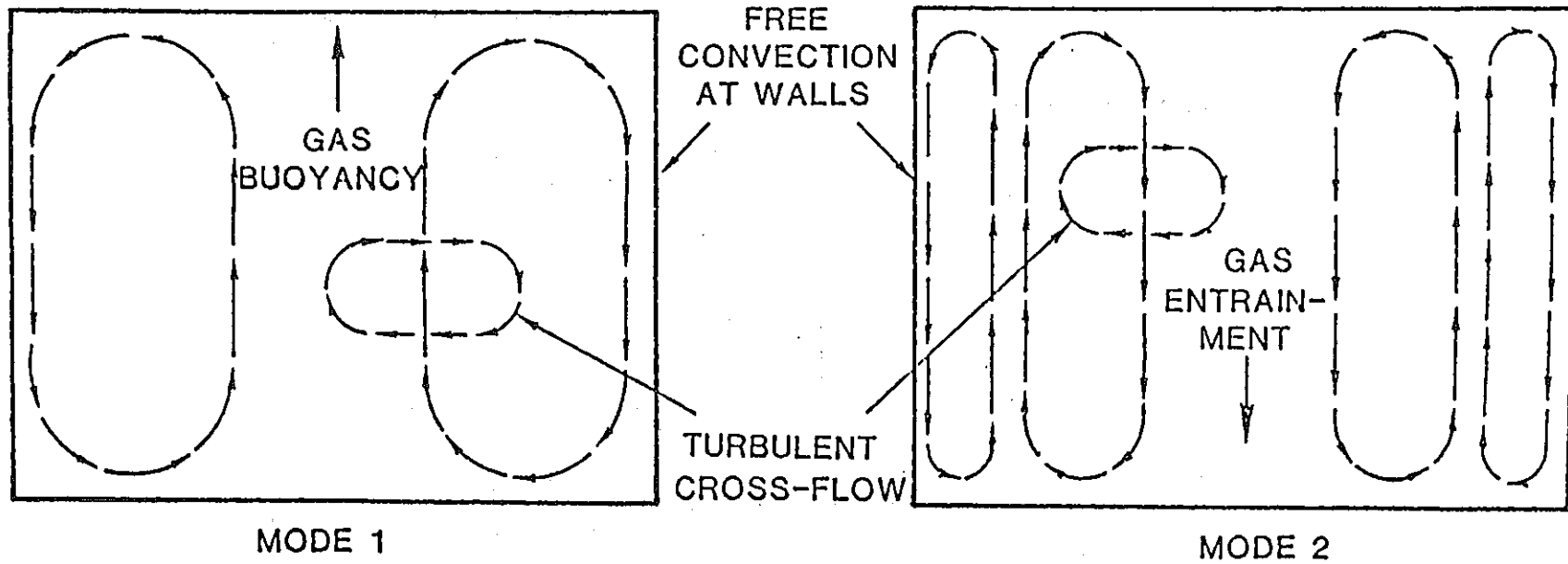


Figure II - 2 Gas Convection Model for Cell

容器内のガス対流モデル

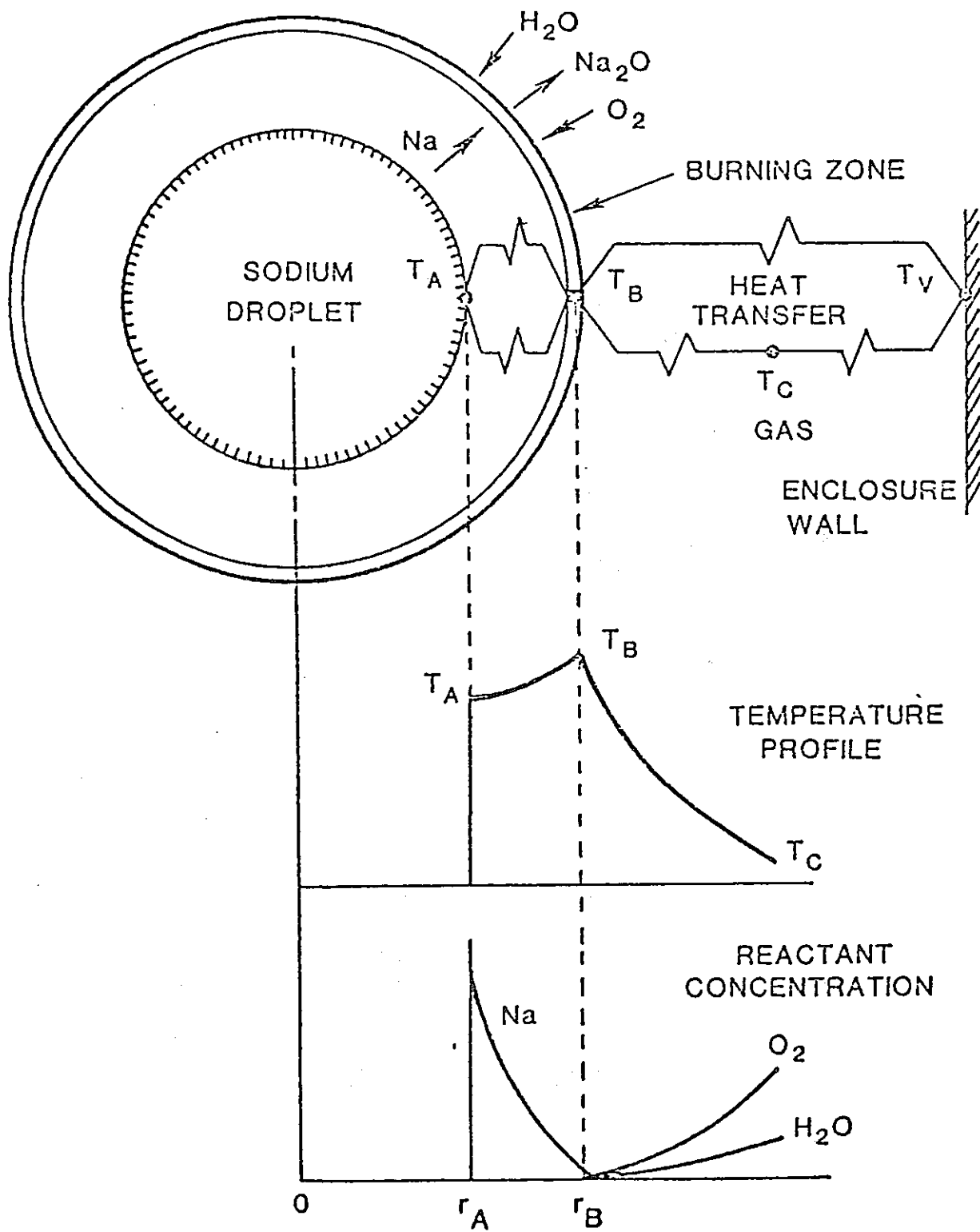


Figure II - 3 Reaction Model for Sodium Droplet

ナトリウム液滴の反応モデル

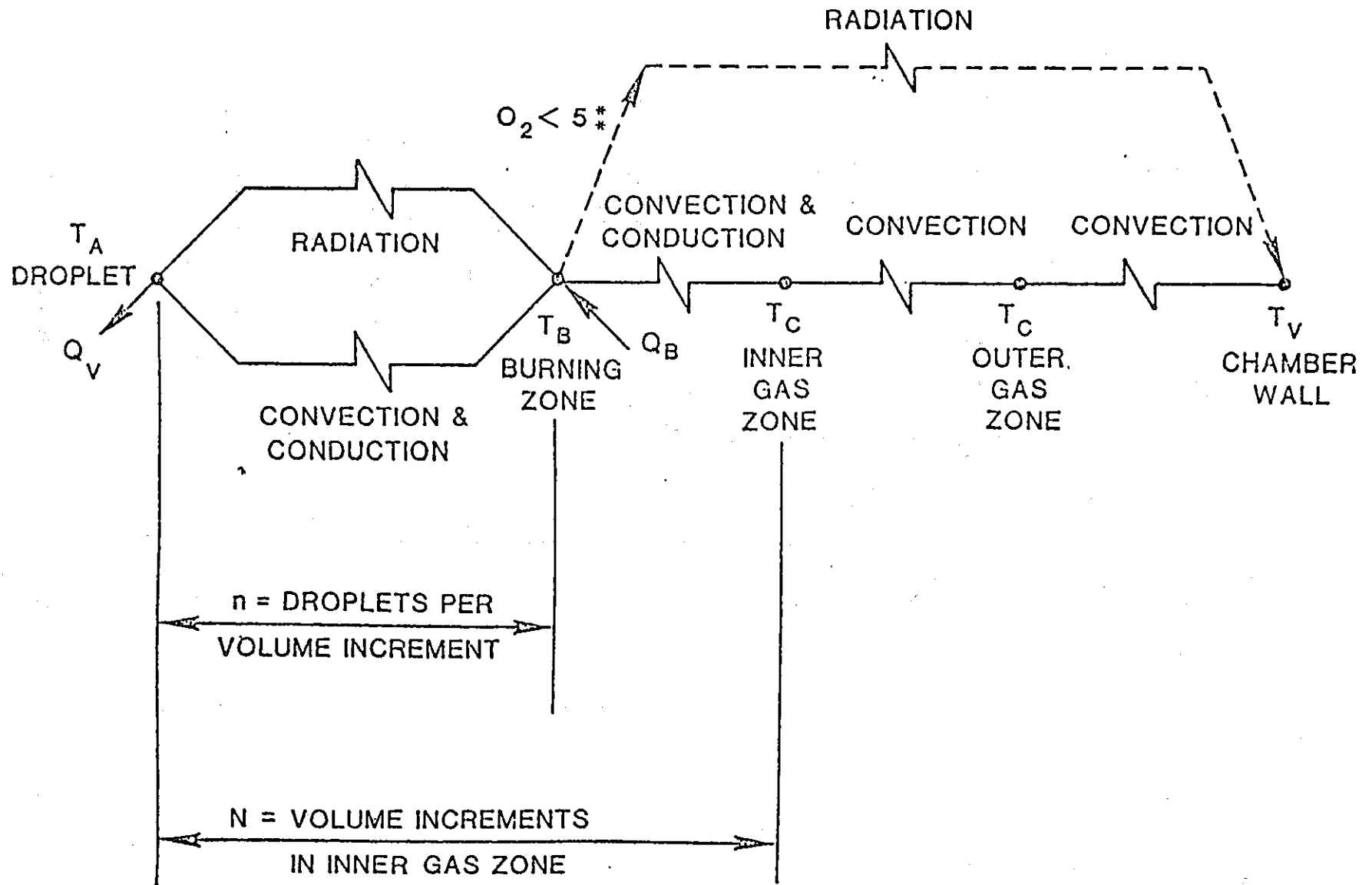


Figure II - 4 Heat Transfer Model for Sodium Droplet

ナトリウム液滴の熱移行モデル

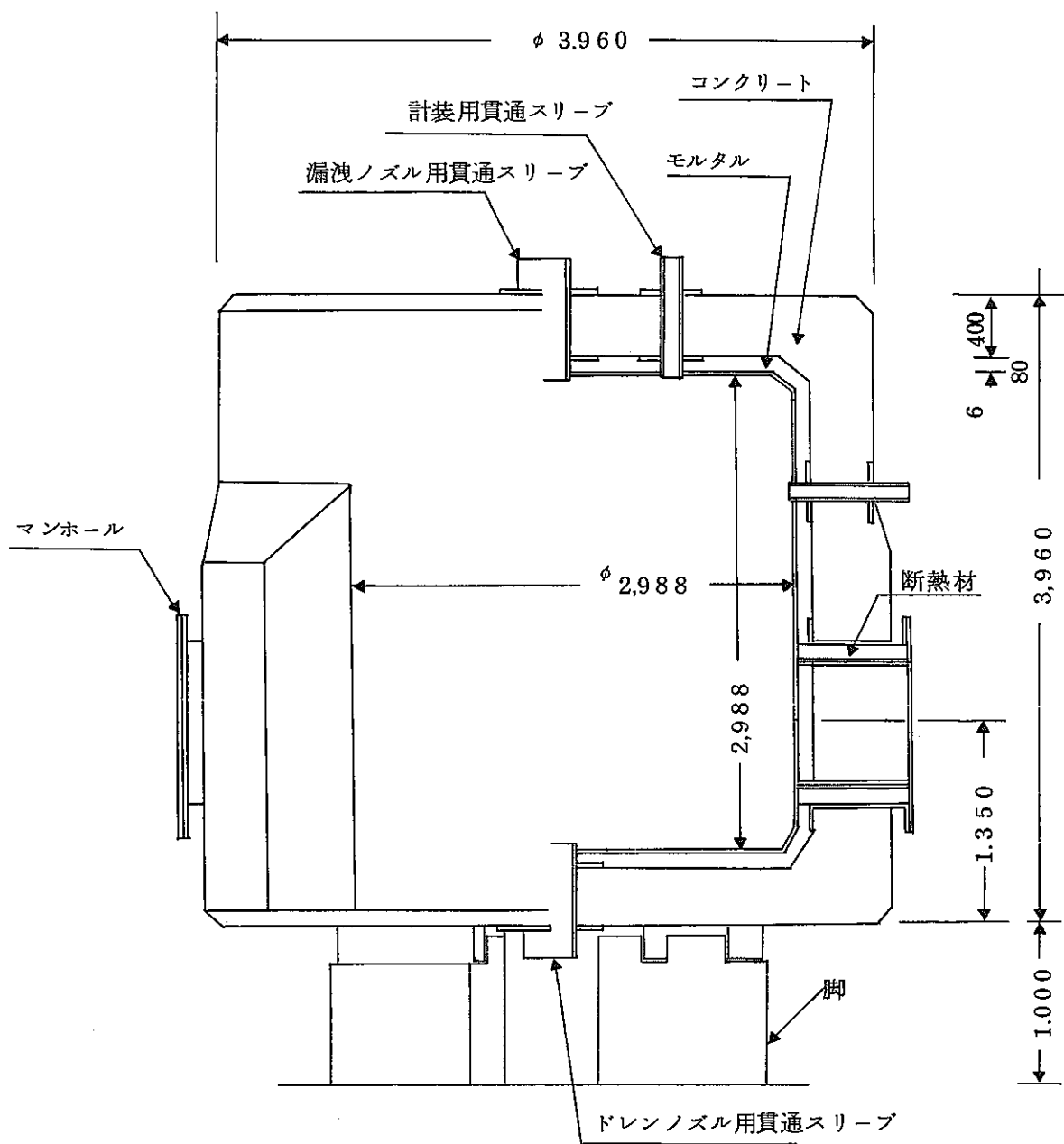


Figure III-1 Schematic Figure of Test Vessel

試験容器の概略図

(Na スプレ火災試験用)

Case(1) : ナトリウム漏洩率の効果(1)

(低酸素濃度)

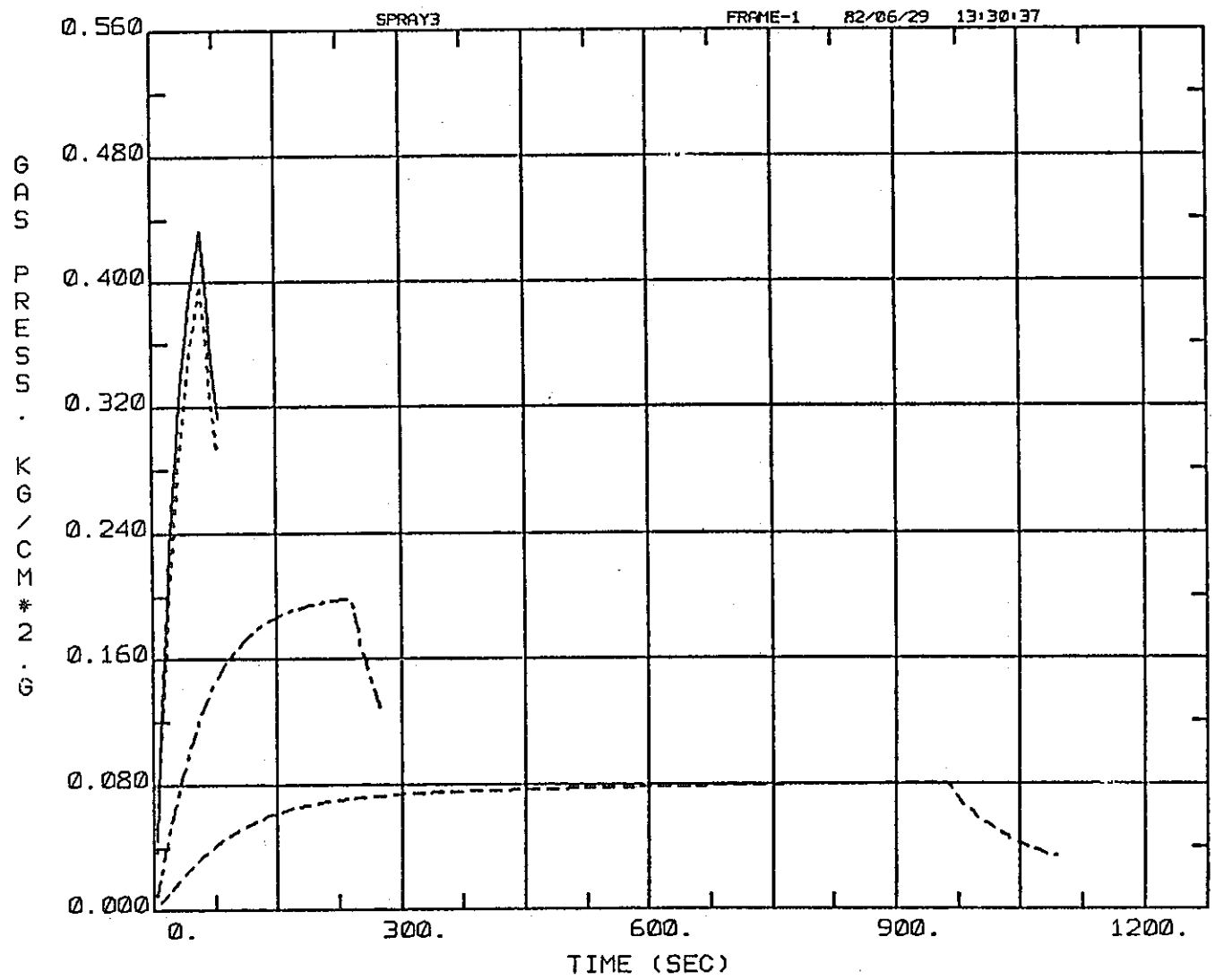


FIG.IV.1-1 TIME VS. PRESSURE CASE(1)

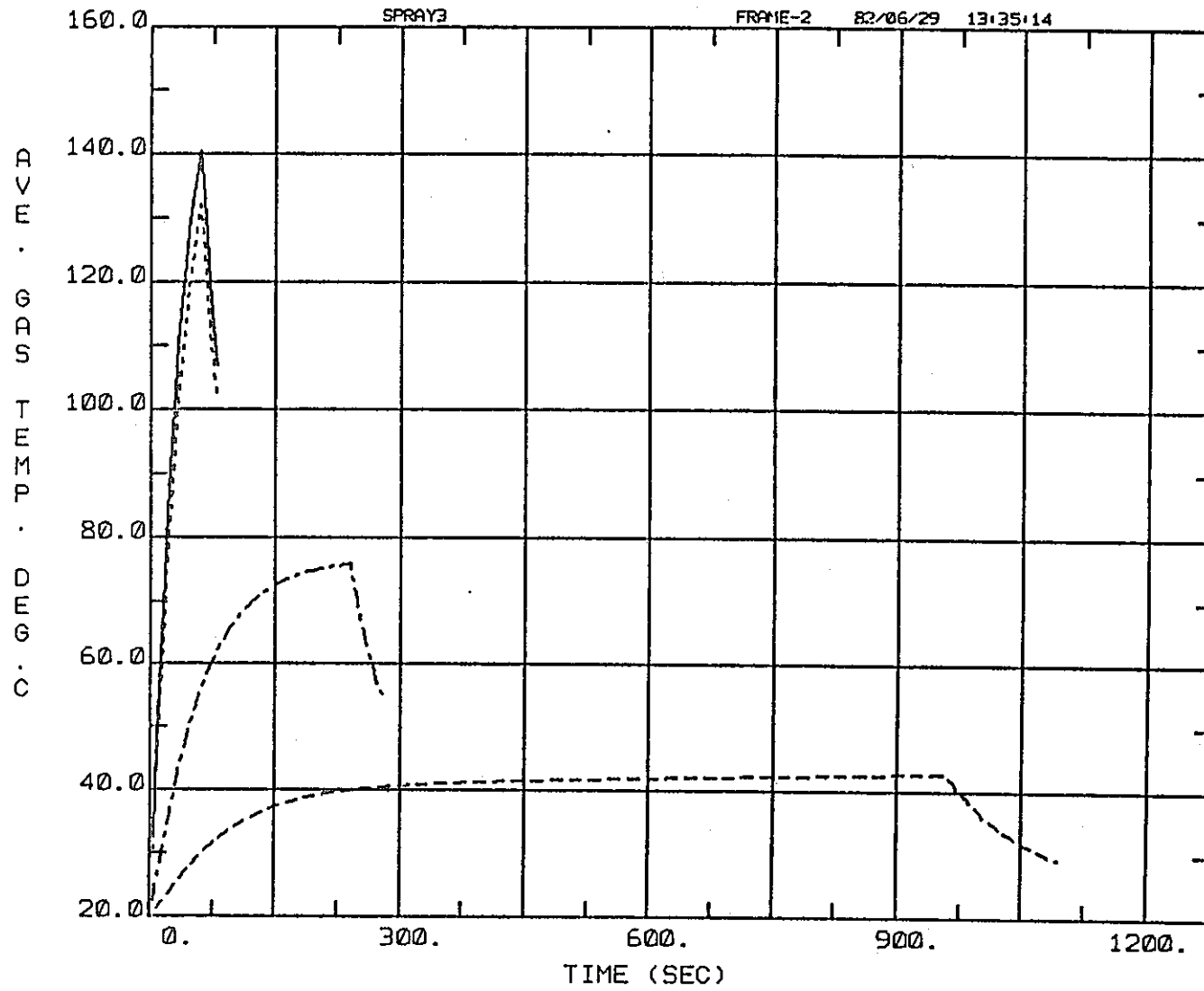


FIG.IV.1-2 TIME VS. TEMP. CASE(1)

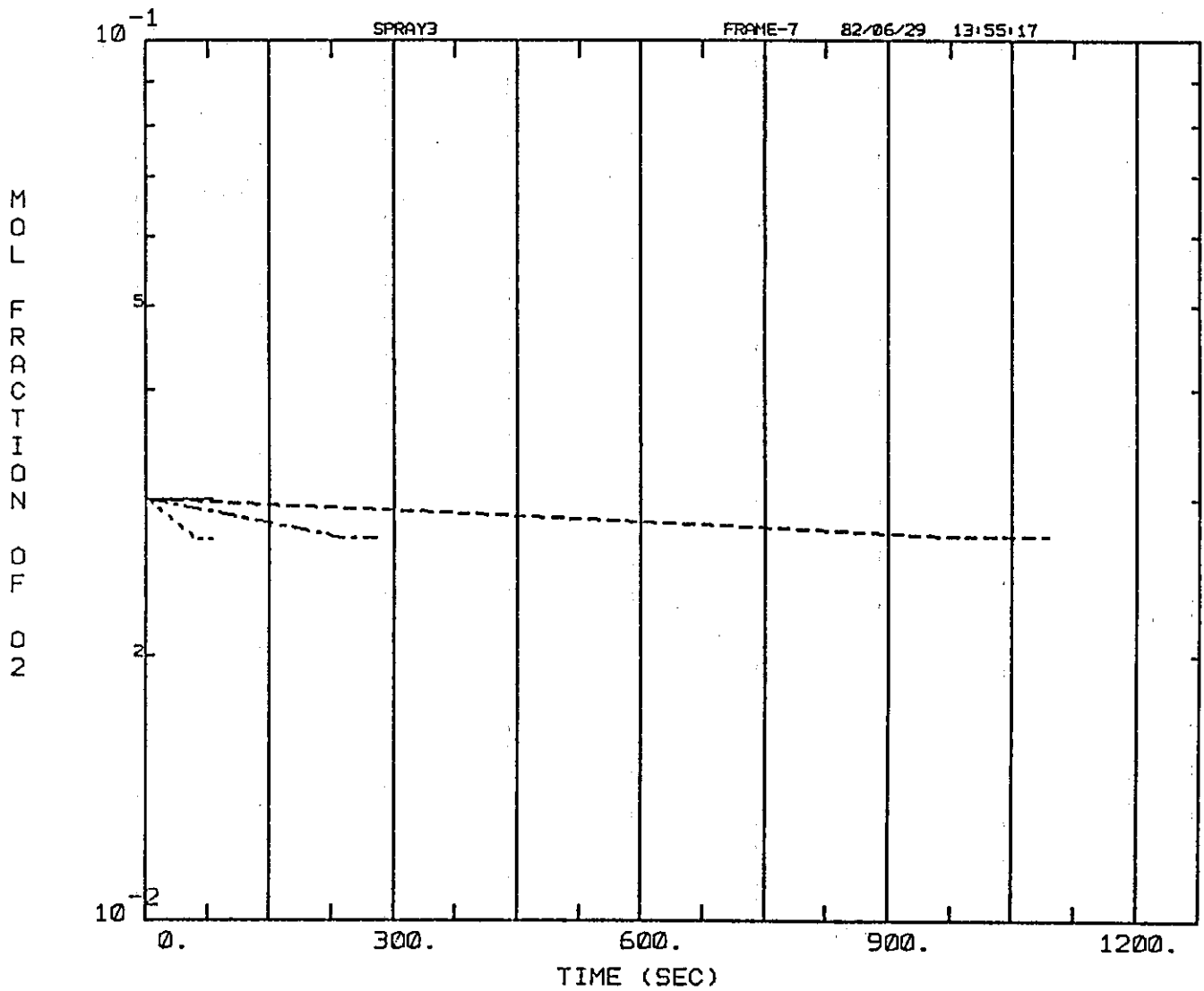


FIG.IV.1-3 TIME VS. CONCENTRATION CASE(1)

SPRAY3

FRAME-4

82/06/29

13:43:48

CONCENTRATION OF INO

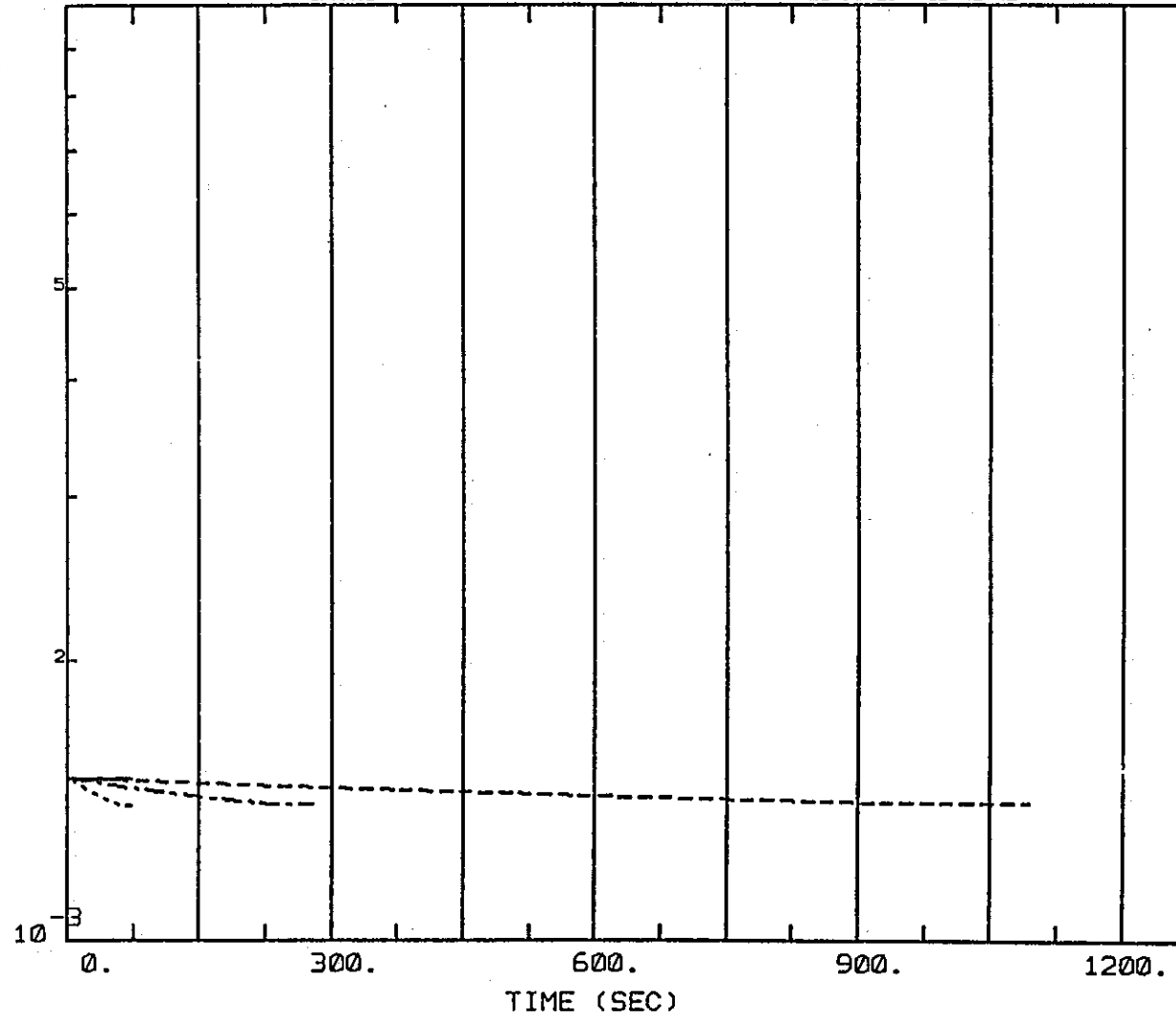


FIG. IV.1-4 TIME VS. CONCENTRATION CASE(1)

SPRAY3

FRAME-6

82/06/29

13:51:30

CONCENTRATION IN

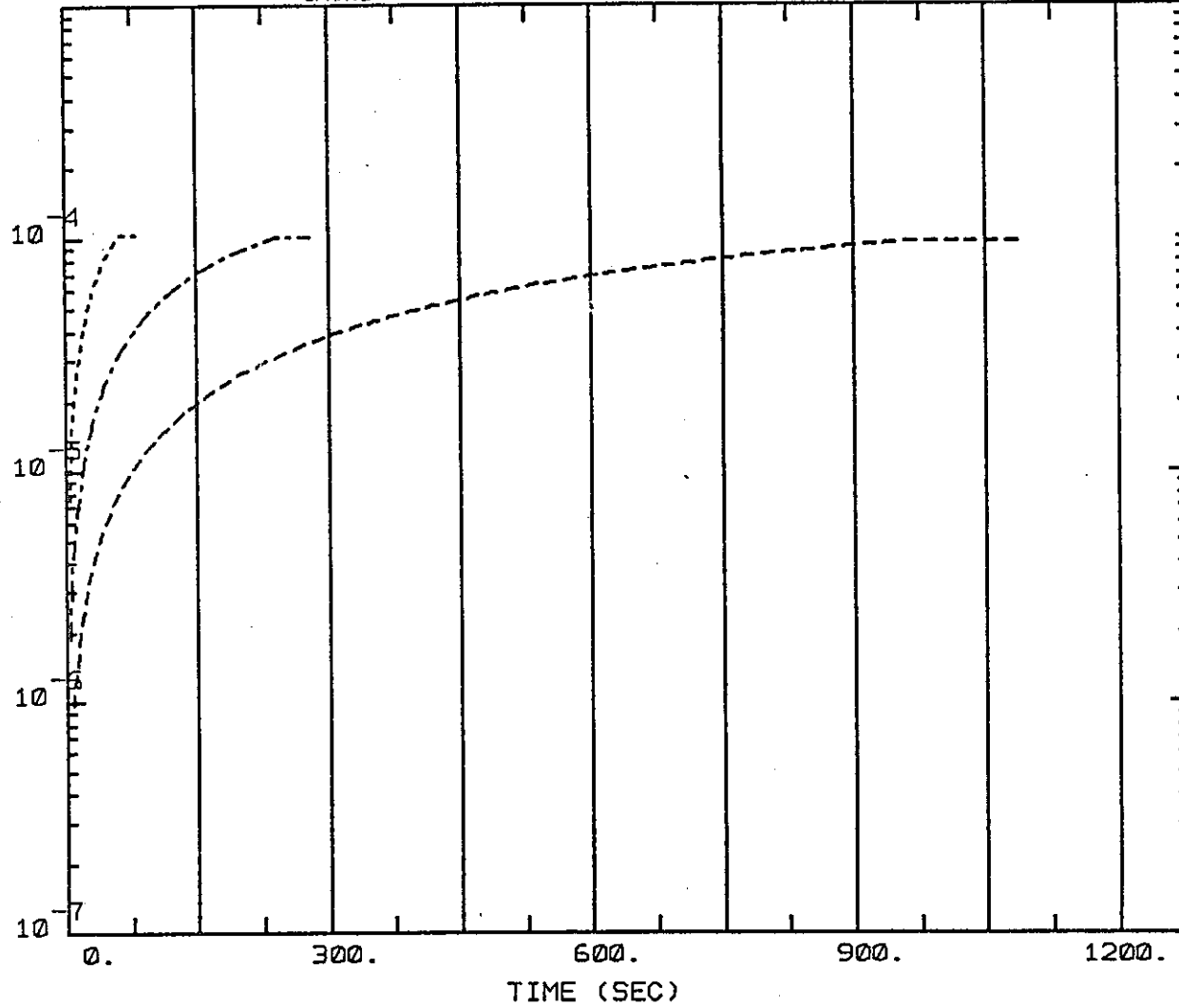


FIG.IV.1-5 TIME VS. CONCENTRATION CASE(1)

Case (2) : ナトリウム漏洩率の効果(2)

(高酸素濃度)

SPRAY3

FRAME-8

82/06/29

14:00:04

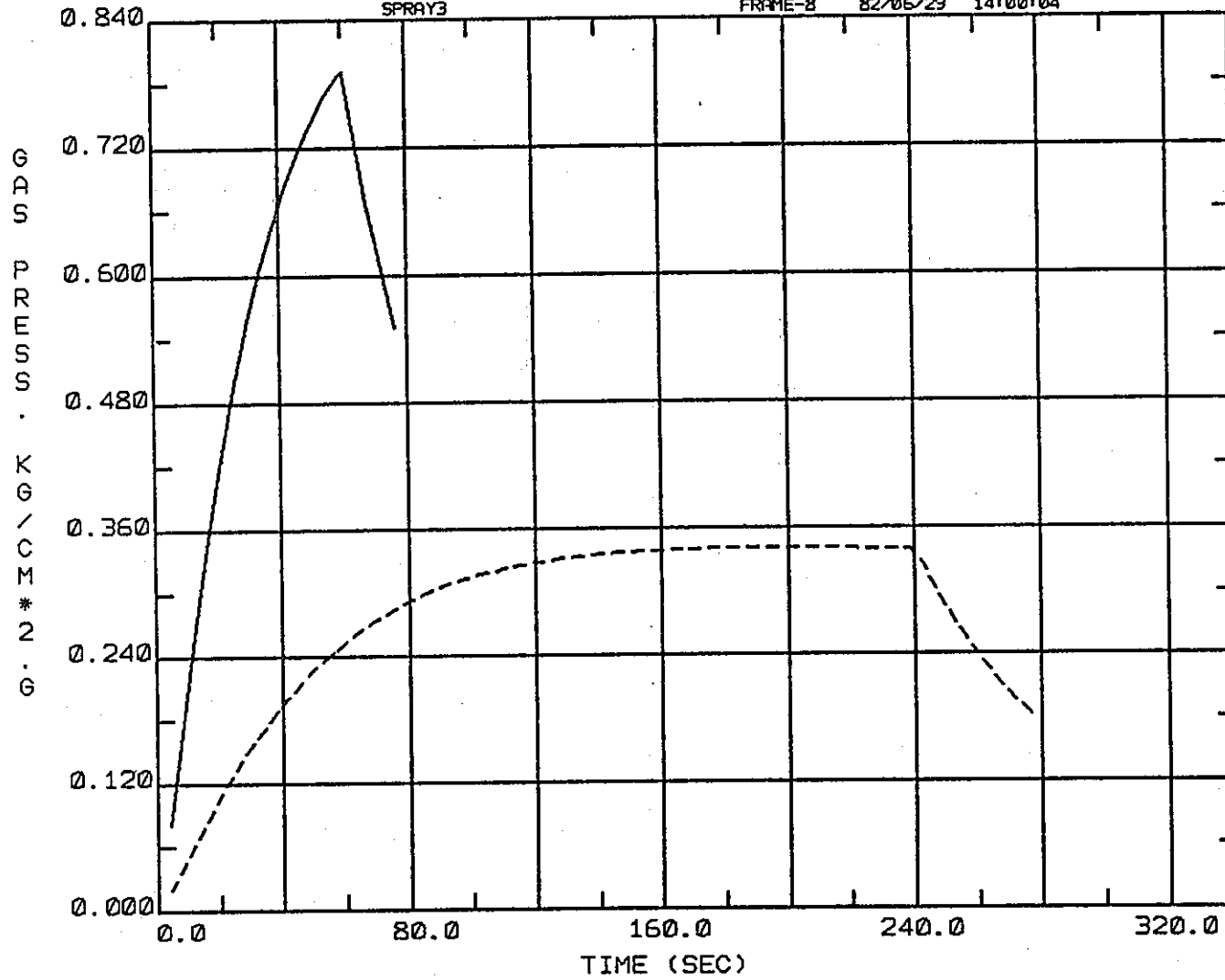


FIG. IV.2-1 TIME VS. PRESSURE CASE(2)

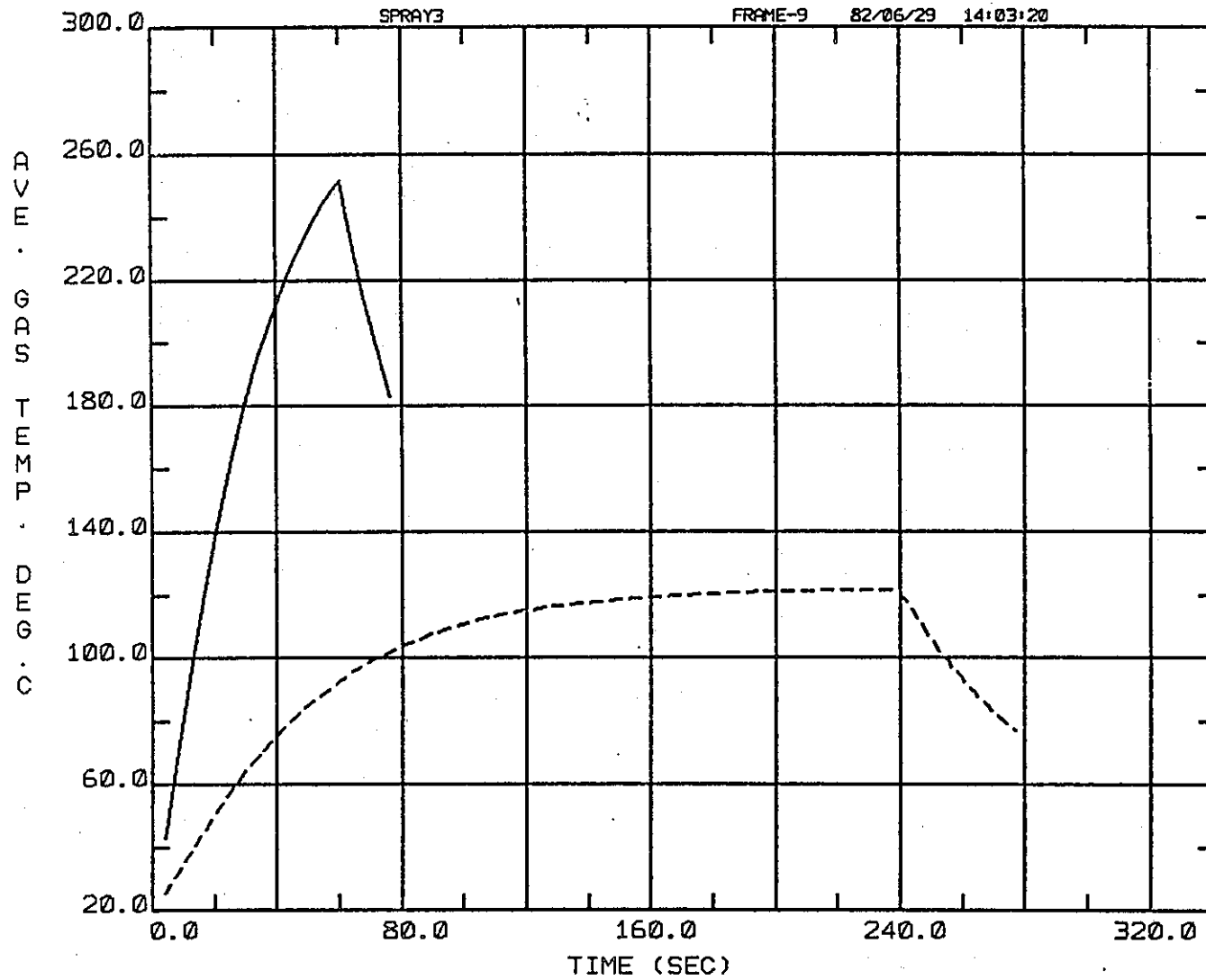


FIG.IV.2-2 TIME VS. TEMP. CASE(2)

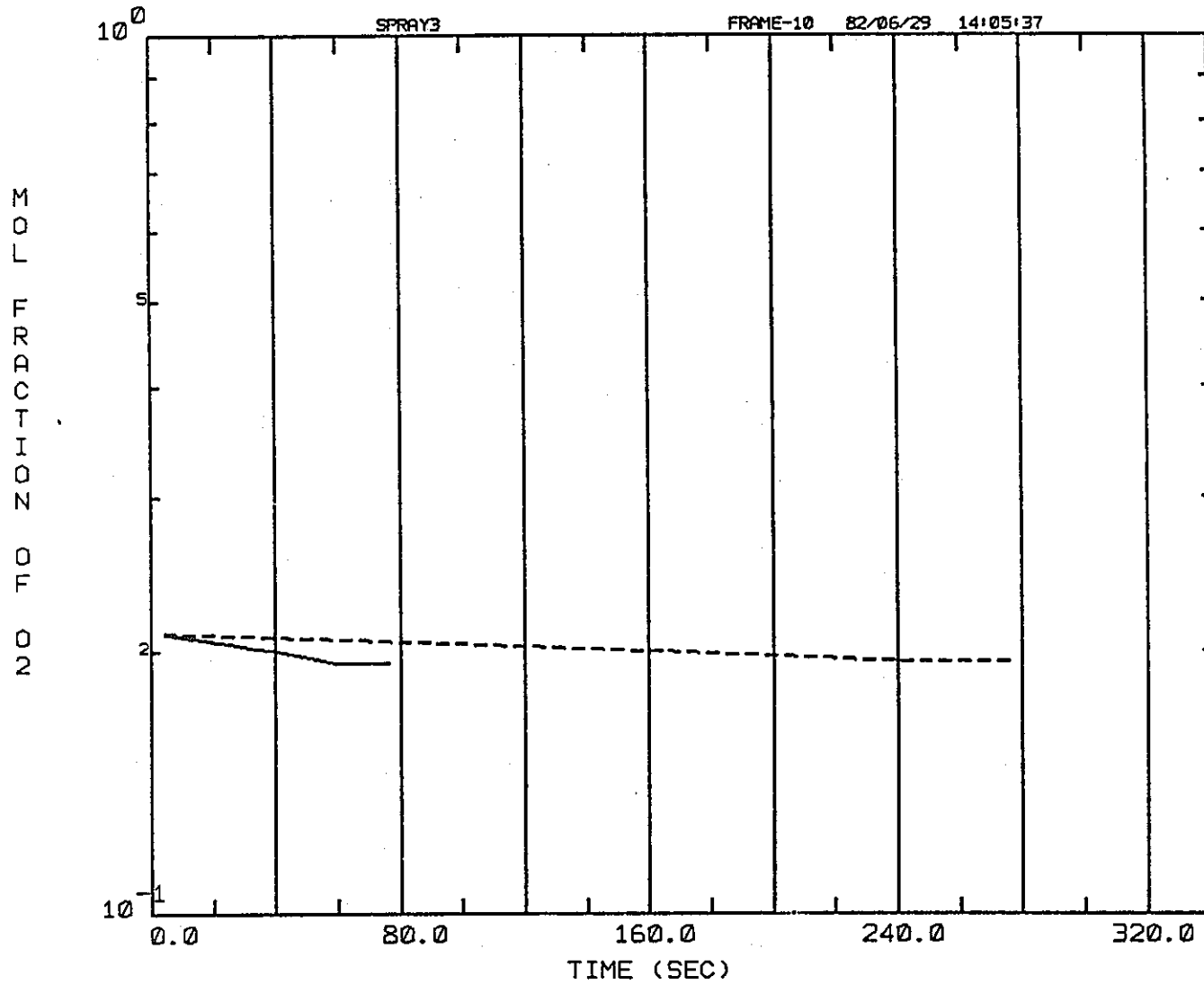


FIG. IV.2-3 TIME VS. CONCENTRATION CASE(2)

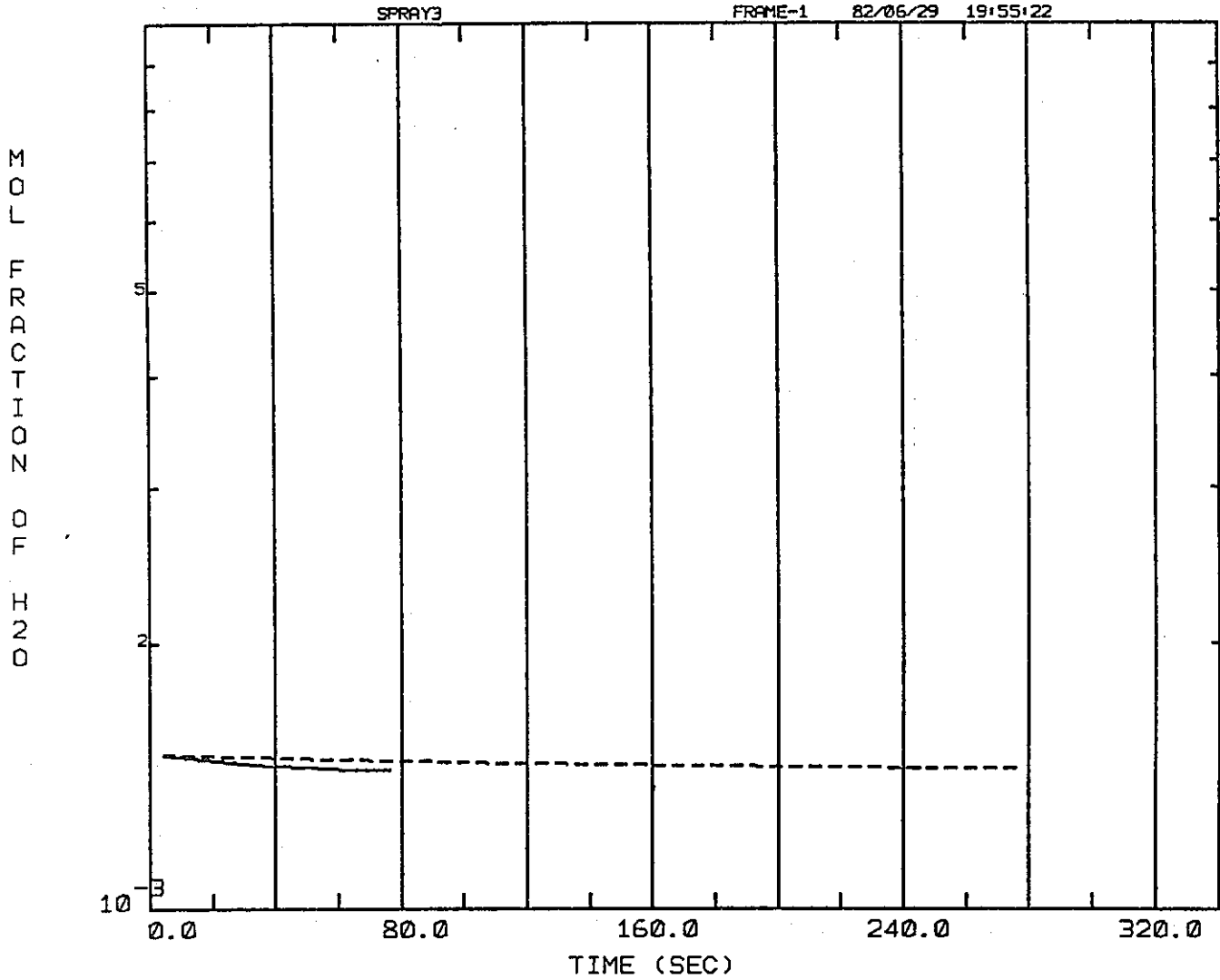


FIG. IV.2-4 TIME VS. CONCENTRATION CASE(2)

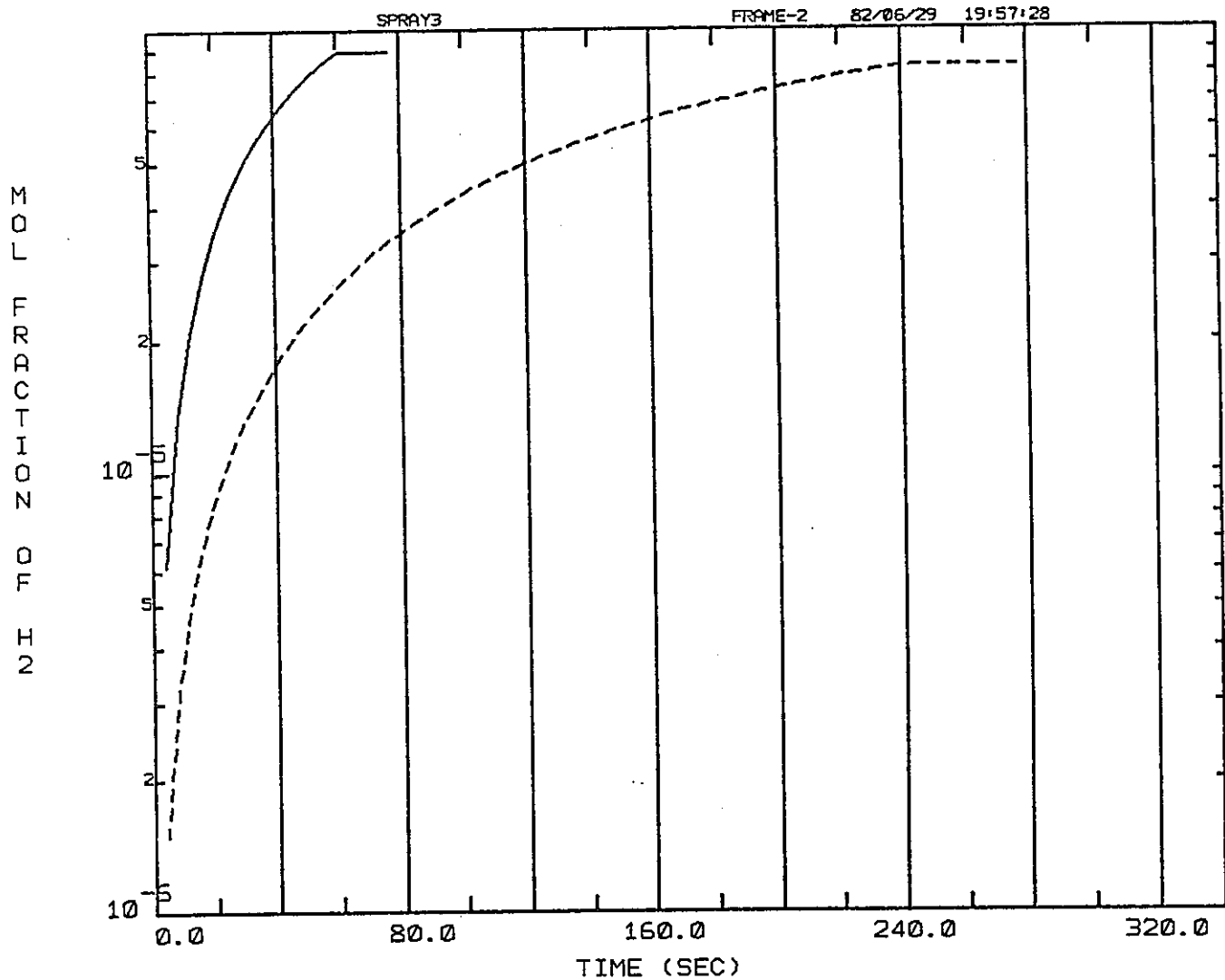


FIG. IV.2-5 TIME VS. CONCENTRATION CASE(2)

Case (3) : 初期酸素濃度の効果

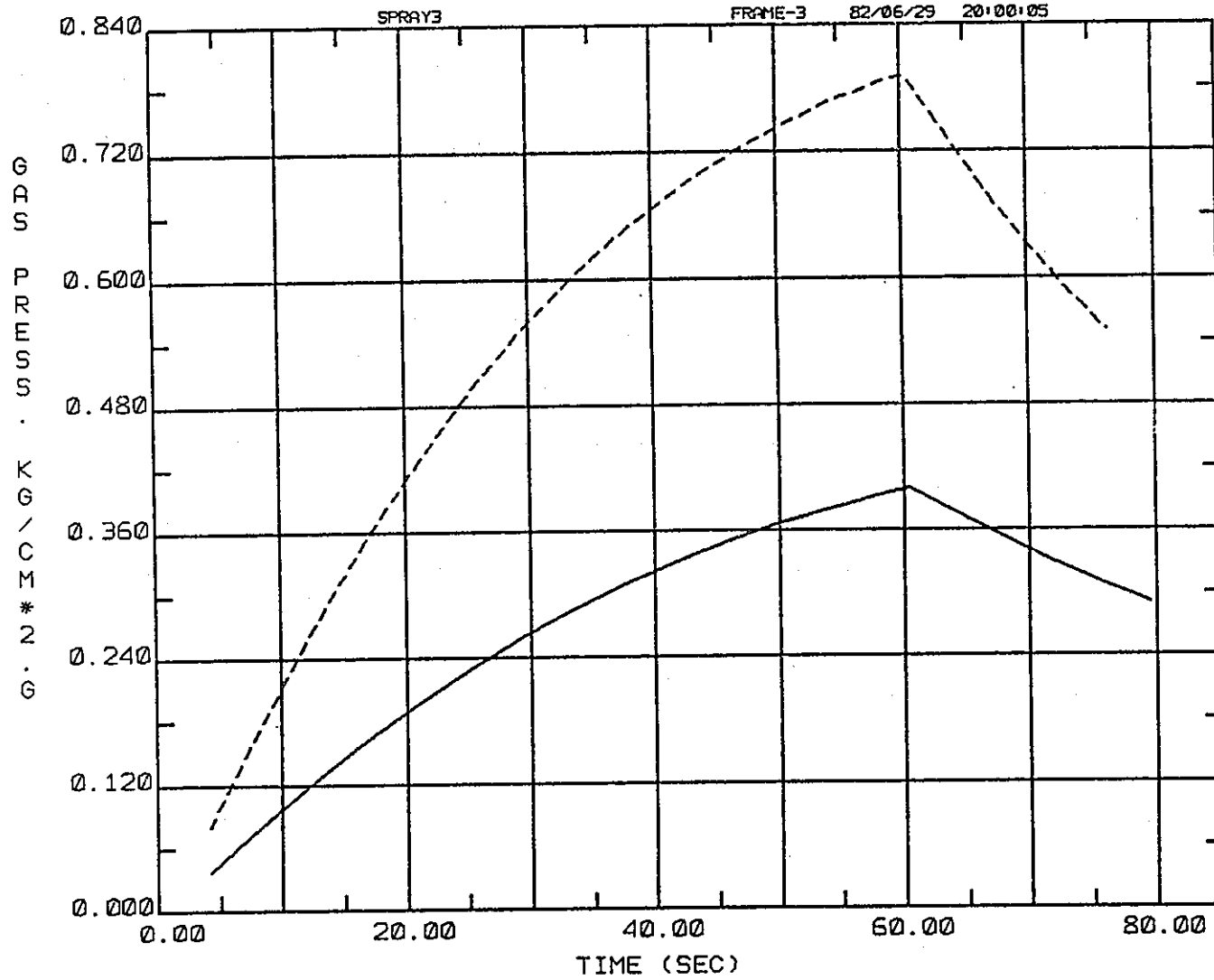


FIG.IV.3-1 TIME VS. PRESSURE CASE(3)

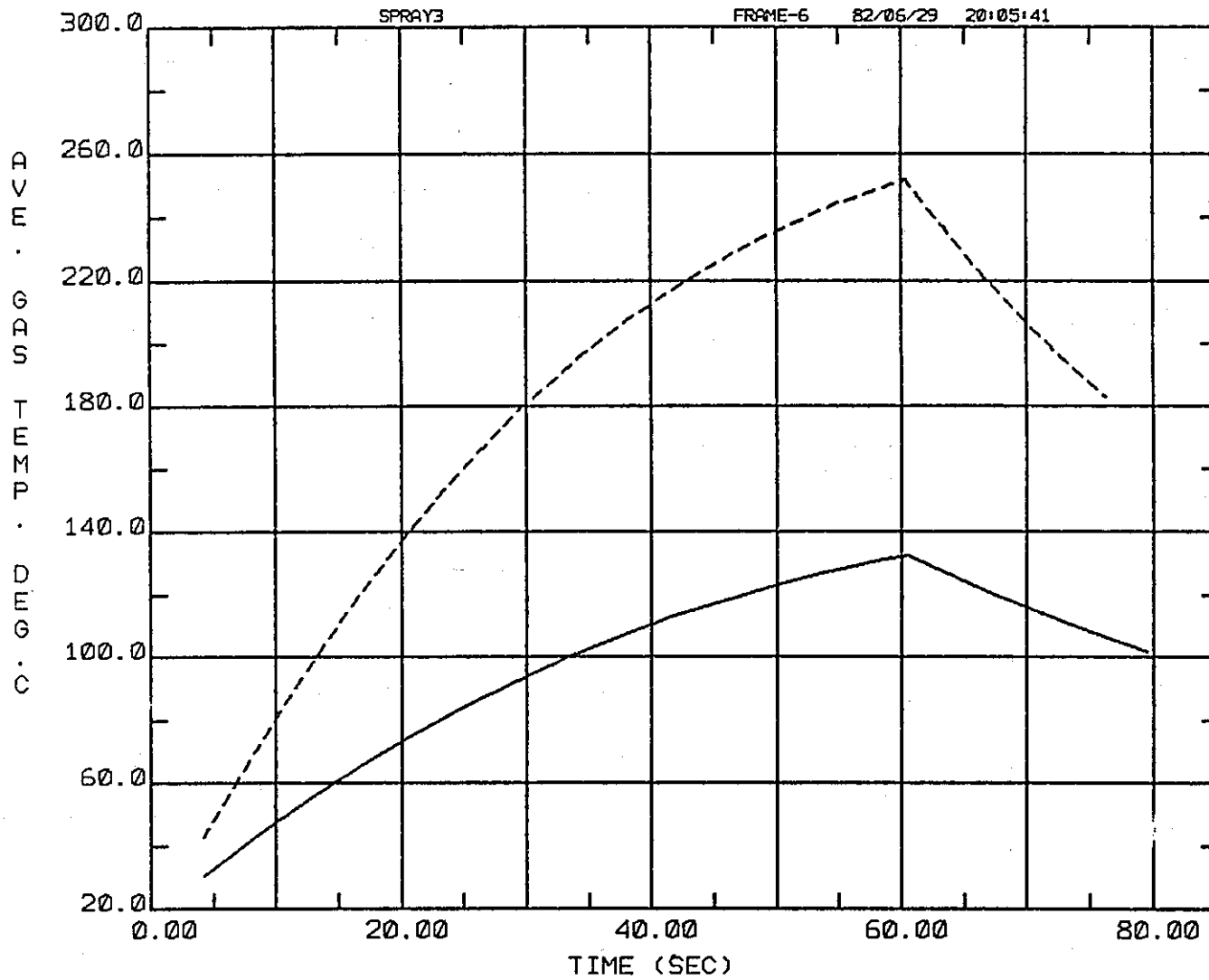


FIG.IV.3-2 TIME VS. TEMP. CASE(3)

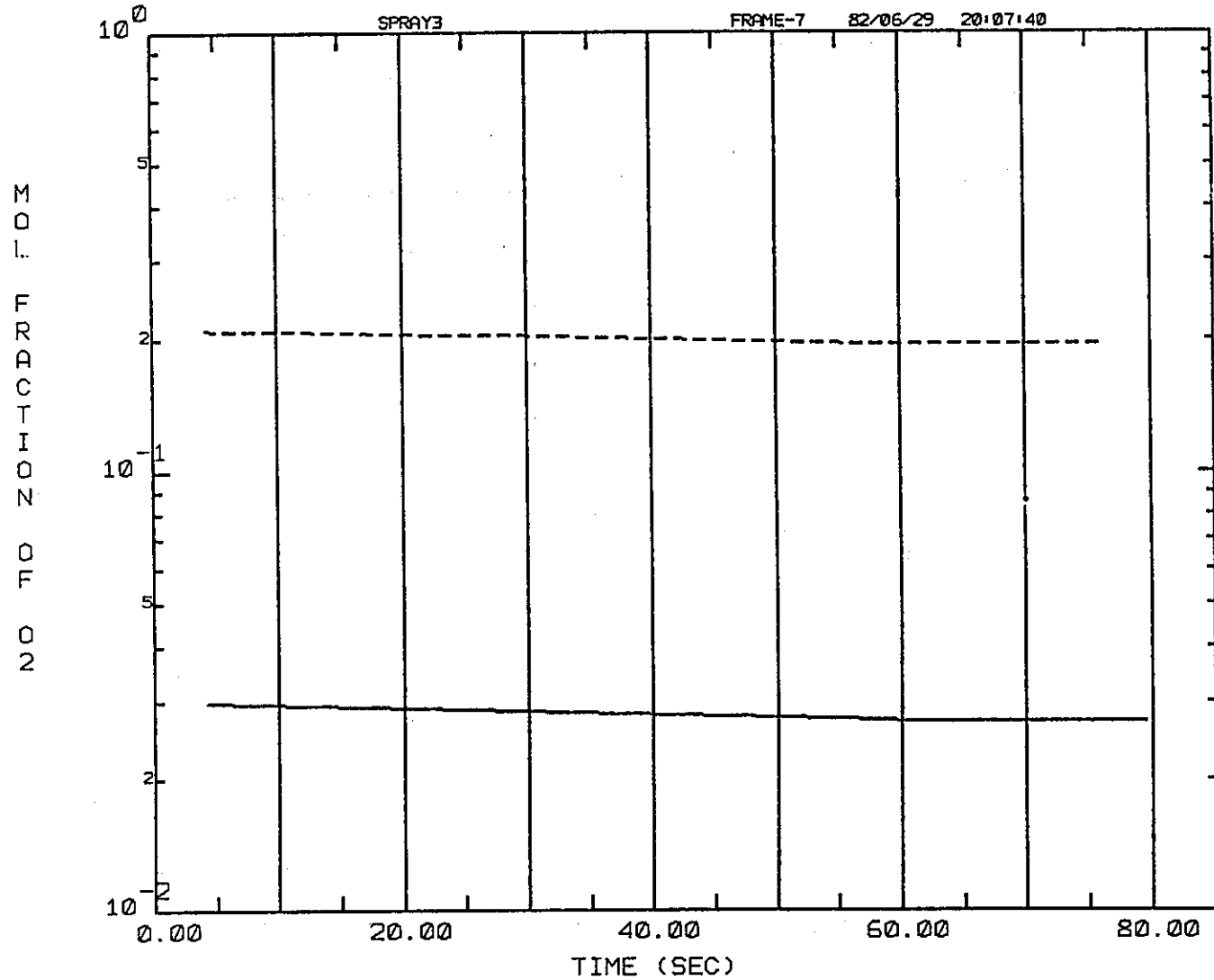


FIG. IV.3-3 TIME VS. CONCENTRATION CASE(3)

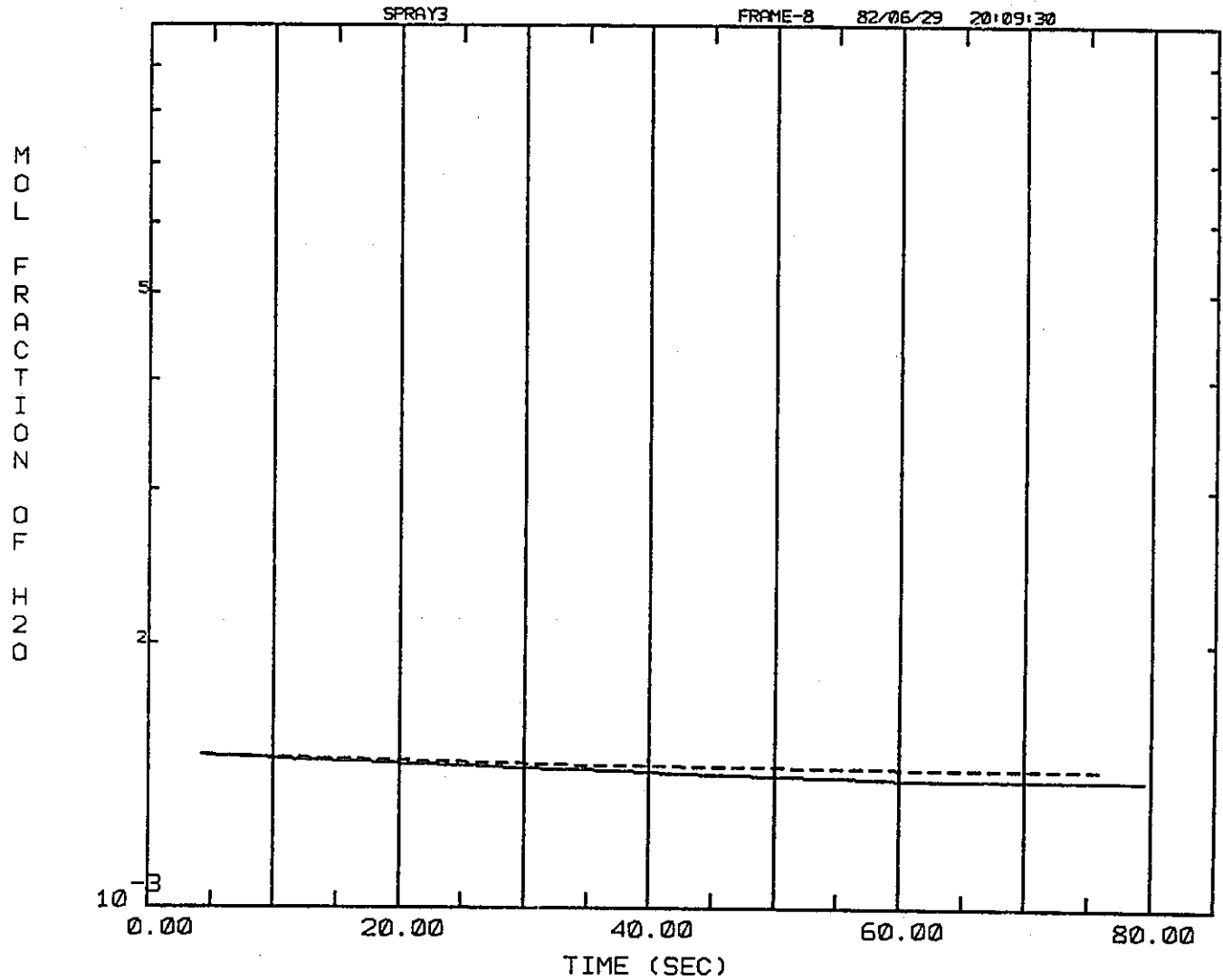


FIG. IV.3-4 TIME VS. CONCENTRATION CASE(3)

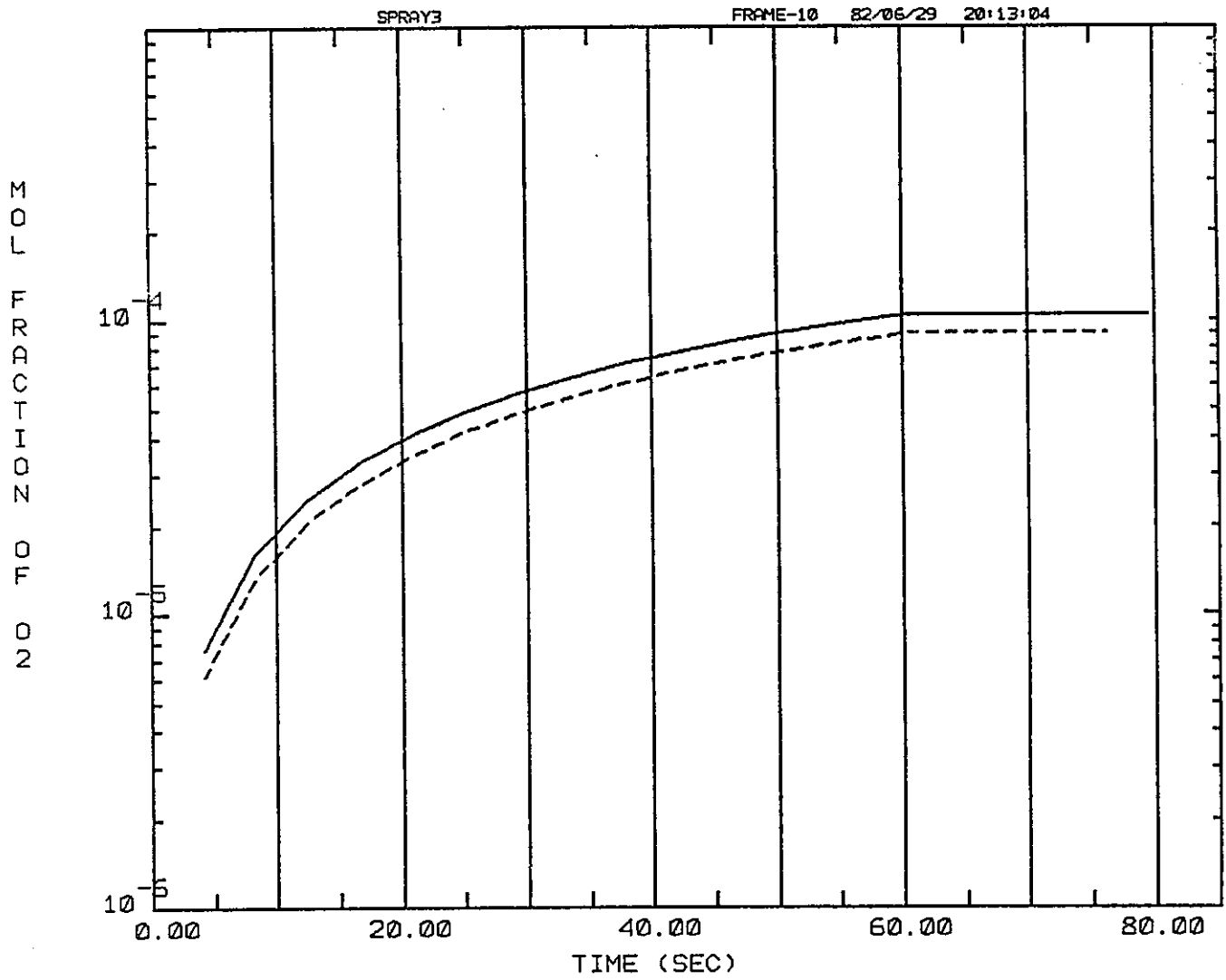


FIG. IV.3-5 TIME VS. CONCENTRATION CASE(3)

Case (4) : 初期酸素濃度及びナトリウム温度の効果

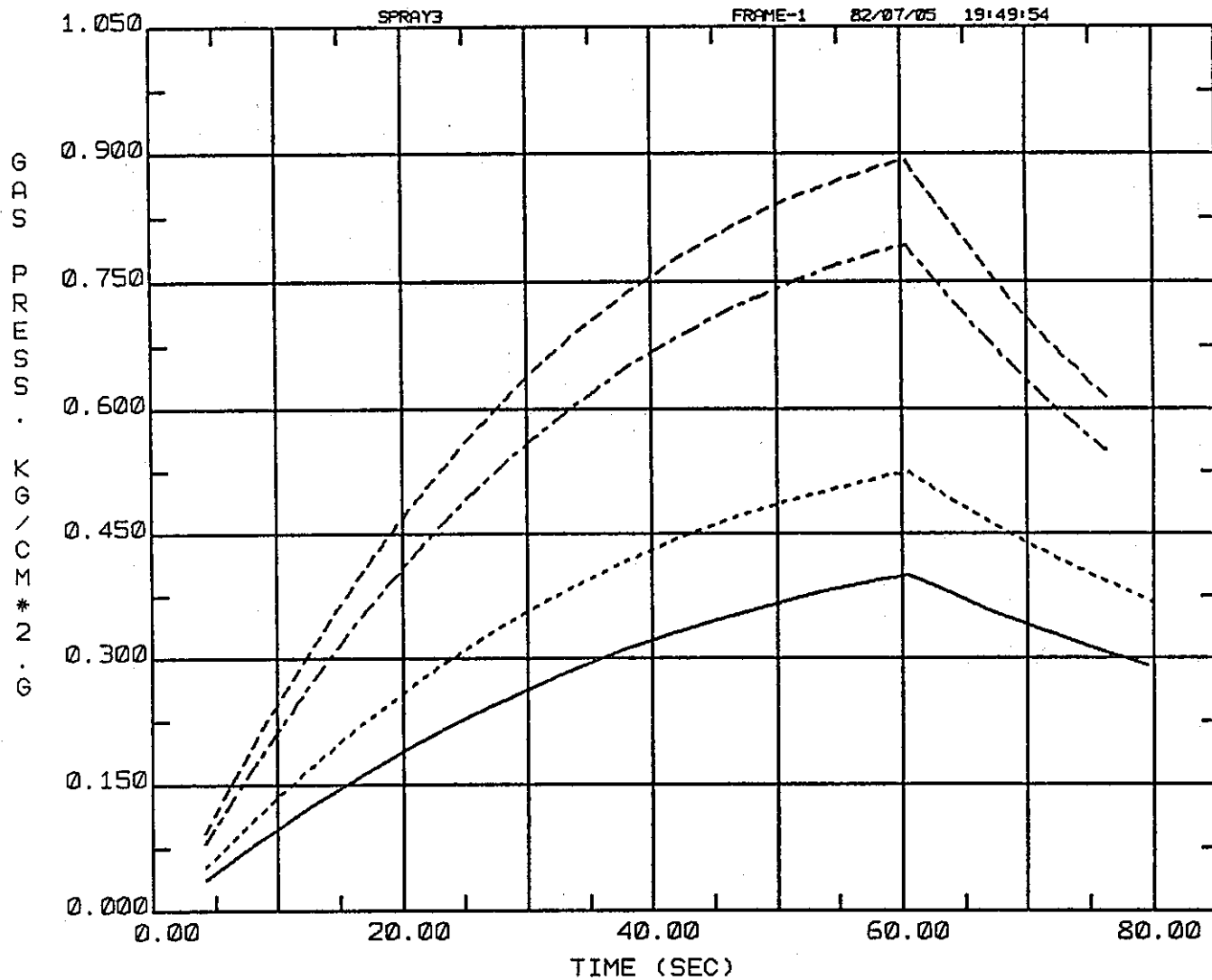


FIG.IV.4-1 TIME VS. PRESSURE CASE(4)

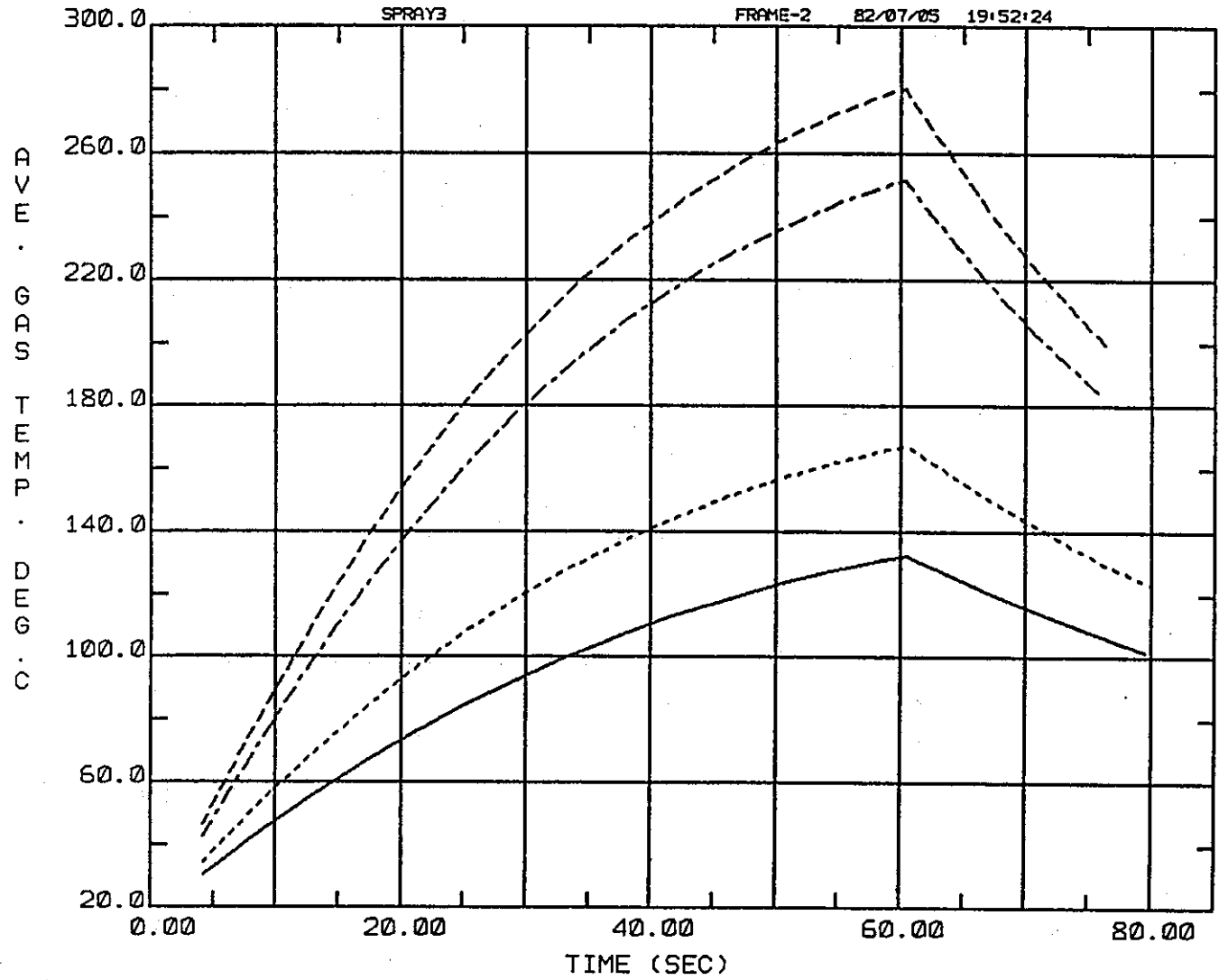


FIG. IV. 4-2 TIME VS. TEMP. CASE(4)

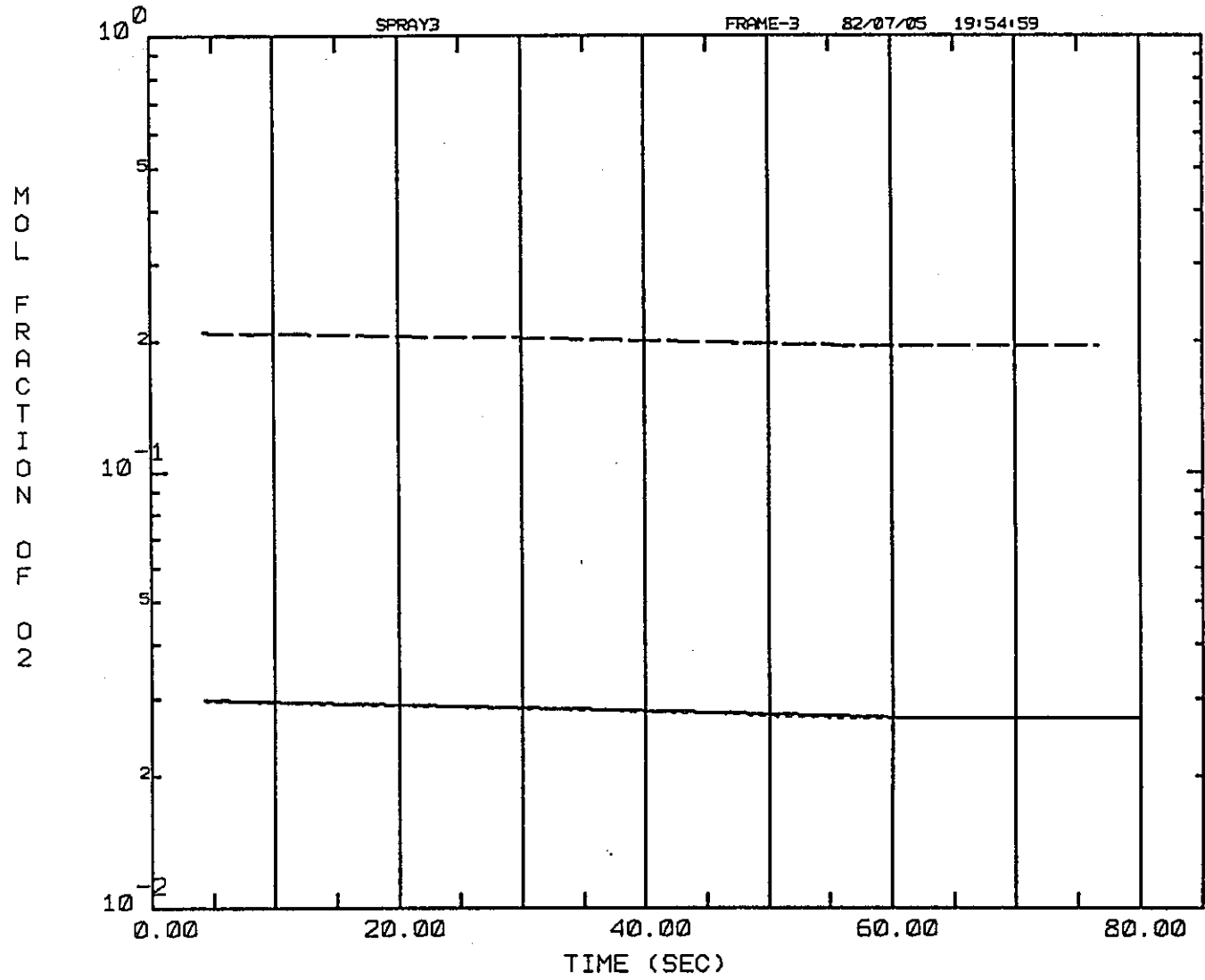


FIG. IV.4-3 TIME VS. CONCENTRATION CASE(4)

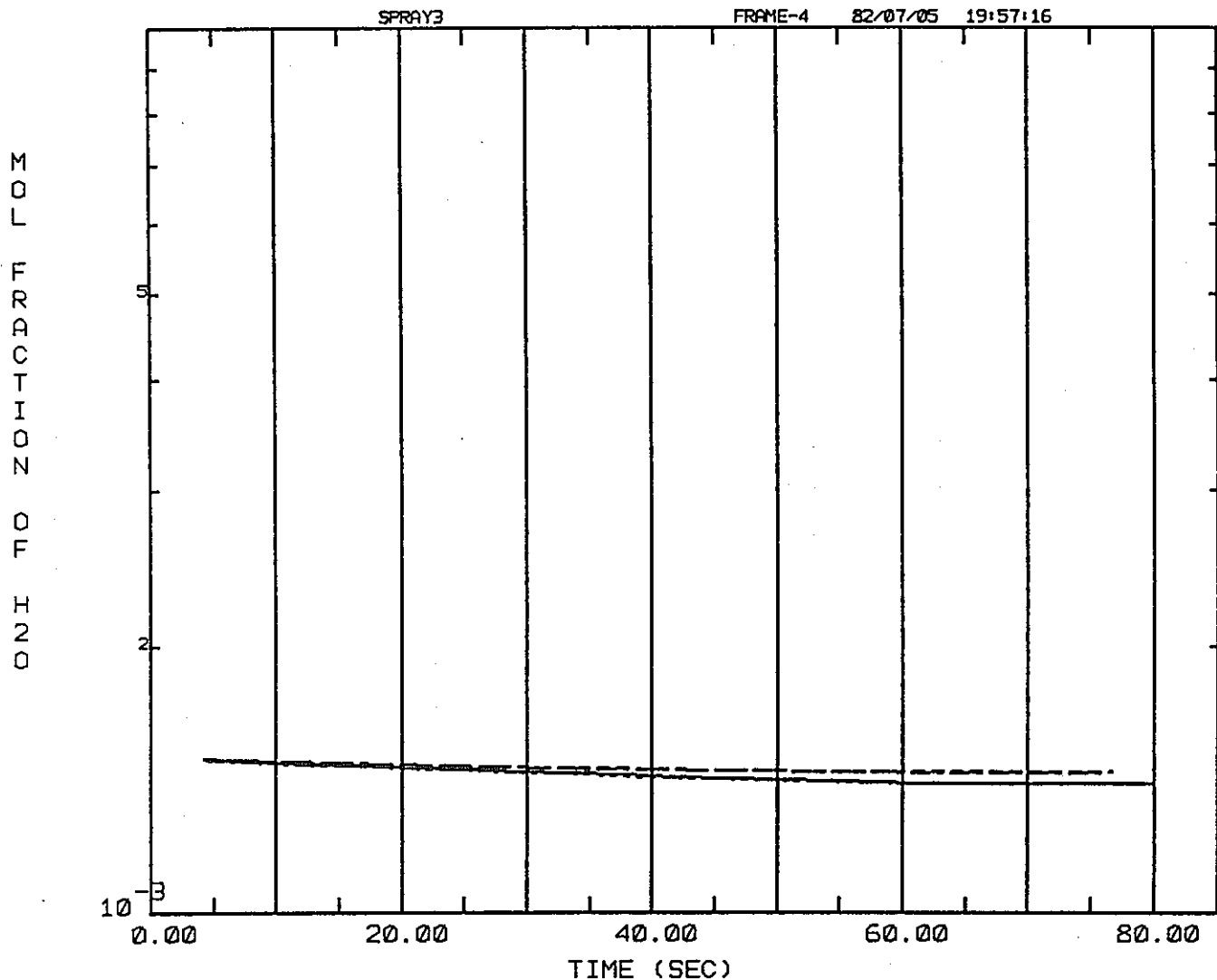


FIG.IV.4-4 TIME VS. CONCENTRATION CASE(4)

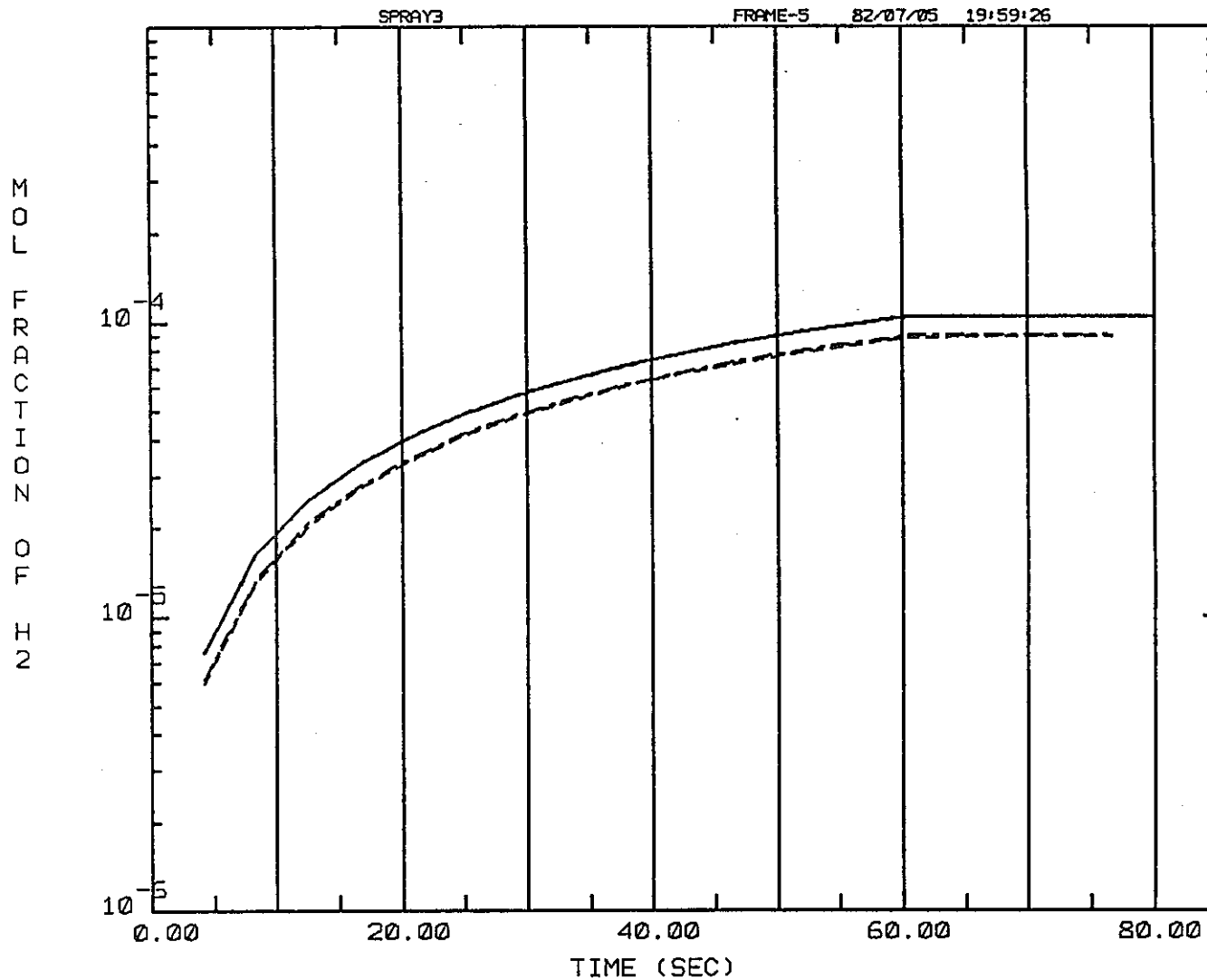


FIG. IV.4-5 TIME VS. CONCENTRATION CASE(4)

Case (5) : ナトリウム漏洩率の効果(3)
(スプレー拡がり角一定)

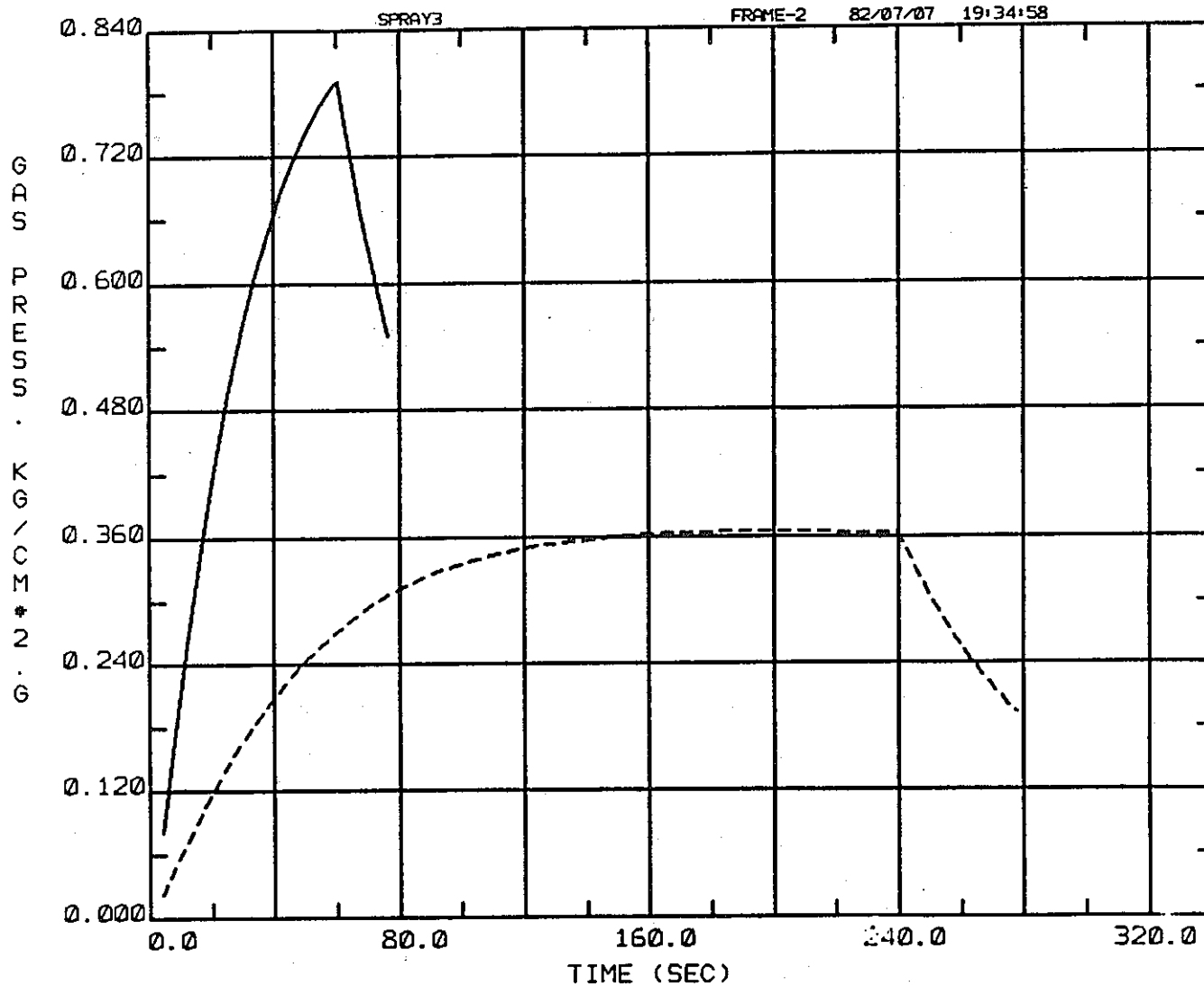


FIG. IV.5-1 TIME VS. PRESSURE CASE(5)

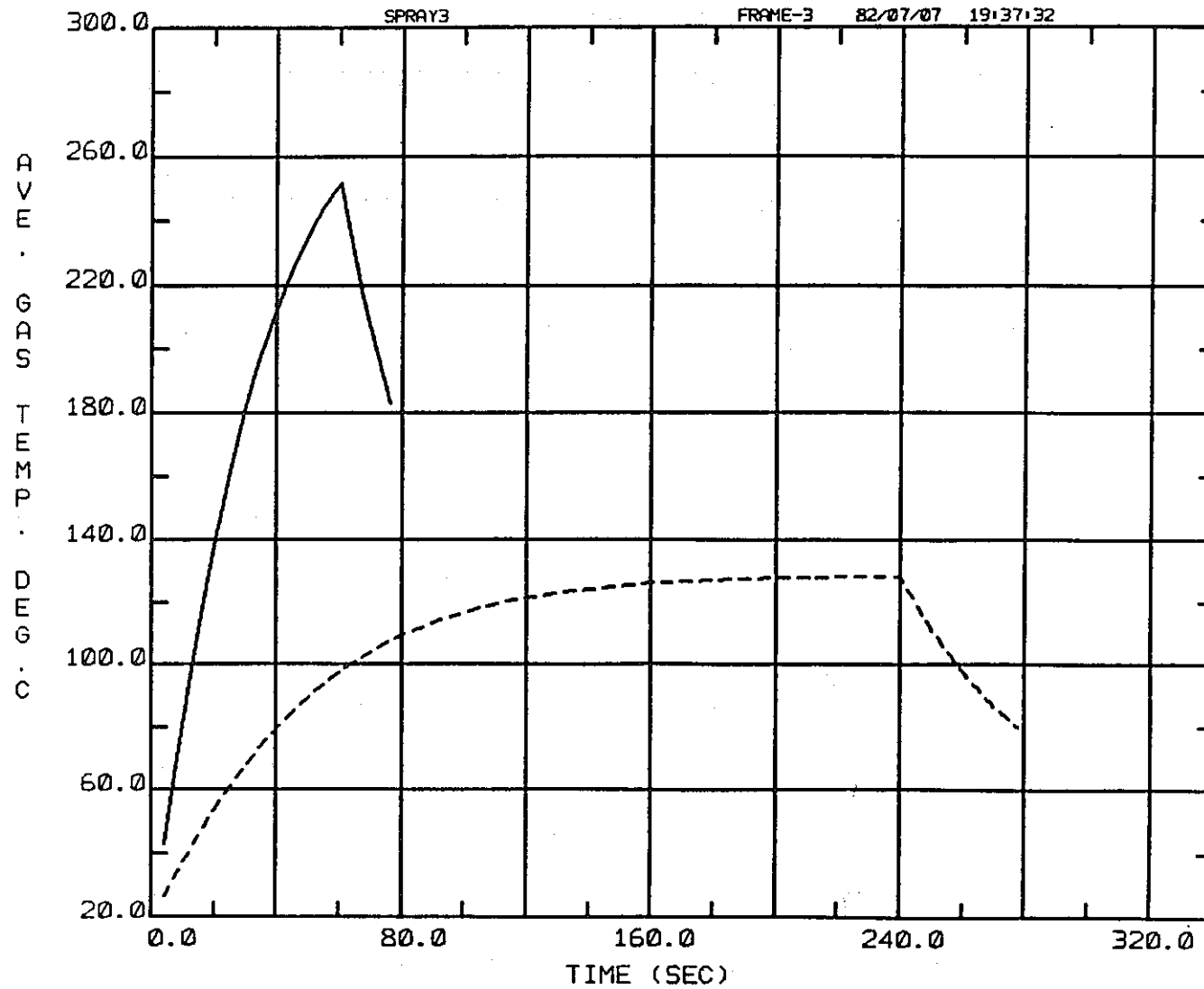


FIG. IV.5-2 TIME VS. TEMP. CASE(5)

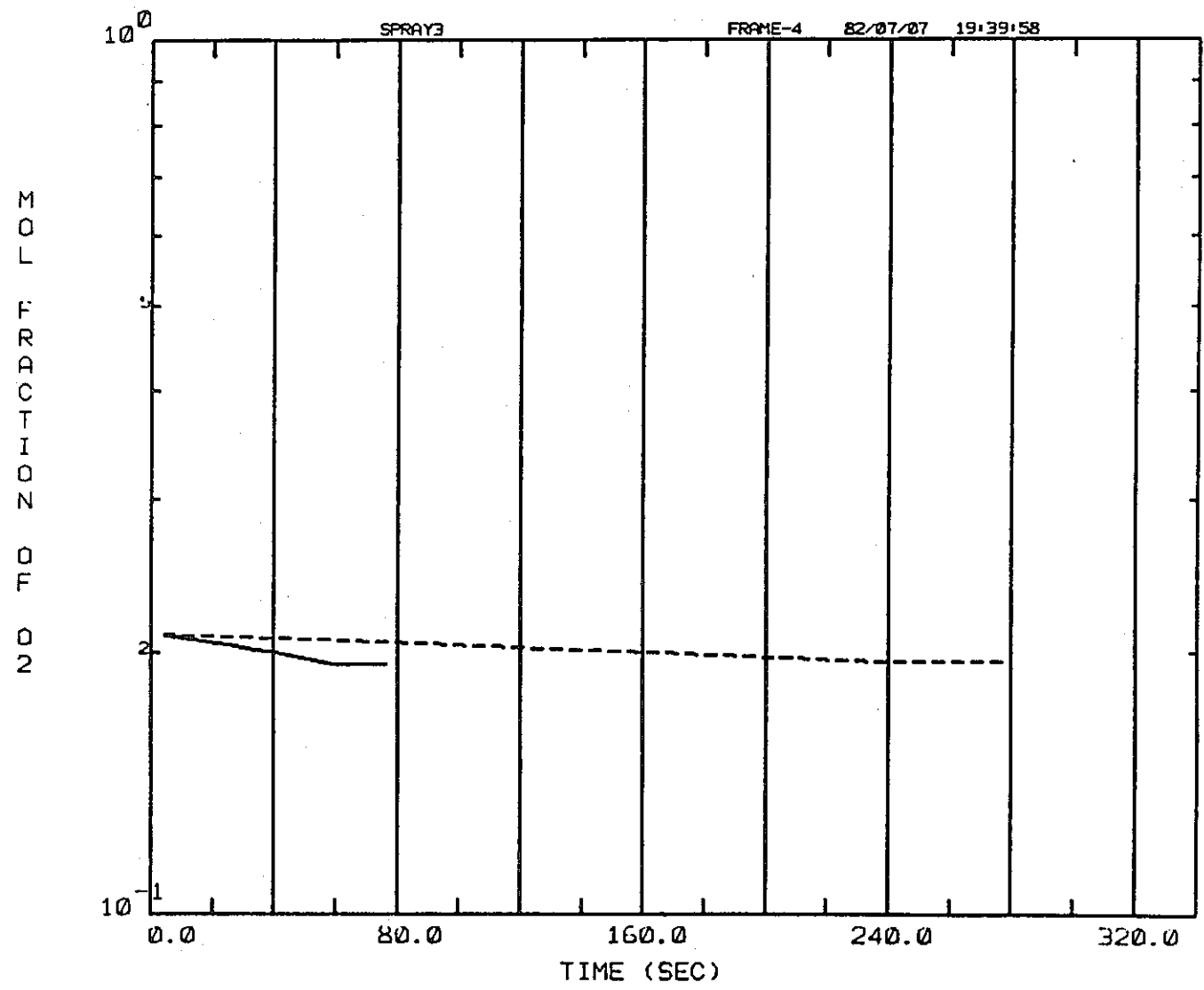


FIG. IV.5-3 TIME VS. CONCENTRATION CASE(5)

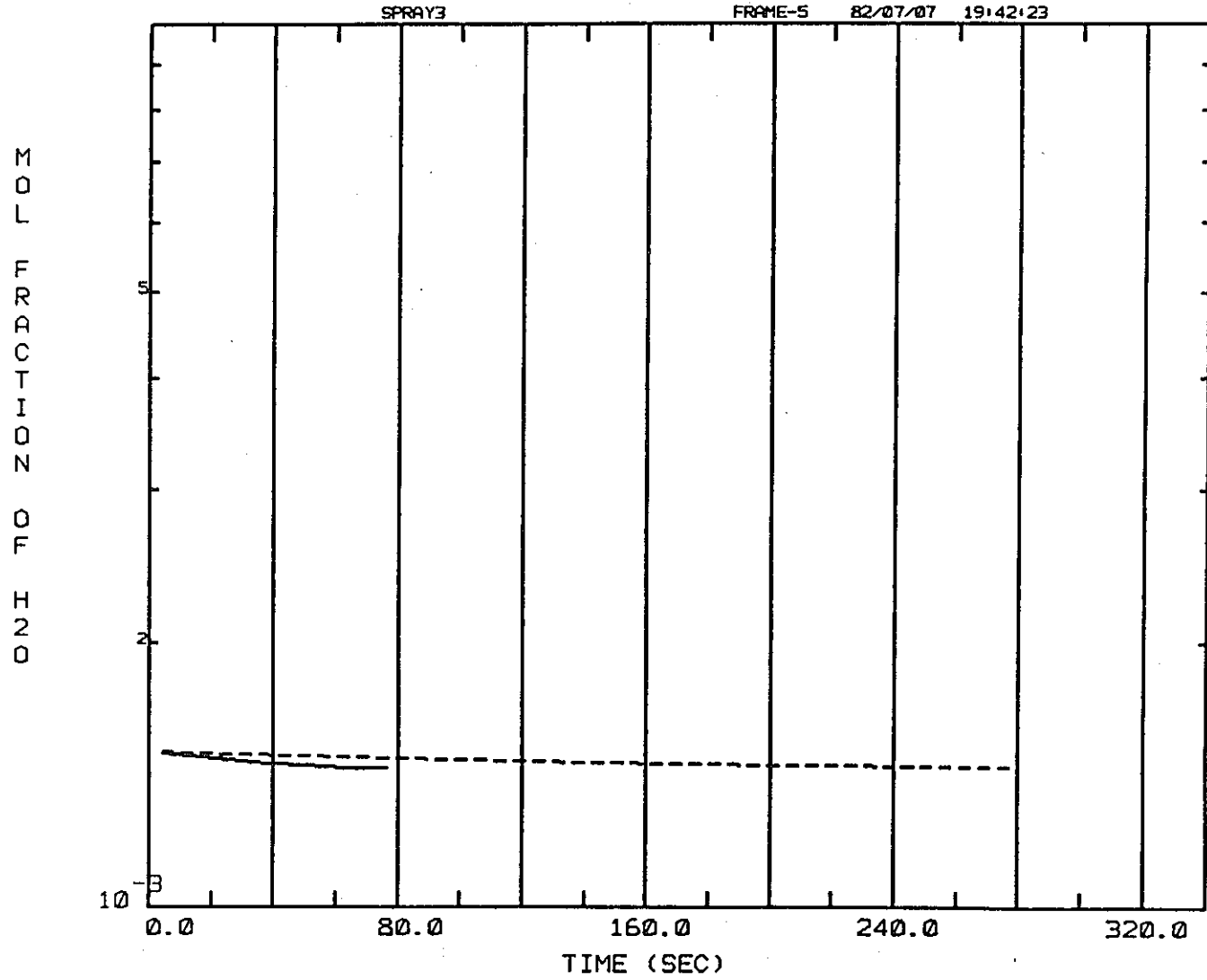


FIG.IV.5-4 TIME VS. CONCENTRATION CASE(5)

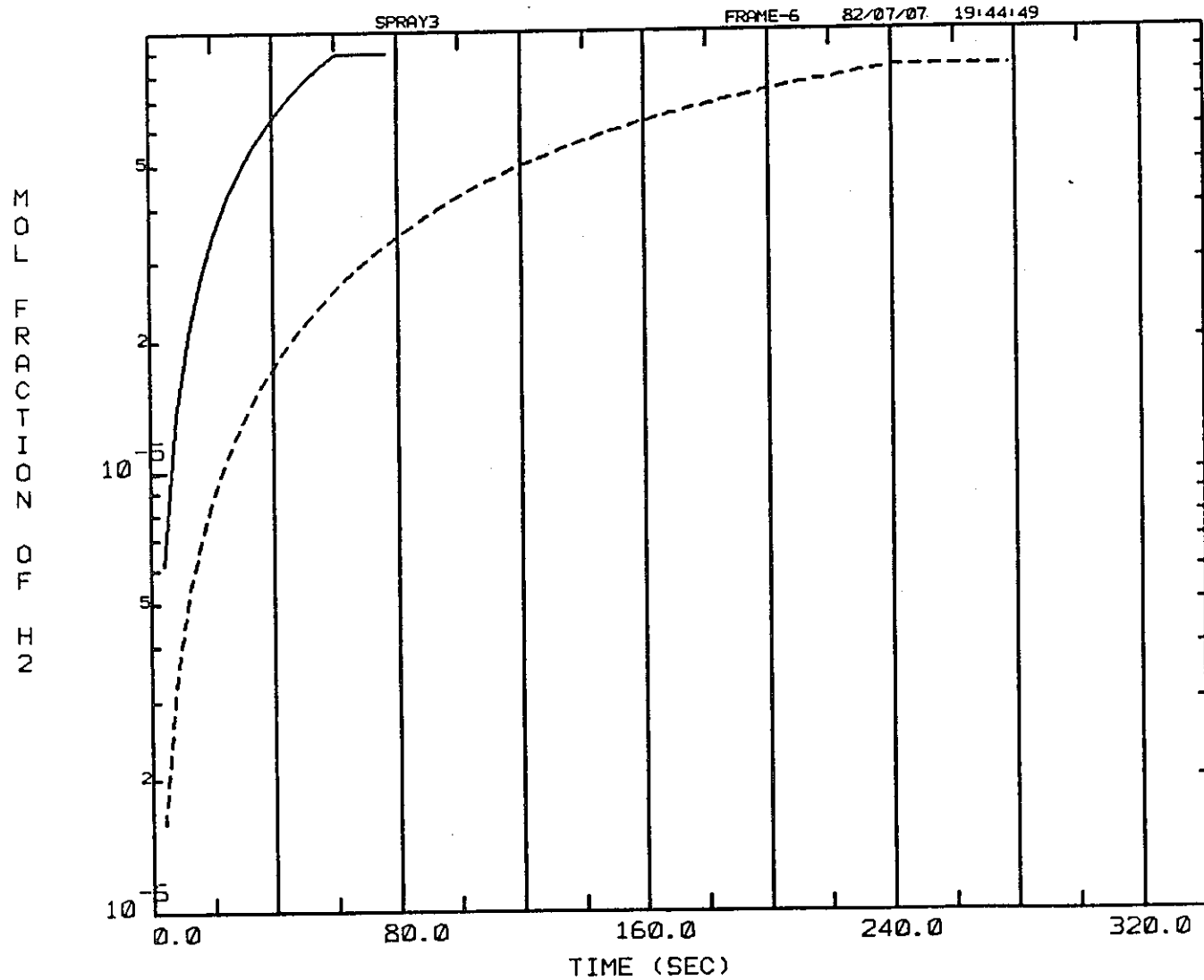


FIG. IV.5-5 TIME VS. CONCENTRATION CASE(5)

Case (6) : スプレー拡がり角の効果

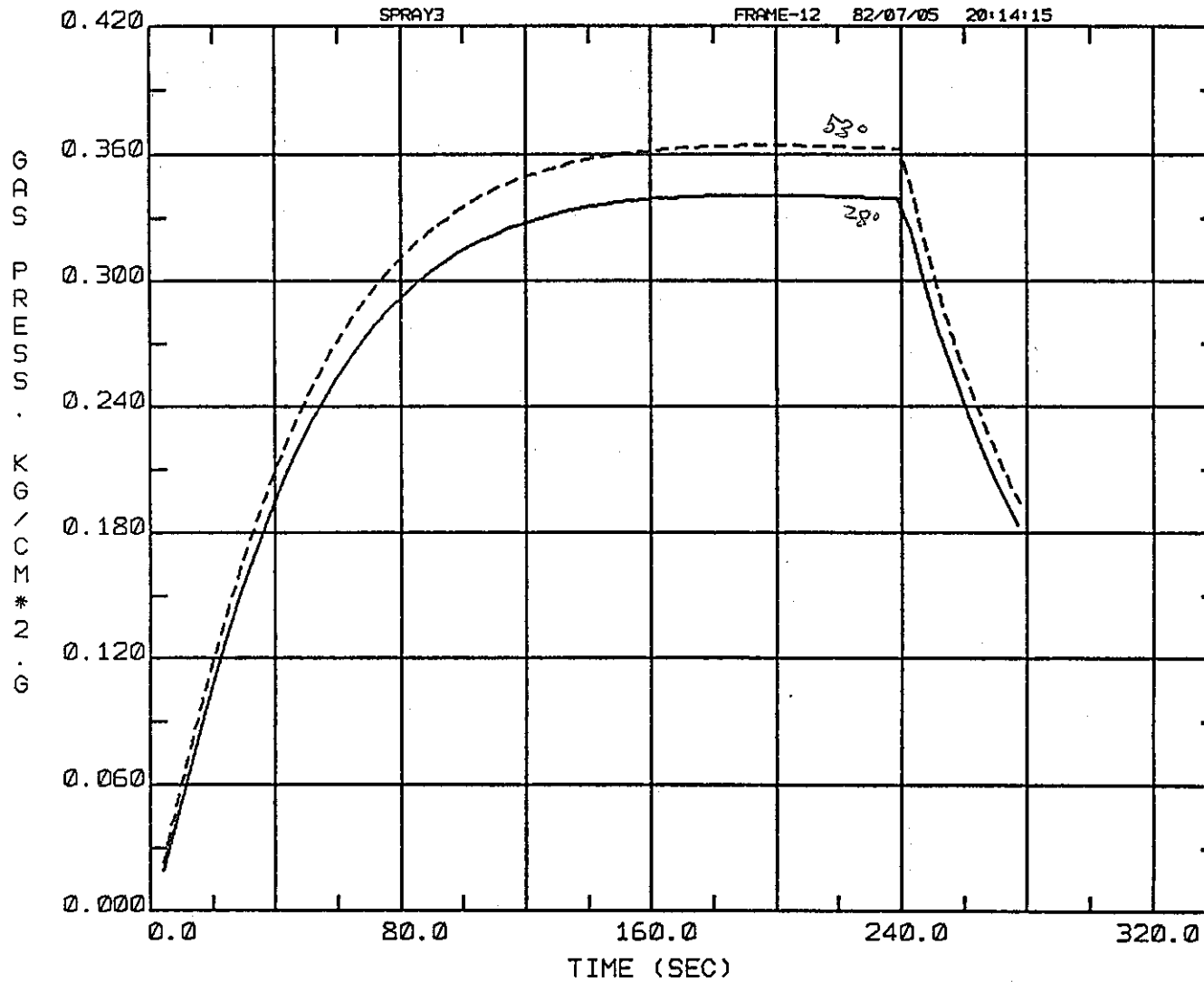


FIG. IV.6-1 TIME VS. PRESSURE CASE(6)

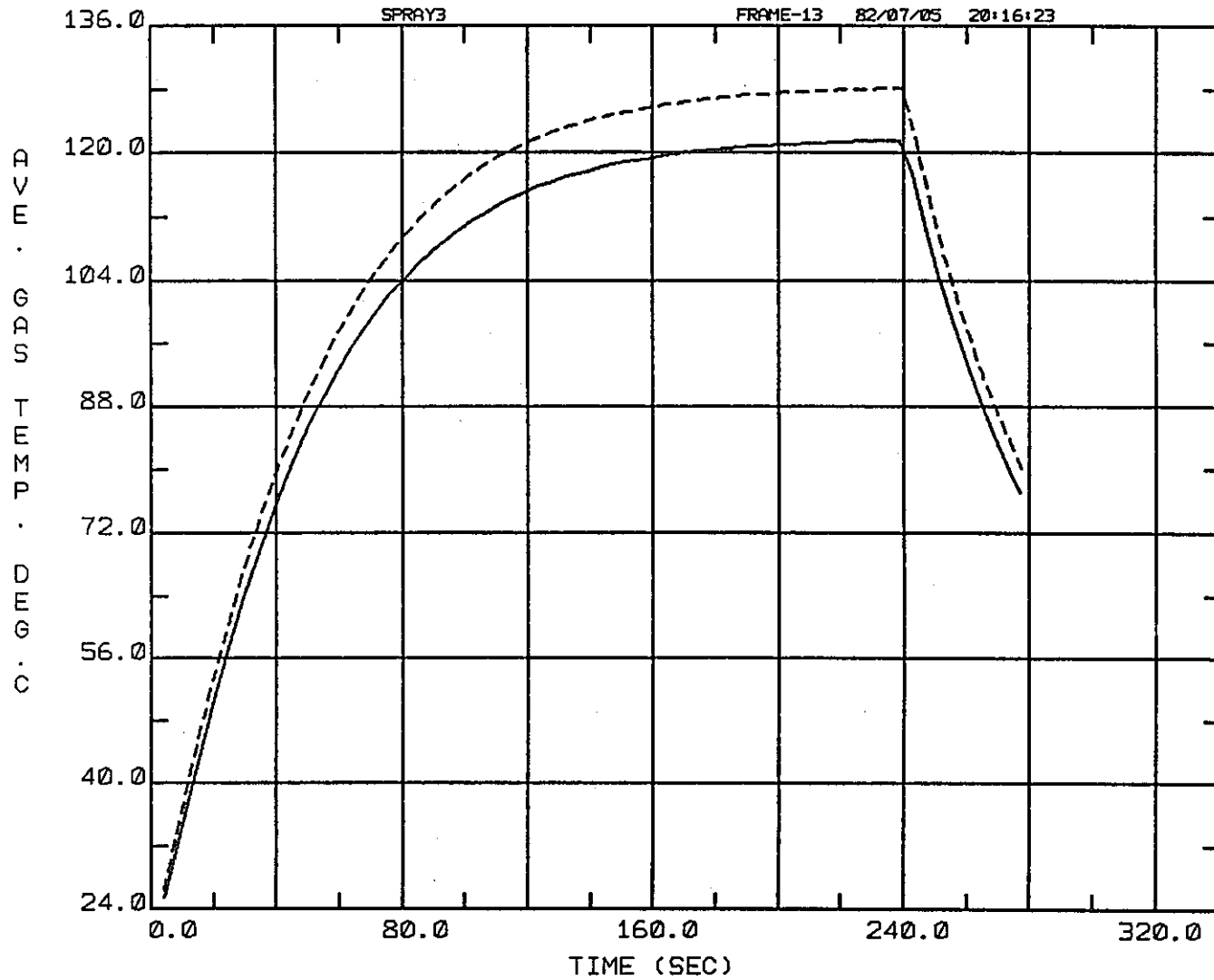


FIG. IV.6-2 TIME VS. TEMP. CASE(6)

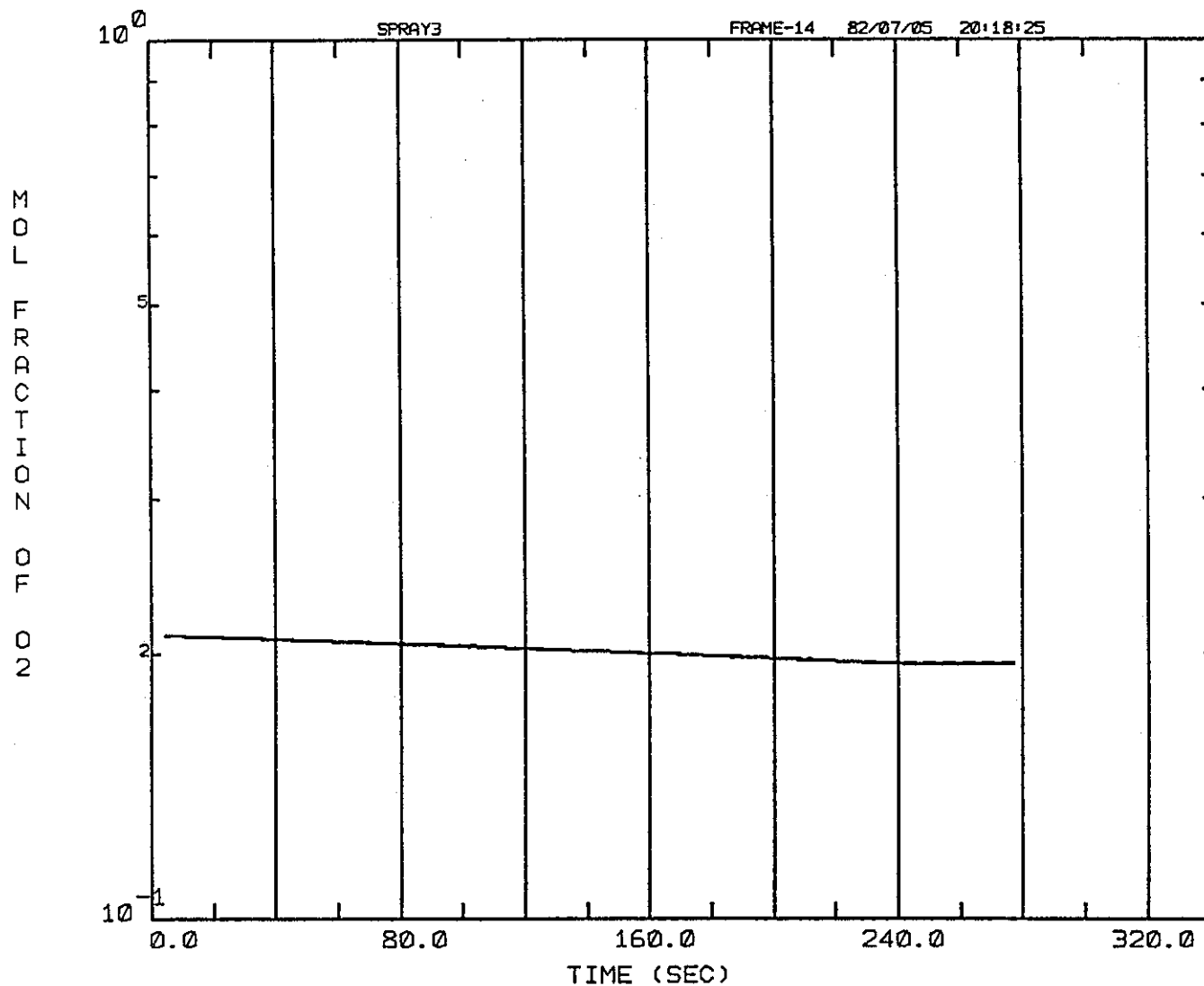


FIG.IV.6-3 TIME VS. CONCENTRATION CASE(6)

ON I T O Z O H T O D R T T Γ O M

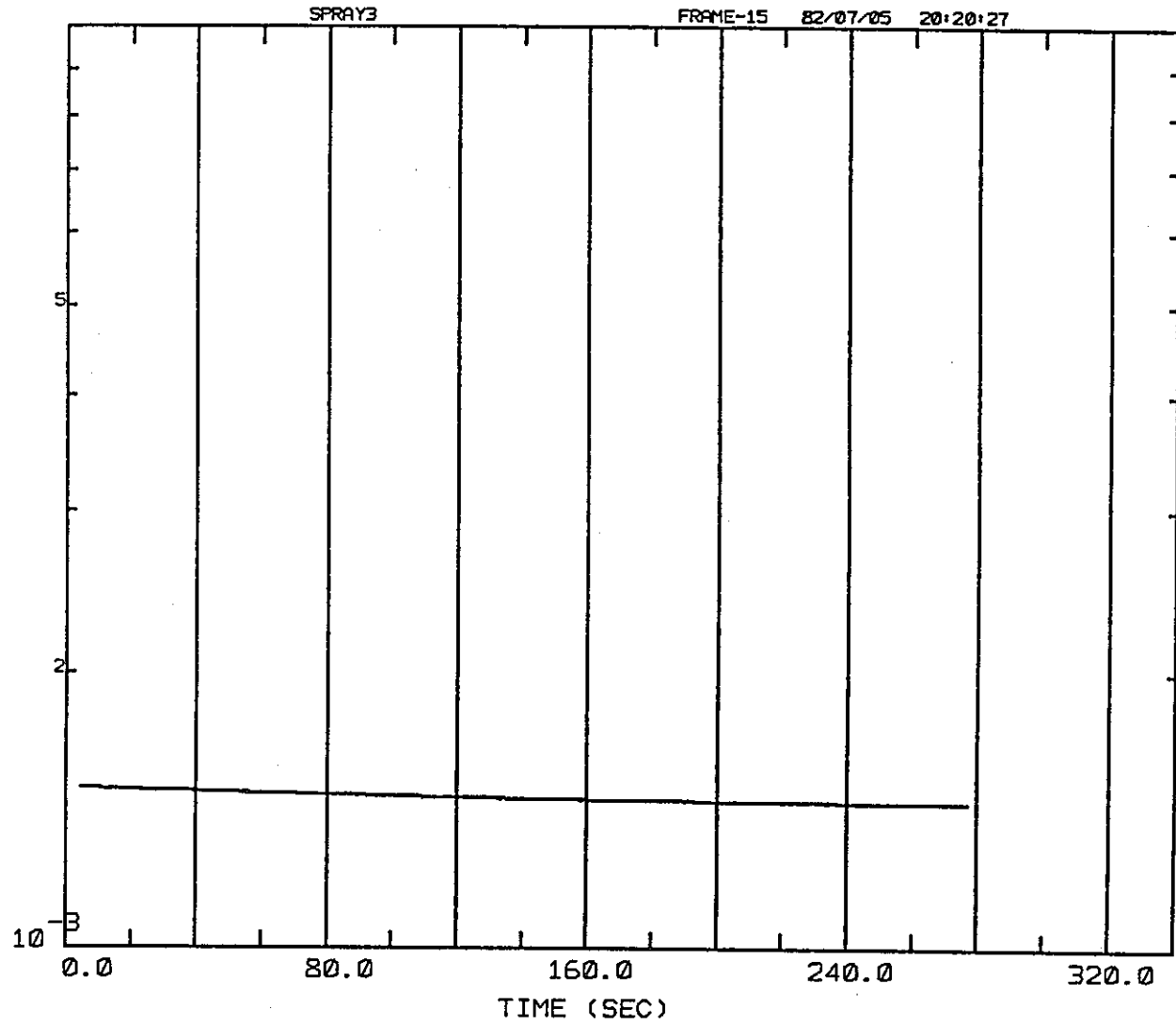


FIG.IV.6-4 TIME VS. CONCENTRATION CASE(6)

Case (7) : 初期水蒸気濃度の効果

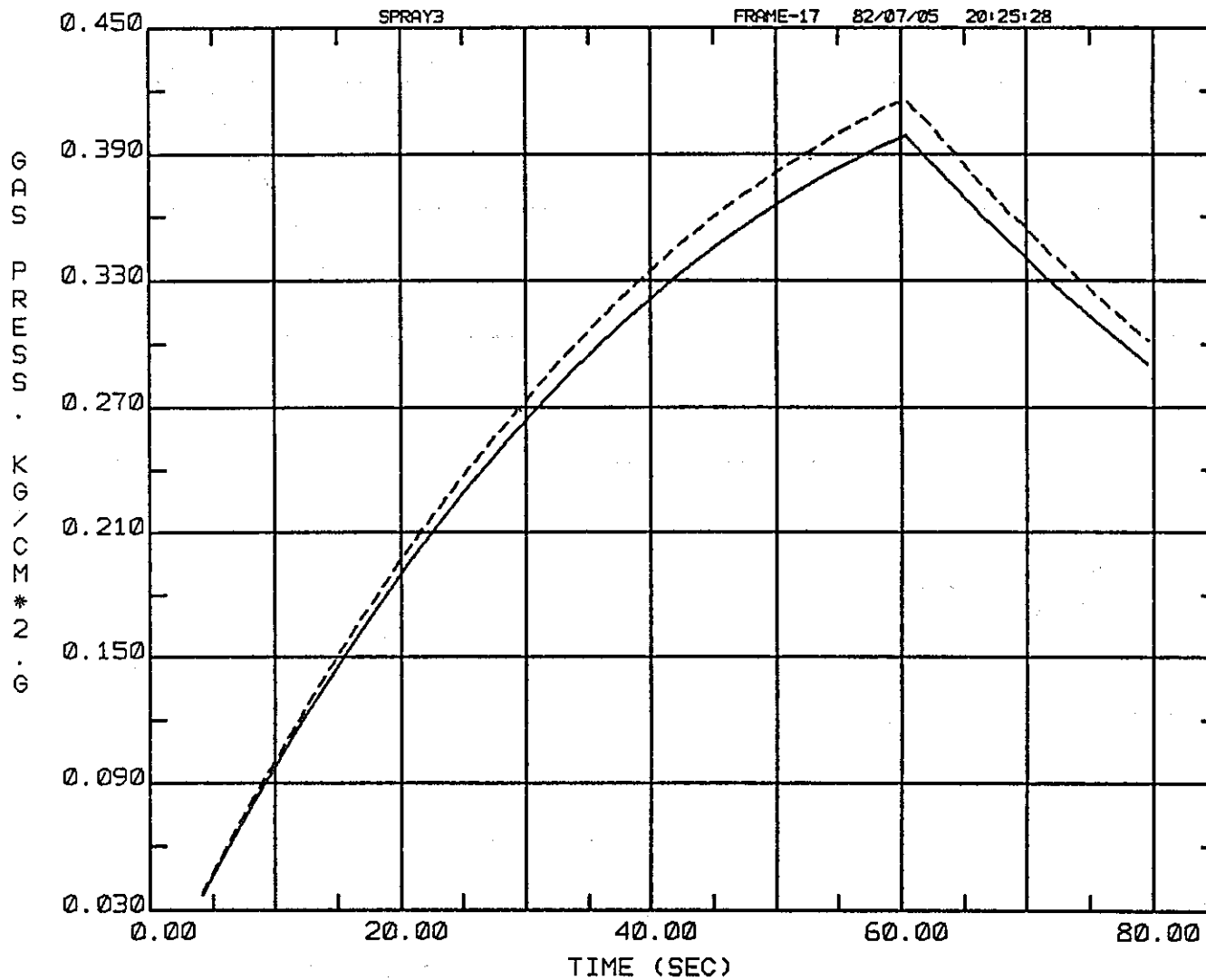


FIG.IV.7-1 TIME VS. PRESSURE CASE(7)

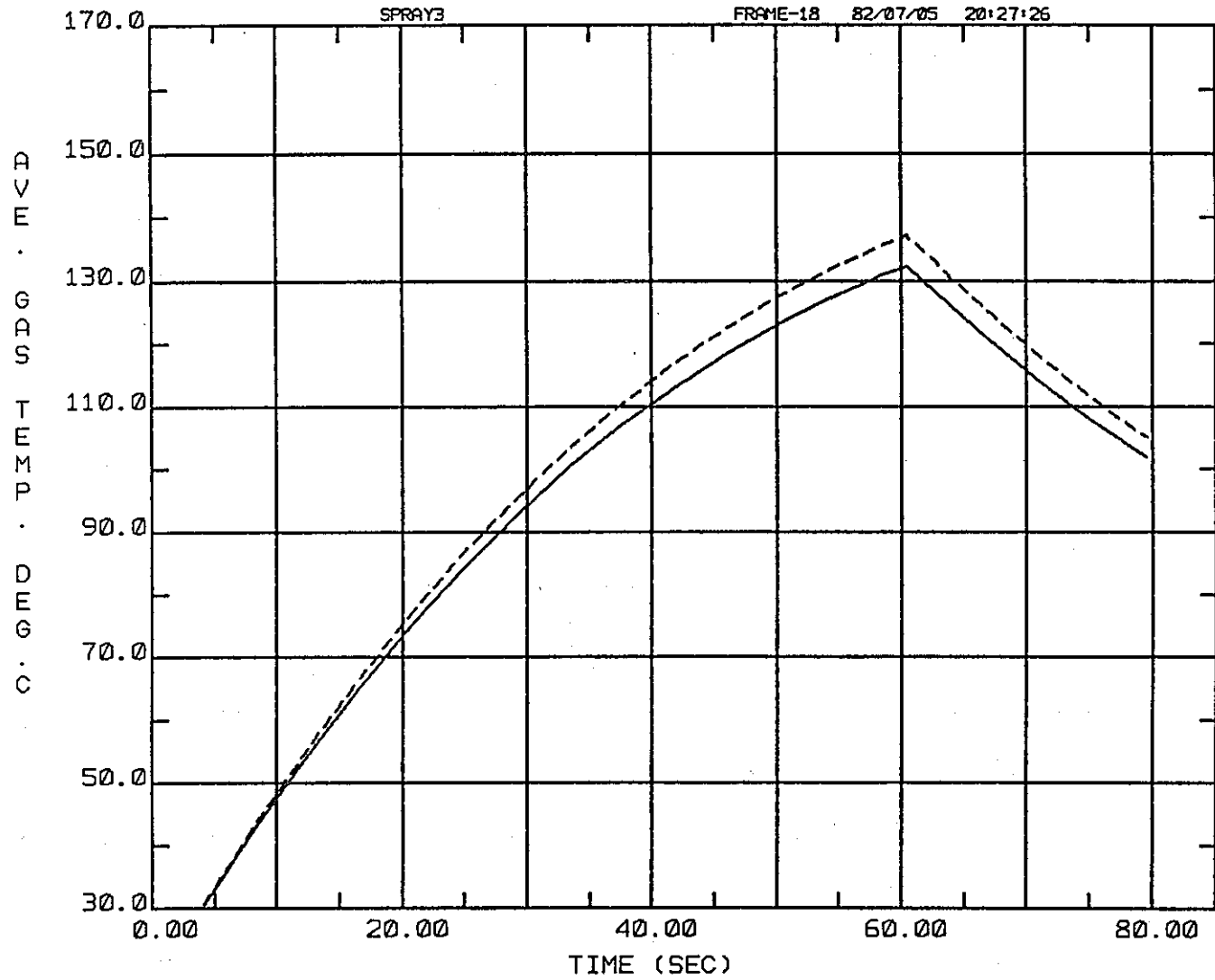


FIG. IV.7-2 TIME VS. TEMP. CASE(7)

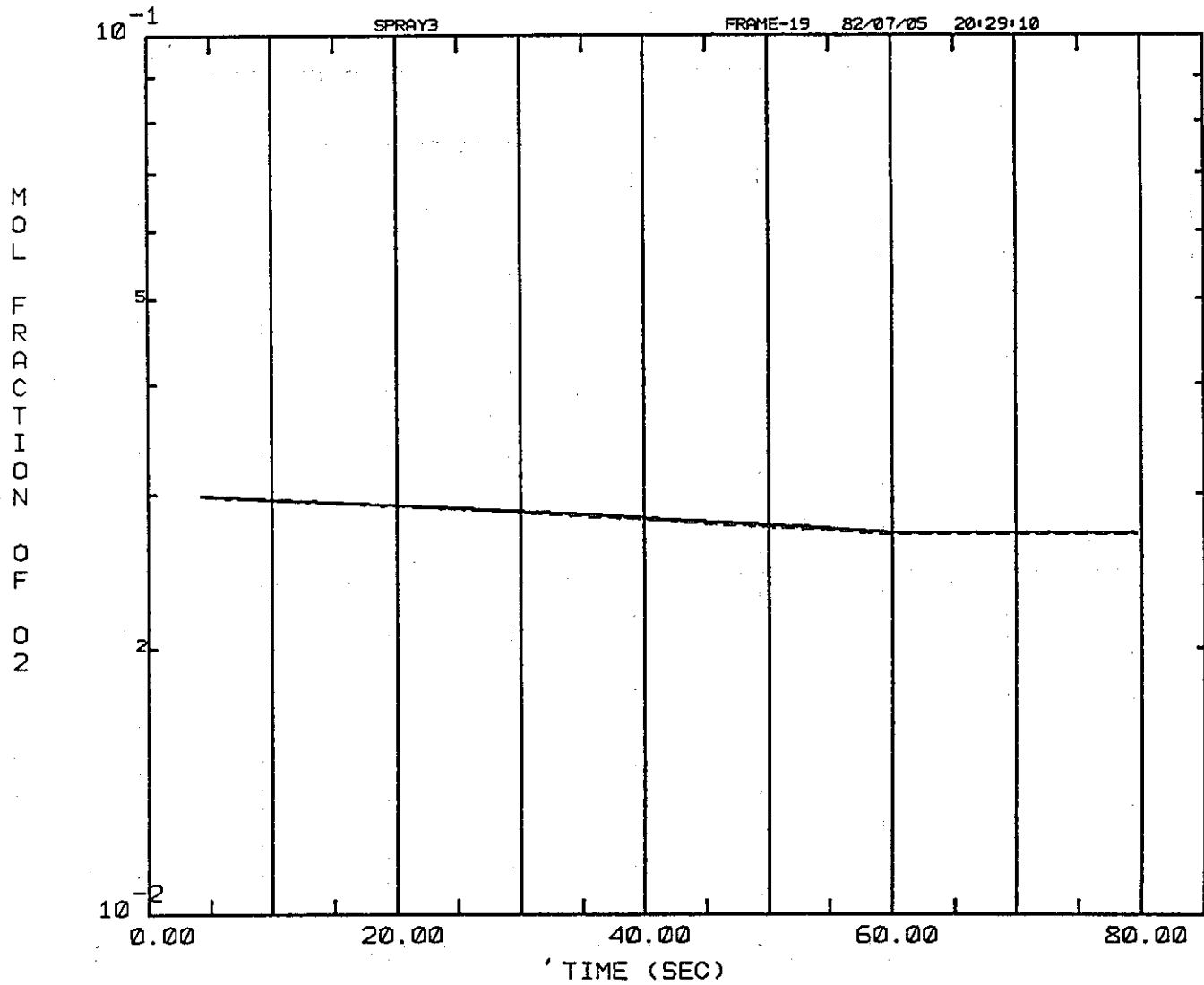


FIG. IV.7-3 TIME VS. CONCENTRATION CASE(7)

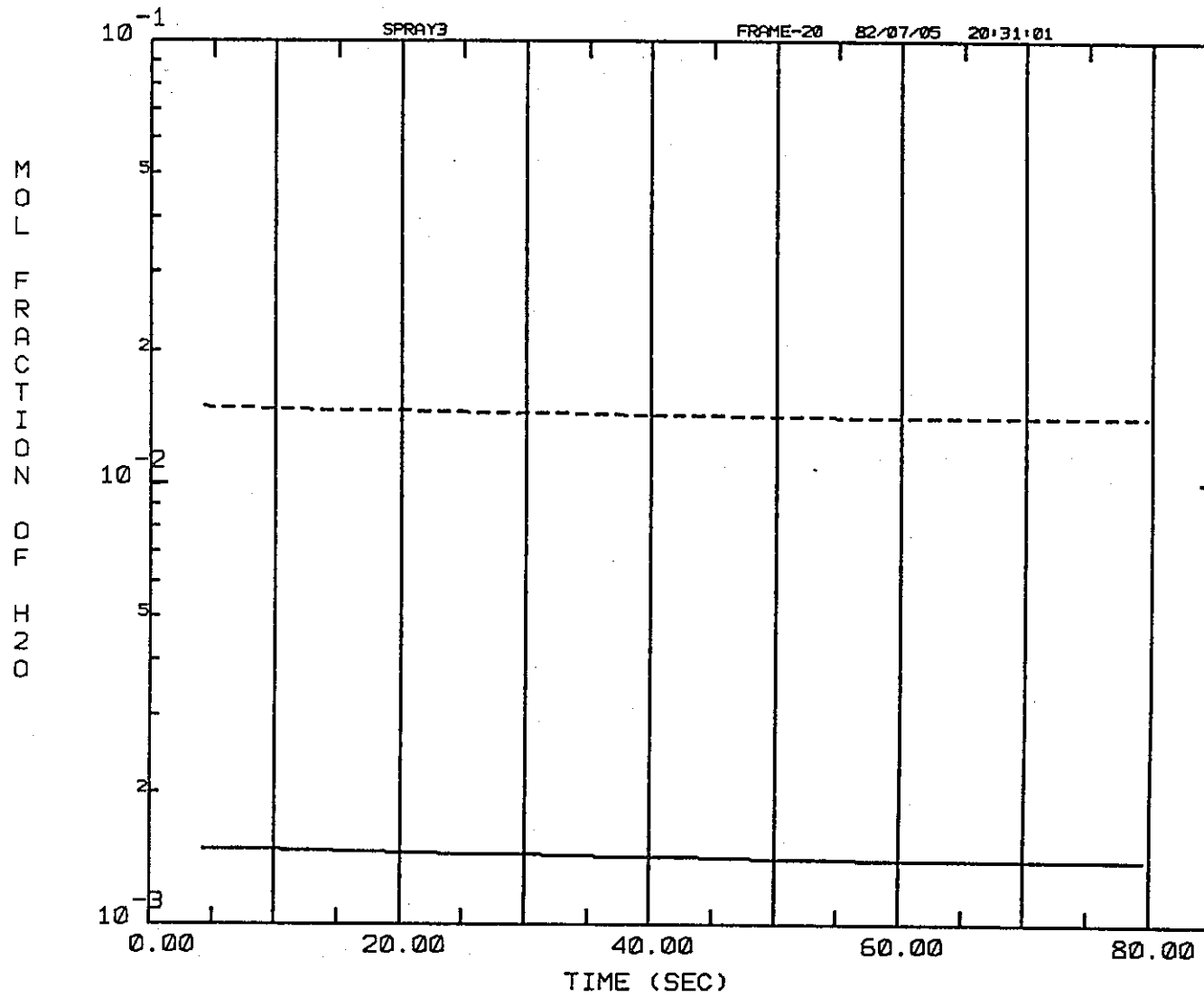


FIG. IV.7-4 TIME VS. CONCENTRATION CASE(7)

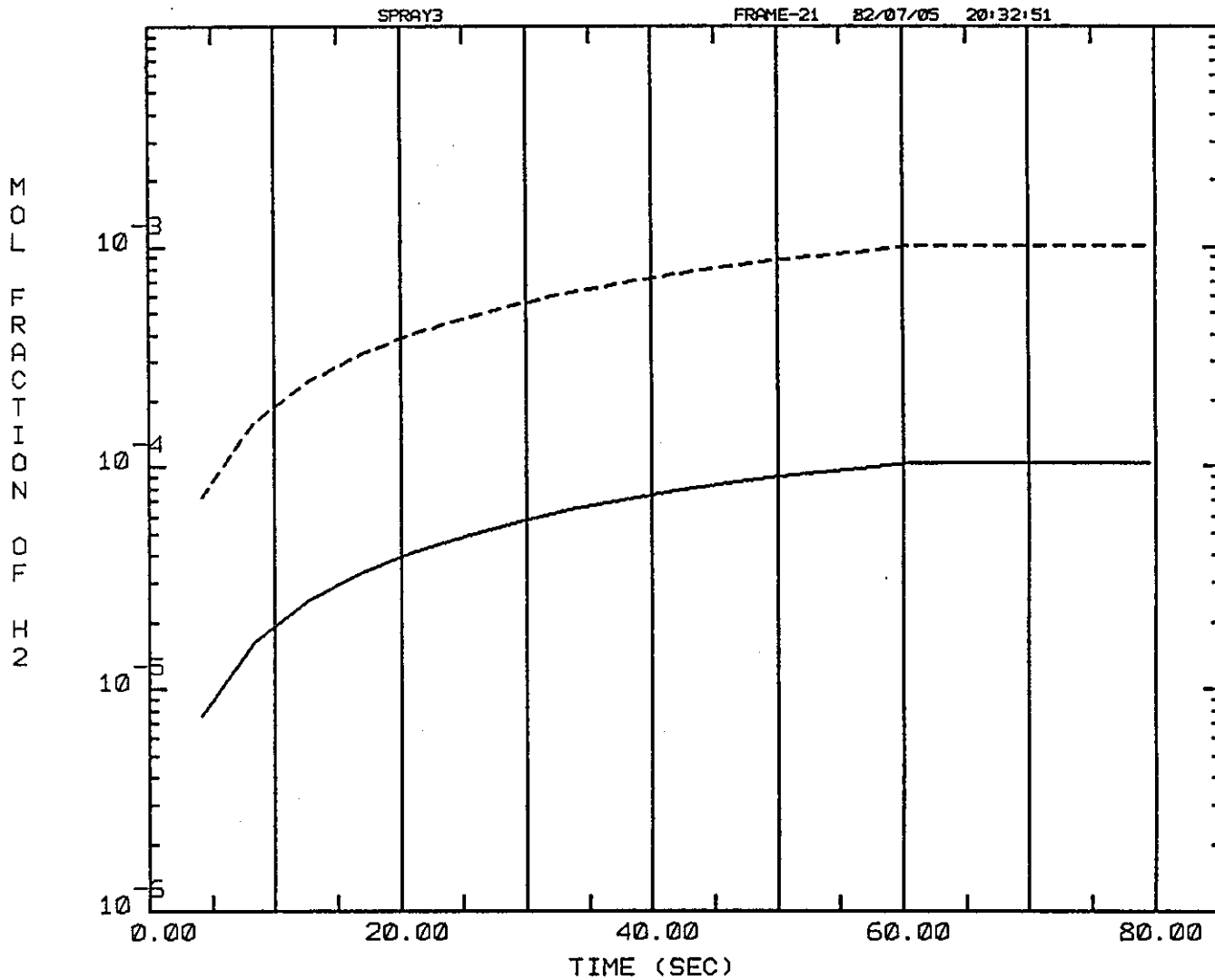


FIG.IV.7-5 TIME VS. CONCENTRATION CASE(7)

Case (8) : スプレー液滴径の効果

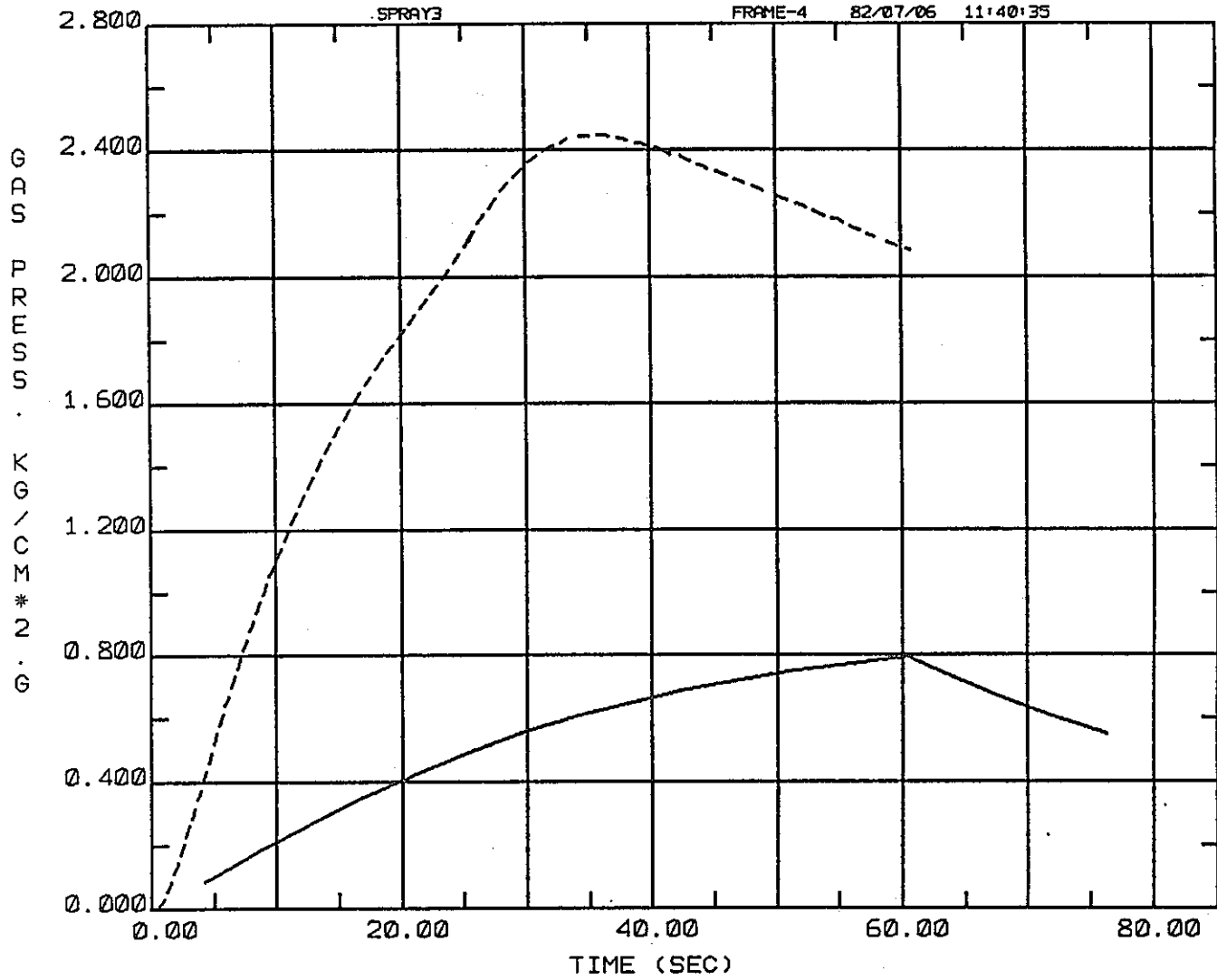


FIG.IV.8-1 TIME VS. PRESSURE CASE(8)

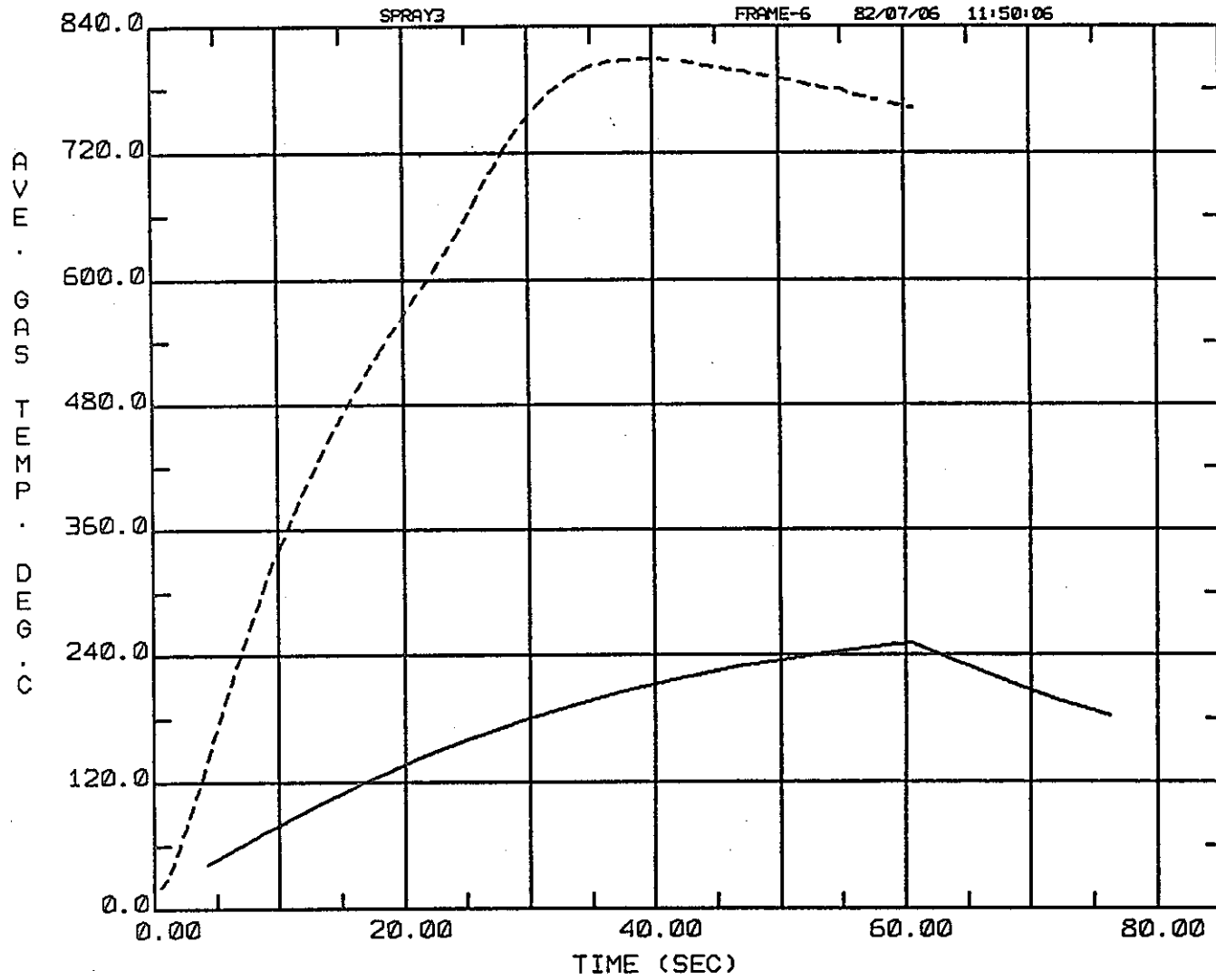


FIG.IV.8-2 TIME VS. TEMP. CASE(8)

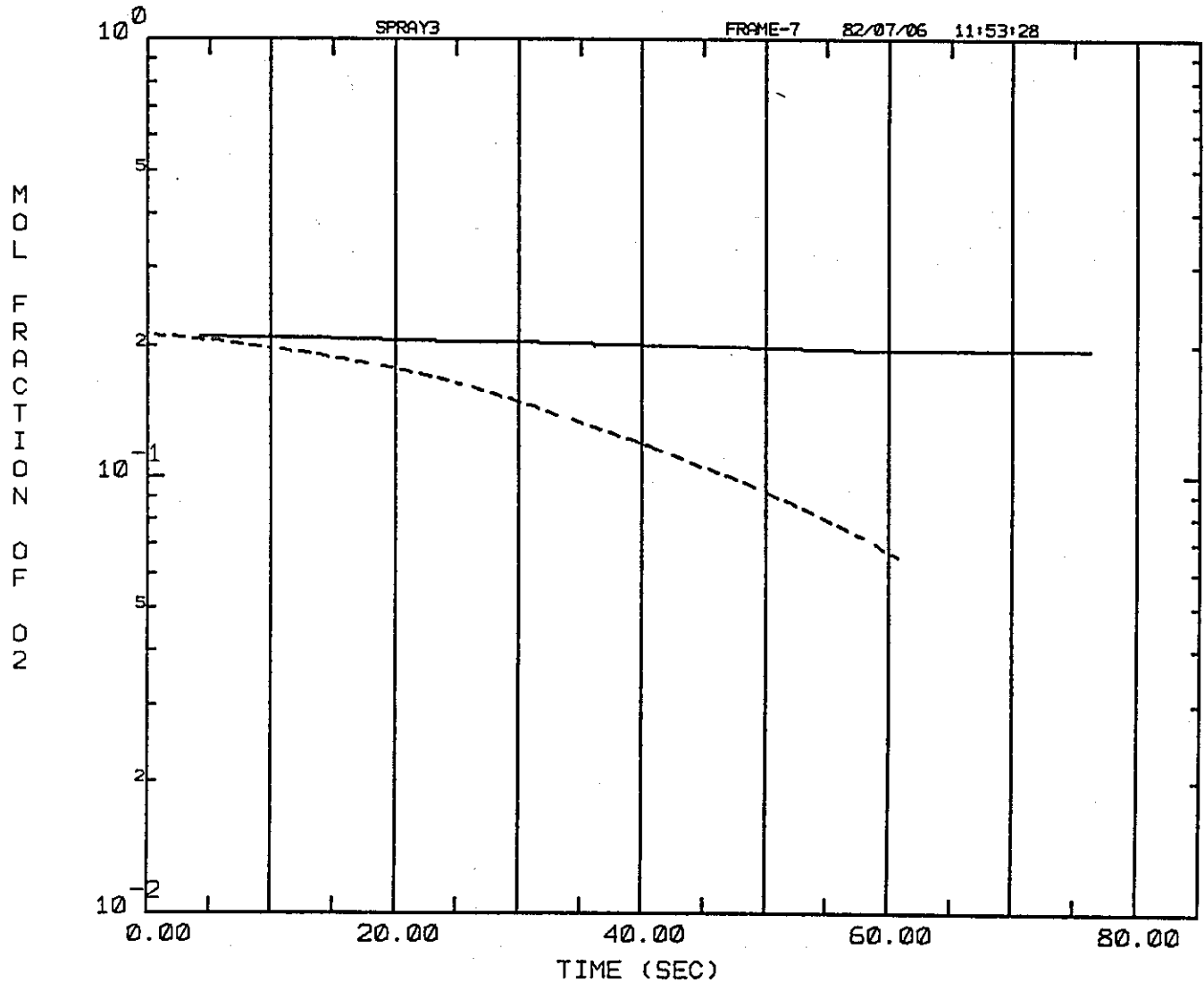


FIG. IV.8-3 TIME VS. CONCENTRATION CASE(8)

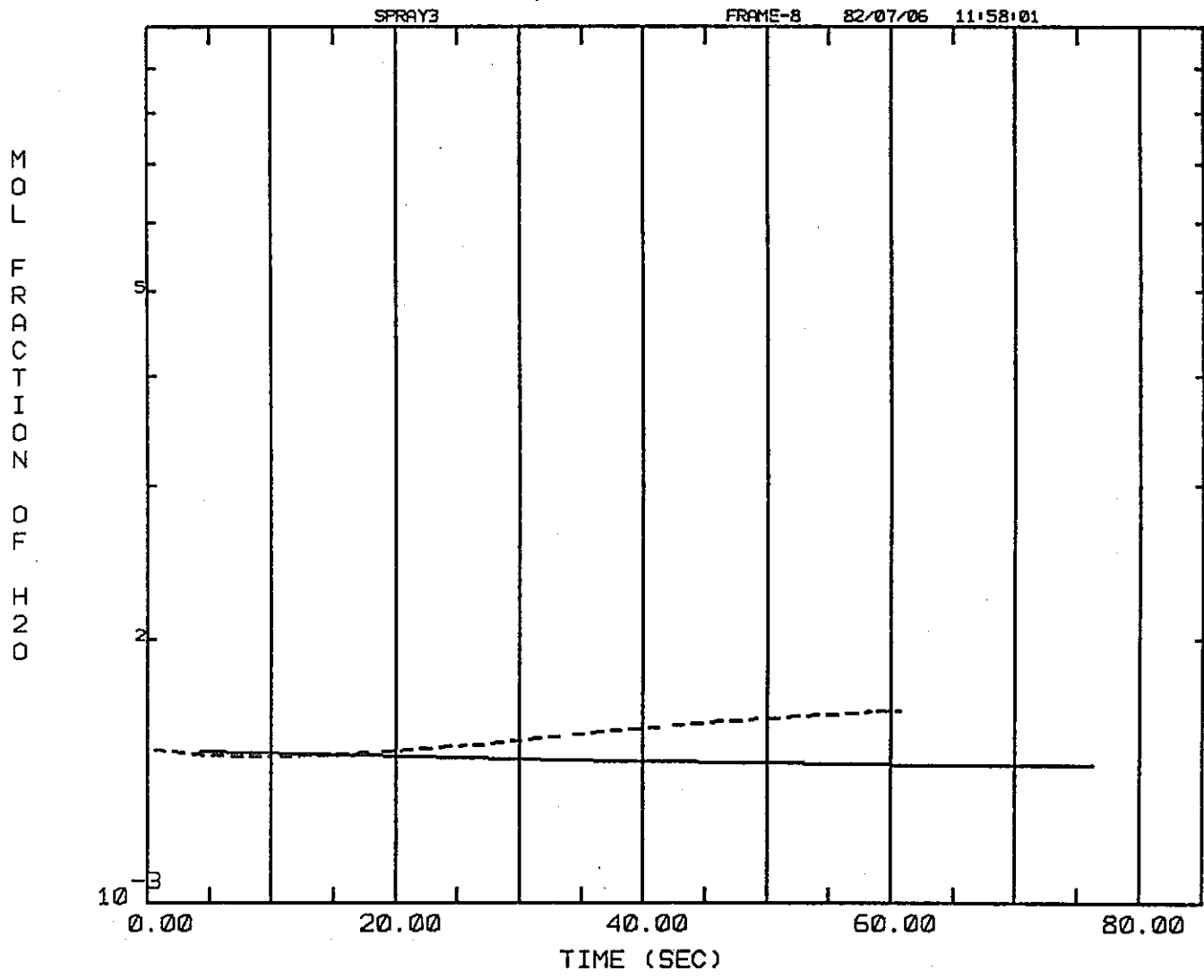


FIG.IV.8-4 TIME VS. CONCENTRATION CASE(8)

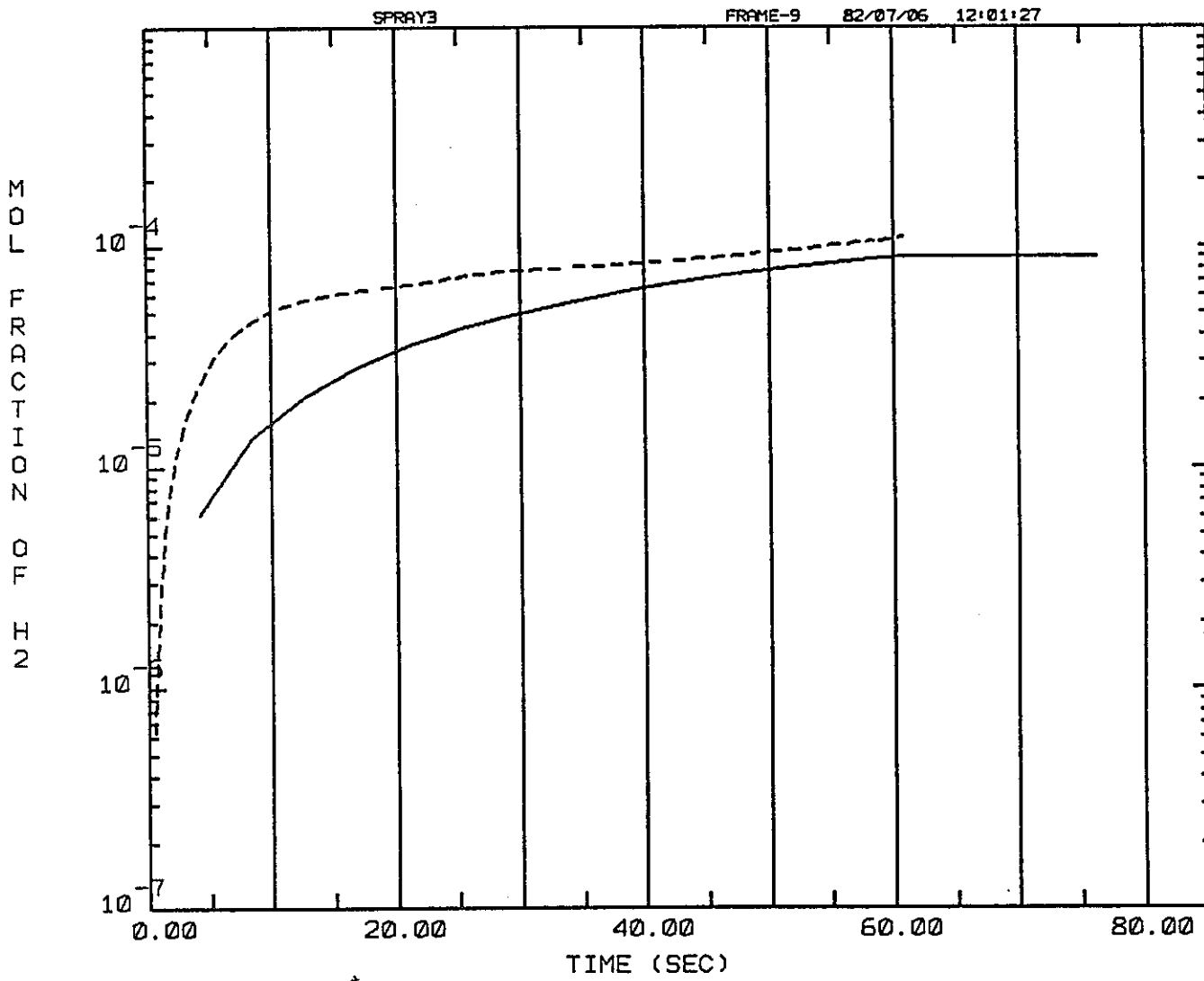


FIG. IV.8-5 TIME VS. CONCENTRATION CASE(8)

A P P E N D I X

① SPRAY-Ⅲ AによるNa スプレー燃焼の解析

1. 目的

“もんじゅ”のナトリウム燃焼解析をサポートすることを目的として、SPRAY-Ⅲ Aにより、ホットレグ配管からのナトリウム漏洩の解析を行った。尚、SPRAY-Ⅲ Aは、SPRAYの最新のバージョンで、本年（56年）4月に、HEDLから入手したものである。計算はすべてCRCのCRAY-1を使用した。

2. 事故想定

“もんじゅ”の設計に於けるナトリウム・スプレー燃焼事故（ホットレグ配管 $\frac{1}{4}D_t$ 破損）を想定⁽¹⁾し入力データとした。入力データの詳細は、Table-1に示した。又、事故発生より現象時間を4,000秒追跡した。

3. プログラム上の問題点

3.1 繰り返し数の不足による計算の停止

SPRAY-Ⅲ Aのサブルーチン“LOOP”では、繰り返し数は10,000回に設定してある。現象時間4,000秒を計算するには、繰り返し1回当りの計算時間、 $\Delta T \doteq 0.23$ 秒であるから、 $4,000/0.23 \doteq 17,400$ 回必要である。よって余裕をみて50,000回とした。

又、プロッター出力用として、4回に1回、雰囲気圧力、及び水蒸気と水素の分圧の計算結果を、メモリーに保存しているが、その容量が1,000個分しか定義してなかった。このままでは、たとえば、4,000回の繰り返しを行ったとしても、メモリーがオーバーフローしてしまい、プログラムを破壊する。よって、書き込みを25回に1回になるように変更した。ただし、これは暫定的な処置であり、本来は、デメンジョンを大きくすることが必要である。

3.2 YMINに関するIF文の問題

SPRAYコードには、各成分（酸素、水蒸気、水素）のモル分率の値によって、ナトリウムとの反応を無視するYMINというパラメーターが定義してある。前記①では 1×10^{-35} としたが、これを 2×10^{-3} にしたところ現象時間1,700秒付近でFLOATING POINT ERRORを起こした。サブルーチン“NARATE”では、上記の操作を行う為、各成

分のモル分率をYMINと比較するIF文がある。しかし、各成分のモル分率は、YMINよりも小さくなると、YMINの値に固定されてしまうので、このIF文は論理的に成立しないことがわかった。よって定義にそうように直した。

以上、2つのプログラム上の問題点について修正を加え、そのUPDATEのリストをTABLE-2に示す。又、以上までの結果のうち、雰囲気圧力、雰囲気平均温度、モル分率、燃焼ゾーン半径の経時変化をそれぞれFig. -1からFig. -5に示した。圧力、温度のグラフに於ける実線は、MAPIのSPRAY-III Mによる計算結果⁽¹⁾である。

4. 計算結果

① YMINの値を0.05, 2×10^{-3} , 1×10^{-6} の3種類で計算を行った。これらの結果のうち、雰囲気圧力、雰囲気平均温度、モル分率、燃焼ゾーン半径の経時変化をそれぞれFig. -6からFig. -11に示した。又、これらの計算は、当初の予定の現象時間4,000秒まで問題なく実行され、CPUタイムはそれぞれ約44秒, 72秒, 96秒であった。

② ナトリウムと酸素並びに水蒸気との反応に於ける速度定数を修正するパラメーターを、T-saiのレポート⁽²⁾に引用されている値に変更して計算を行った。(YMINの値は 1×10^{-6})
又、YMINの値を水蒸気のモル分率に関してはYMINという独立の値を設定して計算を行った。(速度定数は、SPRAY-III Aコードの値)

これらの結果のうち、前記と同様のものをFig. -12からFig. -16に示した。又、これらのCPUタイムはそれぞれ約82秒, 64秒であった。

5. 計算結果に関する考察

今回の計算結果は、YMINがいずれの値の場合も、圧力、温度がSPRAY-III Mの計算結果(実線)より高くなっているが、これは今回の計算では壁の熱容量としてライナープレートのもののみを考慮しているのに対し、SPRAY-III Mによる計算は、さらにライナープレートからコンクリートへの熱移行をも考慮している為である。

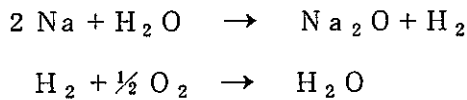
YMIN = 1×10^{-6} の圧力・温度変化のグラフはFig. -1のYMIN = 1×10^{-35} のそれとほぼ一致する。YMIN = 1×10^{-35} の計算は、現象時間2,300秒までで終了してしまっているが、ピークを過ぎているので、現象時間4,000秒まででは反応が如何に進行したと仮定しても圧力ピーク、温度ピークはそれぞれ約1.3(atg), 470(°C)であると考えられる。

YMINが0.05の場合は、ナトリウムの液滴は一切反応しておらず、圧力上昇、熱移行と

もナトリウムの顕熱そのものによるものである。よって燃焼ゾーン半径も零であった。

又、YMINが 2×10^{-3} 、 1×10^{-6} と小さくなるにつれて、圧力、温度は高くなっている。YMINが 2×10^{-3} 、 1×10^{-6} のいずれの場合も第一ピークはほぼ一致しているが、第二ピークが出現する時間は、水蒸気の場合(YH20)がYMINと等しくなるときである。

さらに、YMINの値を、水蒸気の場合について独立に与えたのは、ナトリウムと水蒸気の反応を無視したものである。Fig. -6, Fig. -7の一点鎖線(YMIN= 2×10^{-3})と、Fig. -12, Fig. -13の一点鎖線(YMIN= 2×10^{-3} , YMINH= 2×10^{-2})を比較すると、ナトリウムと酸素及び水蒸気との反応と、ナトリウムと酸素のみの反応の結果が、圧力、温度に及ぼす影響がよくわかる。後者の場合、圧力、温度とも第二ピークがなくなっている。従って、これはナトリウムと水蒸気の反応に起因するものと考えることができる。さらに、第一ピークも、後者の場合は小さくなっている。これは、



の反応熱に相当する分である。

次に、反応速度定数を操作した結果であるが、通常パラメータ V_0 、 V_H の値として、SPRAY-III Aでは300が用いられている。実験結果との比較では、 V_0 、 V_H の値を、それぞれ85、1500に変更した方がよいという報告⁽²⁾もある。そこで、このケースについて V_0 、 V_H を変えた場合の影響について調べてみた。圧力・温度変化は、YMINのみを操作した場合に比べて、第二ピークが不明確になっていることがわかる。ナトリウムと酸素及び水蒸気との反応速度モデルは、下記のようにになっている。

(i) ナトリウムと酸素の反応速度モデル

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

ϵ_0 : ナトリウムと酸素の反応速度定数

V_0 : 実験データから計算されるナトリウムと酸素の反応速度定数

δ_{BC} : 燃焼ゾーン半径(RB)

D_0 : 窒素雰囲気中の酸素の拡散定数で下のように温度の関数となる。

$$pD_0 = 1.412 \times 10^{-5} T^{1.684} \quad (\text{atm} \cdot \text{cm}^2 / \text{sec})$$

ただし、Tは系の絶対温度、pは圧力で、それぞれ次の式に従う。

$$T = \frac{\text{ナトリウム温度 (TS)} + \text{ガス温度 (TG)}}{2} \quad (^\circ\text{K})$$

$$p = \frac{(\text{セル内ガスモル数 (GT)} - \text{水蒸気モル数 (H}_2\text{O M)} - \text{水素モル数 (H}_2\text{M)})}{\text{セル内容積 (VT)} \times 2116.2 \text{ (PSFA)}}$$

$$\times \text{気体定数 (R)} \times \text{平均雰囲気温度 (TGSV)} \text{ (}^\circ\text{R)} \quad (\text{atm})$$

よって,

$$D_o = 1.412 \times 10^{-5} T^{1.684} / p \quad (\text{cm}^2 / \text{sec})$$

(ii) ナトリウムと水蒸気の反応速度モデル

$$\epsilon_H = \left(1 + \frac{D_H}{V_H \delta_{BC}} \right)^{-1} = \left(\frac{V_H \delta_{BC}}{V_H \delta_{BC} + D_H} \right)$$

ϵ_H : ナトリウムと水蒸気の反応速度定数

V_H : 実験データから計算されるナトリウムと水蒸気の反応速度定数

δ_{BC} : 燃焼ゾーン半径 (RB)

D_H : 窒素雰囲気中の水蒸気の拡散定数で次のように温度の関数である。

$$p D_H = 1.230 \times 10^{-5} T^{1.745} \quad (\text{atm} - \text{cm}^2 / \text{sec})$$

ただし、温度 T 、圧力 p については (i) と同様である。

よって

$$D_H = 1.230 \times 10^{-5} T^{1.745} / p \quad (\text{cm}^2 / \text{sec})$$

これらで、実際に行った計算結果を用いて、 V_o 、 V_H の操作の、反応定数 ϵ_o 、 ϵ_H に及ぼす影響を調べてみた。 $V_o = 300$ 、 $V_H = 300$ 、及び $V_o = 85$ 、 $V_H = 1500$ のいずれの場合も Y_{MIN} は 1×10^{-6} で、Fig. -6, 7 の二点鎖線と Fig. -12, 13 の破線の比較である。データは、特徴的と思われる4点を採用した。以下その結果である。

現象時間	$V_o=300$	$V_o=85$	$V_H=300$	$V_H=1,500$
	ϵ_o	ϵ_o	ϵ_H	ϵ_H
60秒付近	0.866	0.648	0.834	0.962
	($D_o=0.564$)	($D_o=0.564$)	($D_H=0.730$)	($D_H=0.730$)
530秒付近	0.875	0.665	0.843	0.964
	($D_o=0.535$)	($D_o=0.529$)	($D_H=0.697$)	($D_H=0.690$)
1,200秒付近	0.887	0.706	0.857	0.971
	($D_o=0.529$)	($D_o=0.527$)	($D_H=0.691$)	($D_H=0.688$)
2,200秒付近	0.965	0.999	0.955	1.000
	($D_o=0.512$)	($D_o=0.510$)	($D_H=0.670$)	($D_H=0.666$)

これからわかるのは、 V_o 、 V_H が共に300の場合に比べて、ナトリウムと水蒸気の反応を促進させているということである。特に、現象初期に於いて、著しい。

6. プログラム上の問題点の追加

その後、再度プログラムを見直したところ、TABLE-3に示された修正が必要なことがわかった。

- (1) NARATE, 75: ナトリウム蒸気の体積、拡散定数を求める計算に用いる温度を定義しているが、その条件にナトリウムと水蒸気の反応を考えていない。
- (2) NARATE, 138: 水素の拡散定数を求める式は $pD_{H_2} = 5.62 \times 10^{-5} T^{1.67}$ の関係式から導かれたものにもかかわらず圧力を考慮していない。ナトリウム蒸気、酸素、水蒸気の同式は問題ない。
- (3) NARATE, 291: MAPIより指摘があった。熱の移動に、ナトリウムと水蒸気の反応を考えていない。

Fig.-17からFig.-21までは、以上の3つを修正して計算した結果である。NARATE, 138を修正するか、しないかによっては水素のモル分率の変化に差異が生じたのみで、他には影響しない。

Fig.-22からFig.-26までは、NARATE, 75・138のみを修正、及びNARATE, 297のみを修正してそれぞれ実行した結果である。前者の場合は、原因不明の第二ピークが消えていない。又、水蒸気のモル分率の減少及び燃焼半径の増大が若干速くなっている。後者の場合、上記の3つを修正して実行した結果と大差ないが、圧力、温度の第二ピークがシャープ

になっている。

7. 引用文献

- (1) 一次収納構造の設計, 成果報告書, PNC ZJ 222 81-04 (1980年11月)
- (2) S. S. TSAI, "THE NACOM CODE FOR ANALYSIS OF POSTULATED SODIUM SPRAY FIRES IN LMFBSs", NUREG/CR-1405 BNL-NU-REG-51180 (March 1980)

TABLE - 1

SPRAY CODE INPUT DATA FORMAT 8E10.0 AND 8I10 - DEC. 1, 1976

Card No.	Title Card \leq 60 characters ("Q" in cc-1 of title card for heat balance output)							
1	Q AI Jet Test No. 8 - Splash Dispersal into LTV							
2	DI	ALINER	PSIA	TGI	TSI	YH2 θ	VOL	H
	.145	0.0	15.75	75.	1000.	.008	2200.	25.
3	FNA	SMAX	TMAX	XS(1)	THETA	YOI	DIAM	HCELL
	1.830	3.3	45.	4.	.1811	.008	10.	25.
4	CPS	XSCALE	YSCALE	CPI	V2	XMULT	SIGMA	--
	1.2	--	--	.023	0.0	--	--	--
5	NV	NPRT	NPI	NCURVE	ITABL	NTEST	NA202	
	50	50	20	1	0		0	

		Release Rate Table	
		Time(sec)	Rate(lb/sec)
SIGMA = Geom. Std. Dev. of droplet distribution (default = 2.64)	2.64	1. 0	57.33
DI = Initial mean droplet diameter (in) (mass or volume mean)	0.18	2. 1000	529.2
ALINER = Cell wall area (ft ²) (default = π ·DIAM·(DIAM/2 + HCELL))	16409	3. 1500	49.61
PSIA = Initial gas pressure (psia)	14.763	4. 4000	29.77
TGI = Initial gas temp. (°F)	131	5. 7500	6.615
TSI = Initial sodium temp. (°F)	984.2	6. 9000	11.03
YH2 θ = Initial water vapor fraction	0.01546	7. 9500	0
VOL = Gas volume (ft ³)	1094.77	8. _____	_____
H = Spray cone height (ft) (H \leq HCELL)	45.3	9. _____	_____
FNA = Constant sodium release rate (lb/sec)	5733	10. _____	_____
SMAX = Sodium spray period (sec)	9500	11. _____	_____
TMAX = Time duration of calculation (sec)	4000	12. _____	_____
XS(1) = Effective diameter of spray impact area (ft) (<DIAM)	10.00	13. _____	_____
THETA = Angle subtended by spray cone (radians)	0.637	14. _____	_____
YOI = Initial oxygen concentration fraction	0.03	15. _____	_____
DIAM = Effective cell diameter (ft)	44.6	16. _____	_____
HCELL = Cell height (ft)	45.3	17. _____	_____
CPS = Wall heat capacity (Btu/ft ² - °F)	1.411	18. _____	_____
CPI = Impact plate heat capacity (Btu/ft ² - °F)	3.881	19. _____	_____
V2 = Secondary volume (ft ³)		20. _____	_____
XMULT = Multiplier for release rate table (default = 1.00)		21. _____	_____
XSCALE = Curve scale (sec/inch)		22. _____	_____
YSCALE = Curve scale (psi/inch)		23. _____	_____
NV = No. of volume increments		24. _____	_____
NPRT = Print cycle, time steps per printout (time >SMAX)	10	25. _____	_____
NPI = Print cycle, time steps per printout (time \leq SMAX)	250	26. _____	_____
NCURVE = { 0 No plot	500	27. _____	_____
{ 1 Curve plot	0	28. _____	_____
ITABL = No. data pairs in release rate table (\leq 50)	7	29. _____	_____
NTEST = Not used		30. _____	_____
NA202 = Percent of Na ₂ O ₂ product.	0	_____	_____

TABLE 2

QSPRAY
 *** CARD MODIFICATION SUMMARY ***

UPDATE 1.09 80299

06/25/81 14111104 PAGE 3
 PLDATE 05/22/81 LASTID MIY1

***** PROCESSING DECK SPRAY

***** PROCESSING DECK LOOP

OB2	DELETE INSERT	DD 900 I=1,10000 DD 900 I=1,50000	LOOP.119 OB2.1
OB2	DELETE INSERT	IF(II.LT.4) GO TO 770 IF(II.LT.25) GO TO 770	LOOP.440 OB2.2

***** PROCESSING DECK NARATE

MIY1	DELETE INSERT	IF(YO+YH20.LT.YMIN) GO TO 902 IF(YO.LT.YMIN .AND. YH20.LT.YMIN) GO TO 902	NARATE.93 MIY1.1
MIY1	DELETE INSERT	IF(YO+YH20.GE.YMIN) GO TO 903 IF(YO.GE.YMIN .OR. YH20.GE.YMIN) GO TO 903	NARATE.244 MIY1.2
MIY1	DELETE INSERT	IF(YO+YH20.LT.YMIN) GO TO 99 IF(YO.LT.YMIN .AND. YH20.LT.YMIN) GO TO 99	NARATE.264 MIY1.3
MIY1	DELETE INSERT	IF(YO+YH20.LT.YMIN) TEMP=TS(J) IF(YO.LT.YMIN .AND. YH20.LT.YMIN) TEMP=TS(J)	NARATE.318 MIY1.4

***** PROCESSING DECK SURS

***** PROCESSING DECK NPLLOT

***** PROCESSING DECK SPEED

***** PROCESSING DECK TABLE

***** PROCESSING DECK SATLINE

***** PROCESSING DECK HSS

TABLE 3

JSPRAY		UPDATE 1.09 80299	07/06/81	14:58:47	PAGE 2
*** CARD MODIFICATION SUMMARY ***			PLDATE 06/25/81	LASTID MIY2	
*****	PROCESSING DECK	SPRAY			
*****	PROCESSING DECK	LOOP			
*****	PROCESSING DECK	NARATE			
MIY2	DELETE	IF(YO.LT.YMIN) T=0.5*(TS(JJJ)+TG(J))		NARATE.75	
	INSERT	IF(YO.LT.YMIN .AND. YH20.LT.YMIN) T=0.5*(TS(JJJ)+TG(J))		MIY2.1	
MIY2	DELETE	DH2=5.62E-5*T**1.67		NARATE.138	
	INSERT	DH2=5.62E-5*T**1.67/P		MIY2.2	
MIY2	DELETE	IF(YO.LT.YMIN) SYTC=FF+Z3*TA		NARATE.291	
	INSERT	IF(YO.LT.YMIN .AND. YH20.LT.YMIN) SYTC=FF+Z3*TA		MIY2.3	
*****	PROCESSING DECK	SUBS			
*****	PROCESSING DECK	NPLOT			
*****	PROCESSING DECK	SPEED			
*****	PROCESSING DECK	TABLE			
*****	PROCESSING DECK	SATLINE			
*****	PROCESSING DECK	HSS			

109

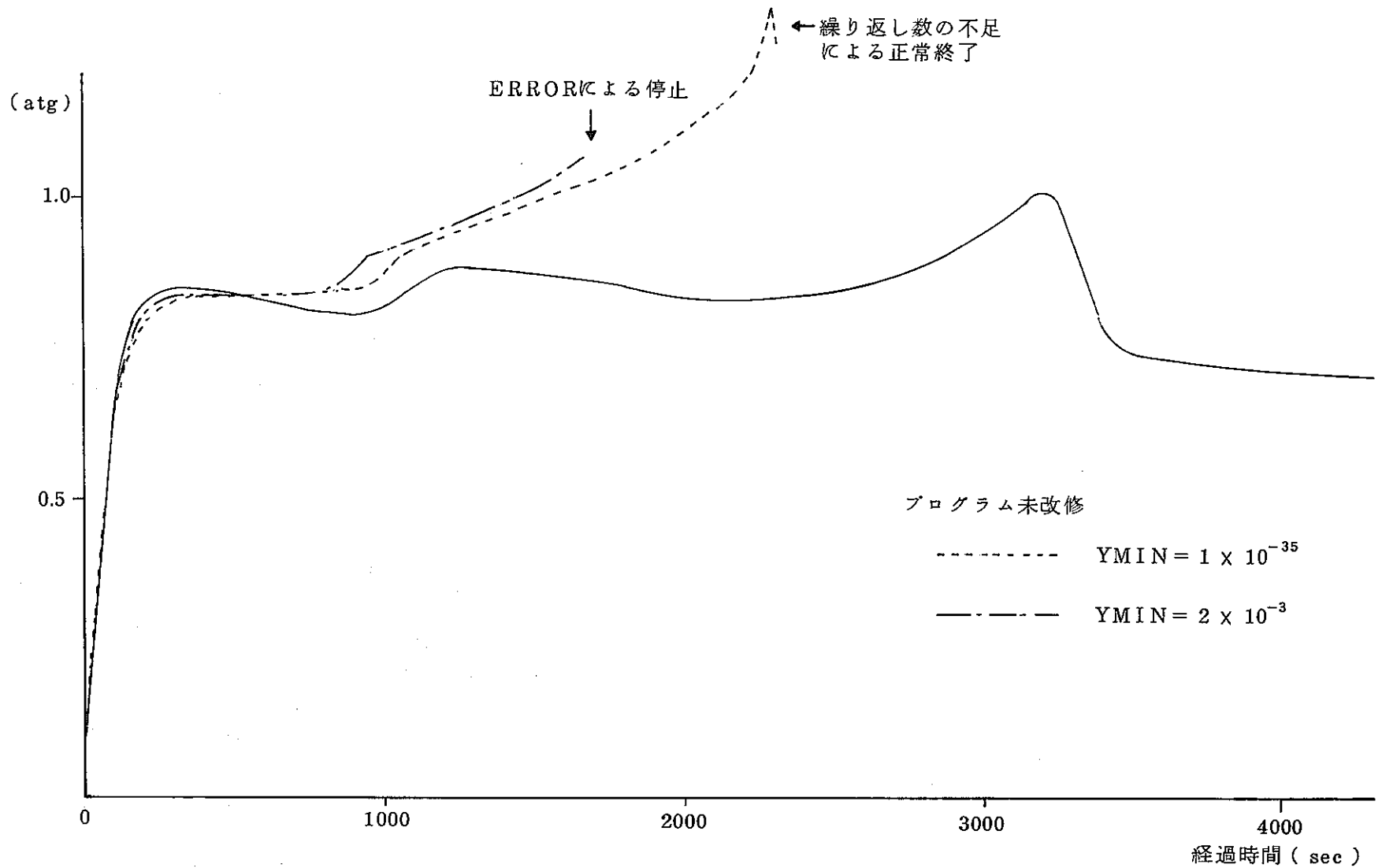


Fig-1 雰囲気圧力変化 (ホットレグ配管 $\frac{1}{4}$ D₁ 破損時)

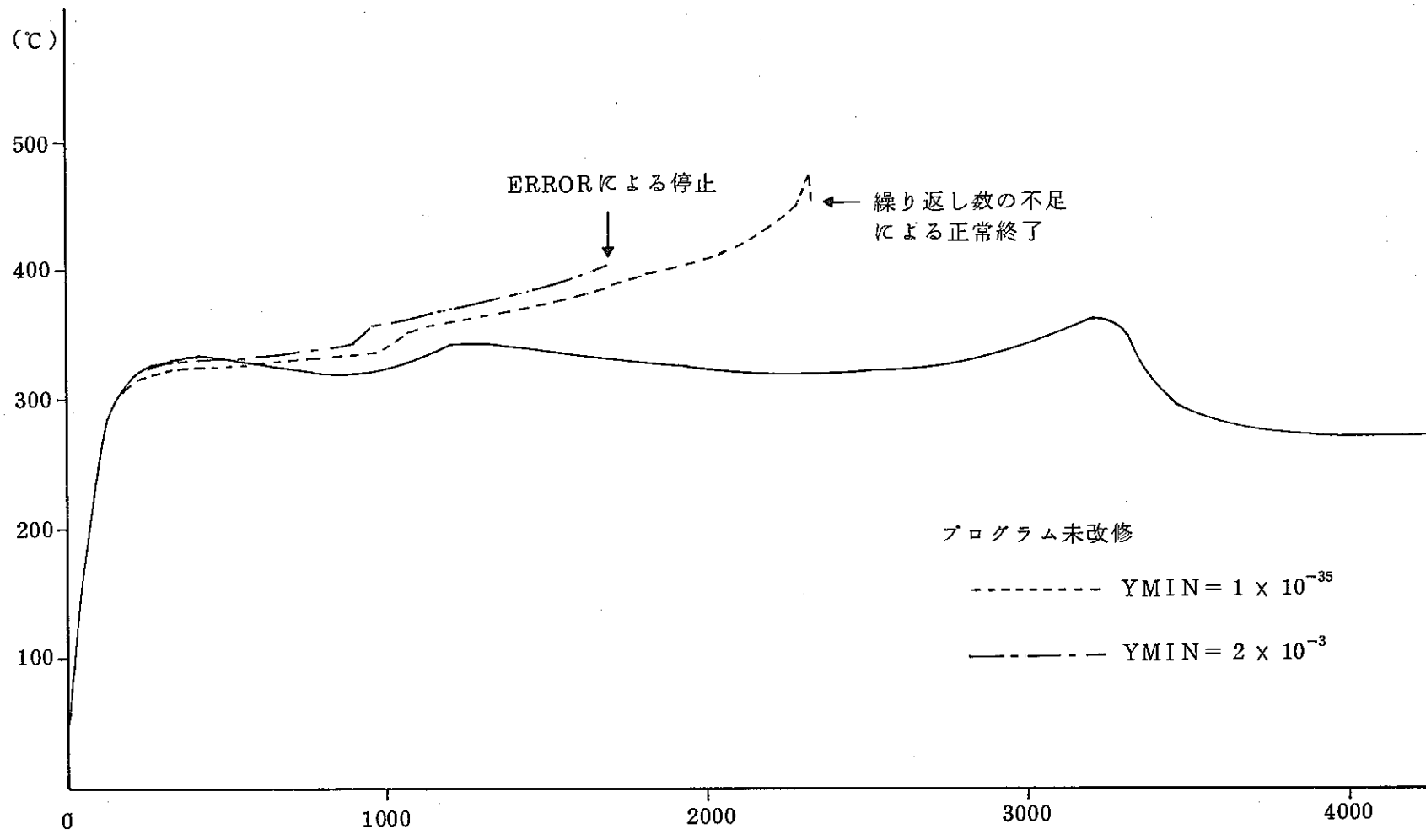


Fig-2 雰囲気平均温度変化(ホットレグ配管¼D₀ 破損時)

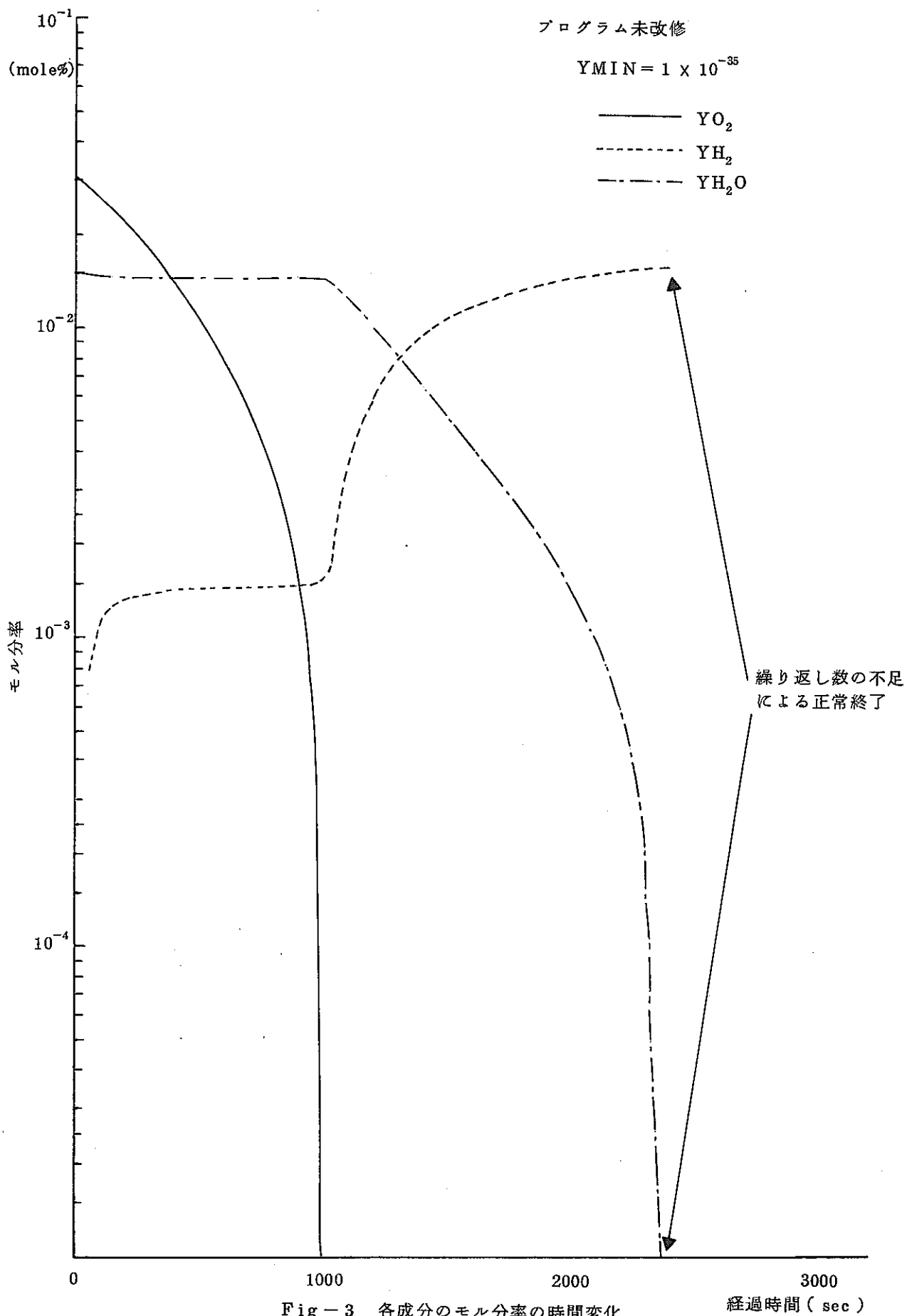


Fig-3 各成分のモル分率の時間変化

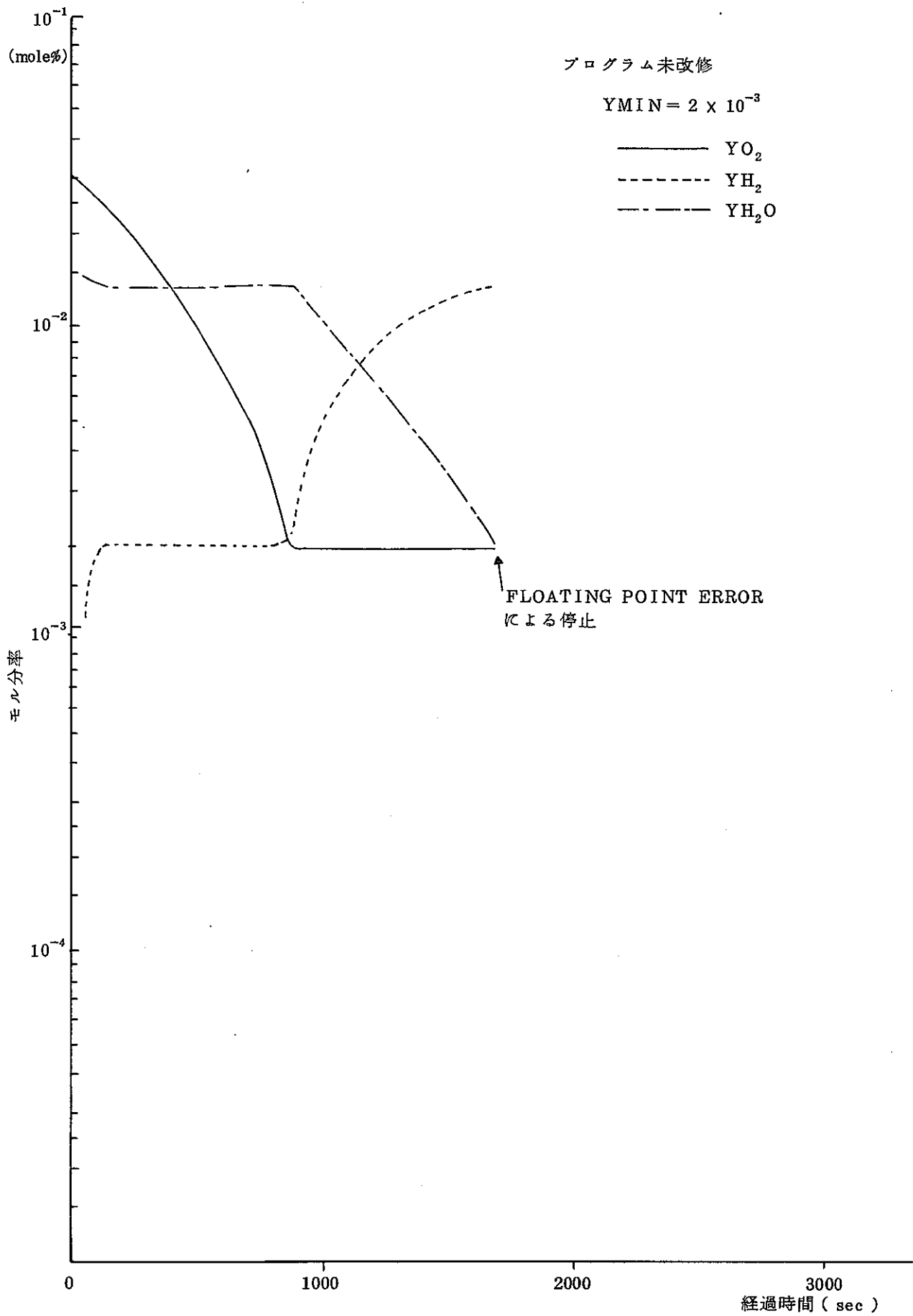


Fig - 4 各成分のモル分率の時間変化

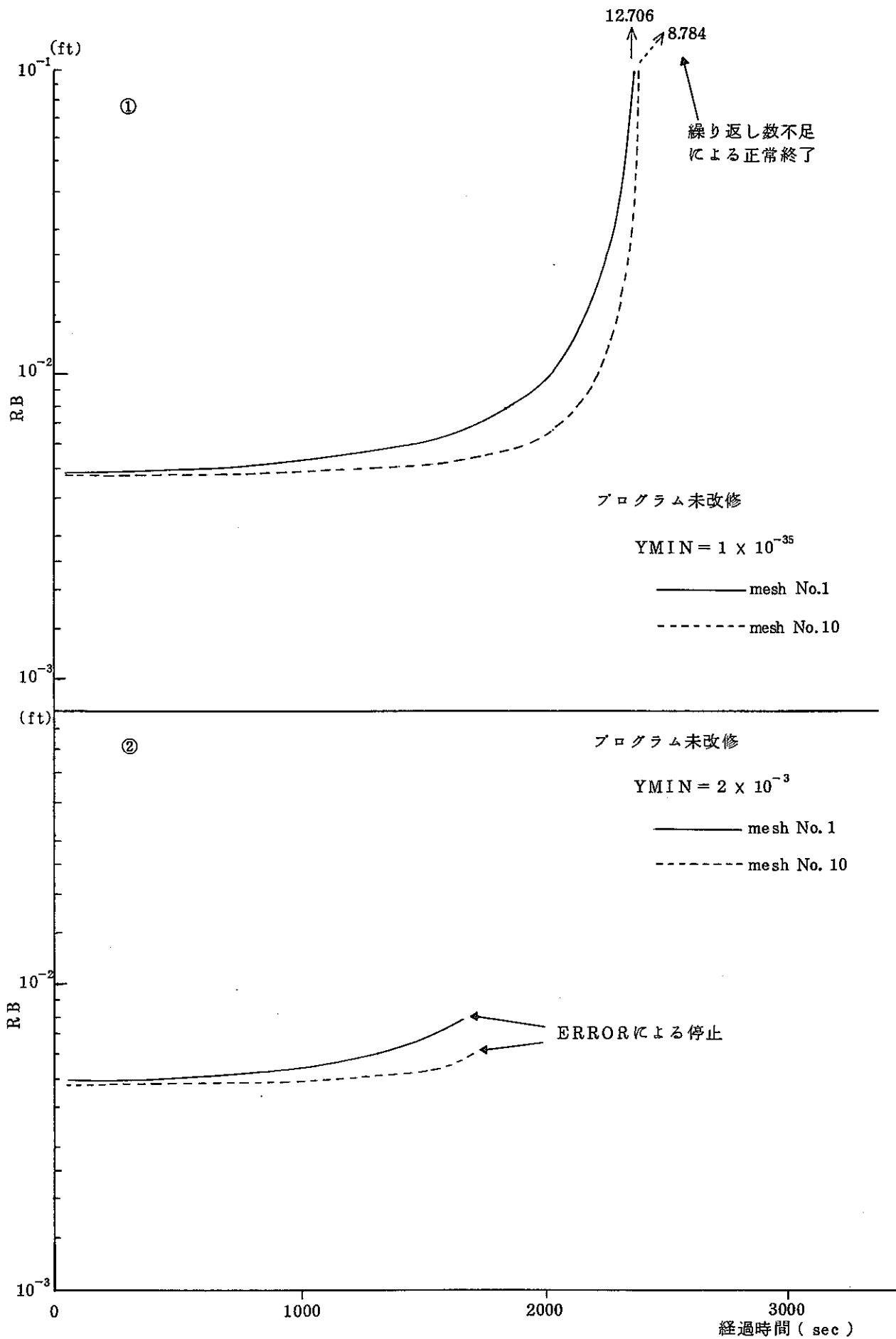


Fig - 5 燃焼半径の時間変化

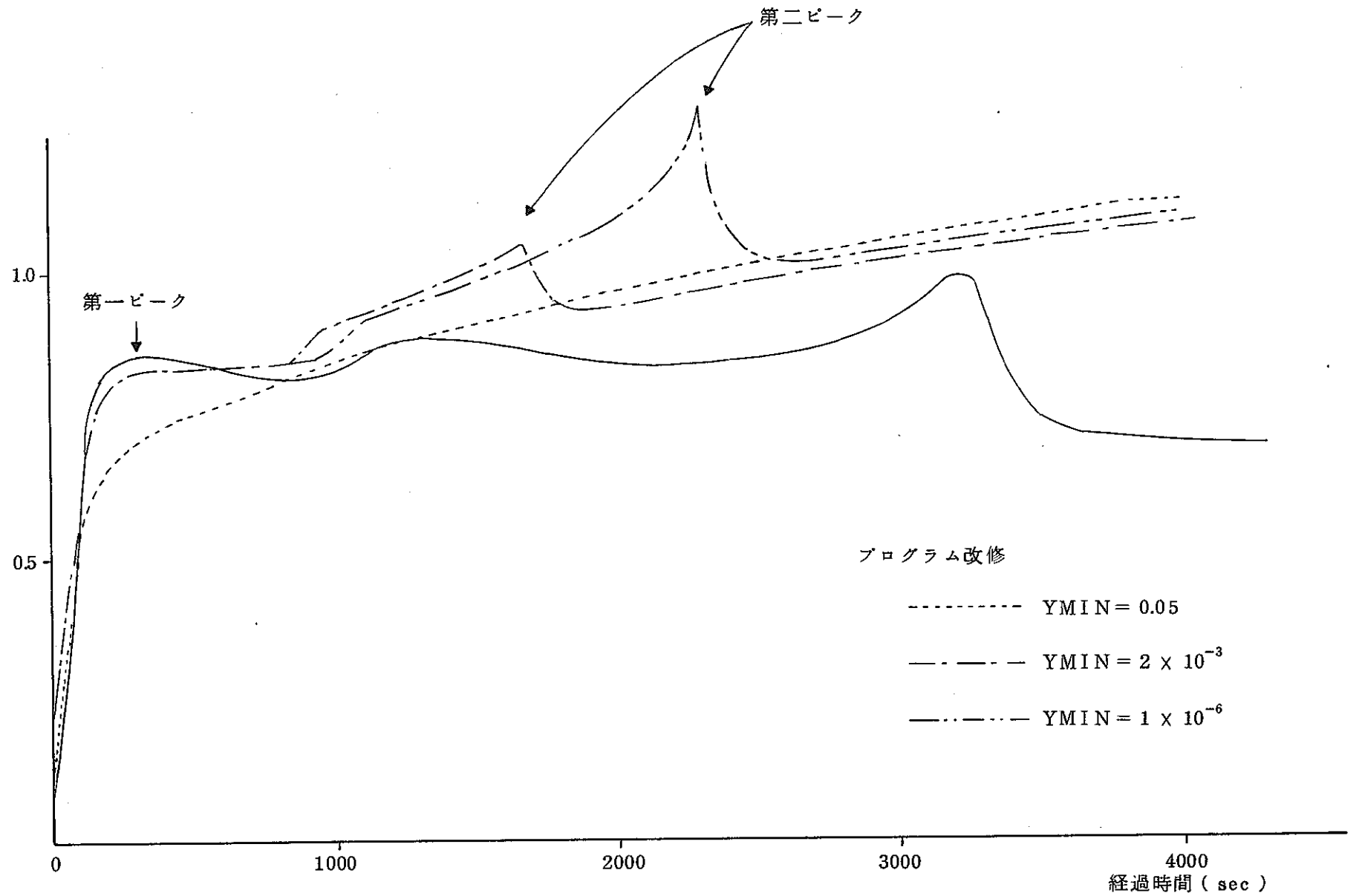


Fig - 6 蒸気圧力変化 (ホットレグ配管 $\frac{1}{4} D_t$ 破損時)

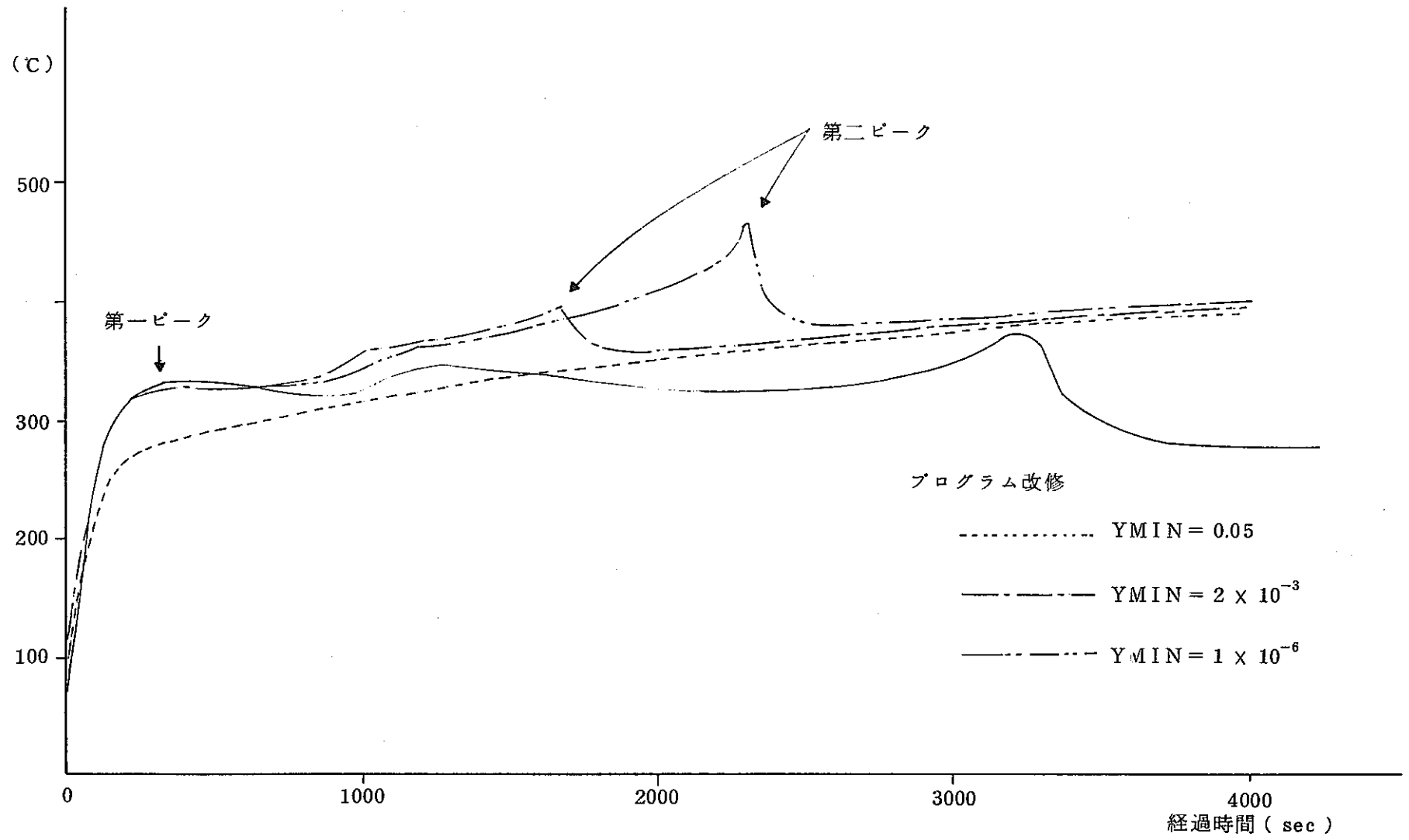


Fig-7 霧囲気平均温度変化 (ホットレグ配管 $\frac{1}{4} D_t$ 破損時)

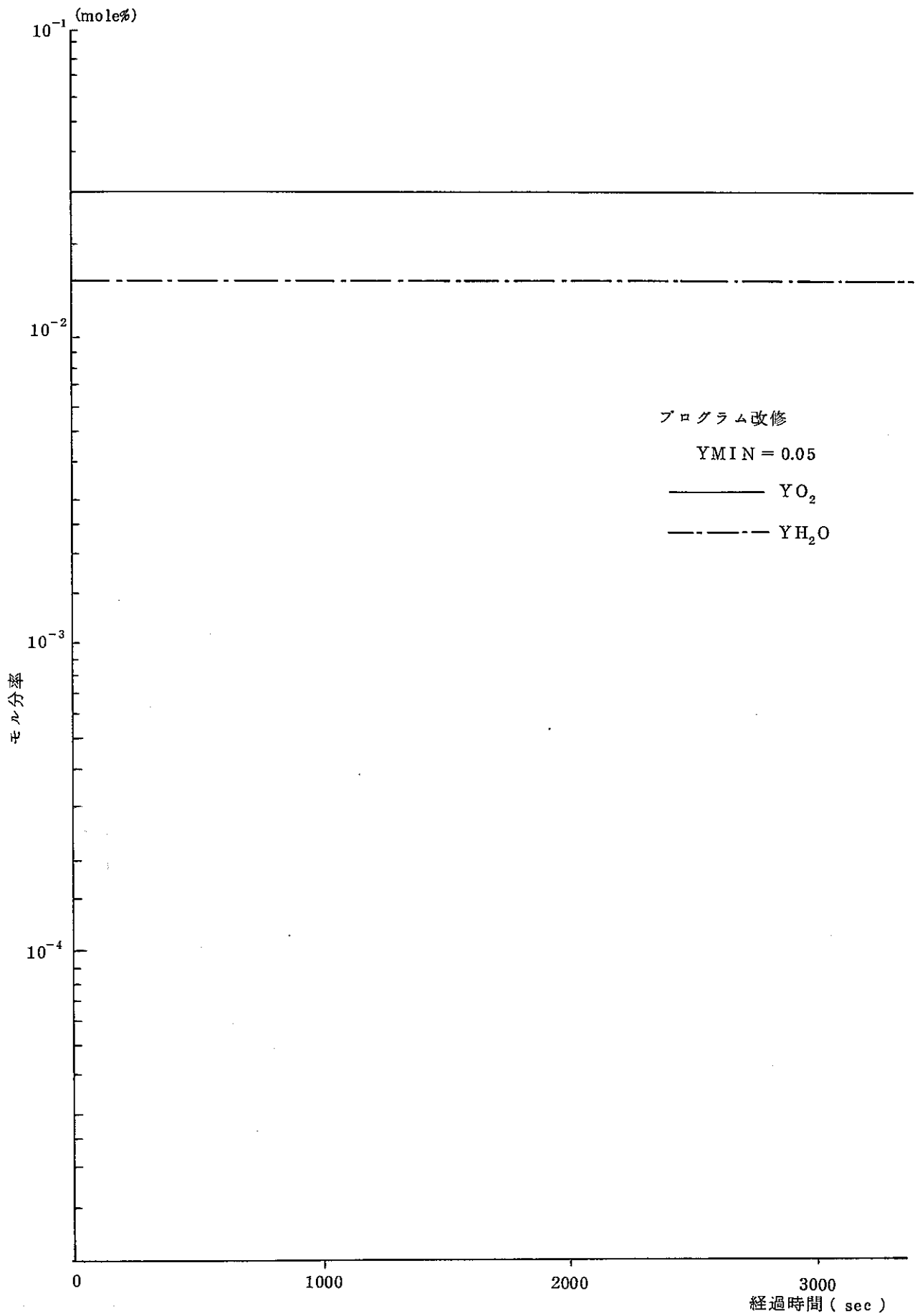


Fig - 8 各成分のモル分率の時間変化

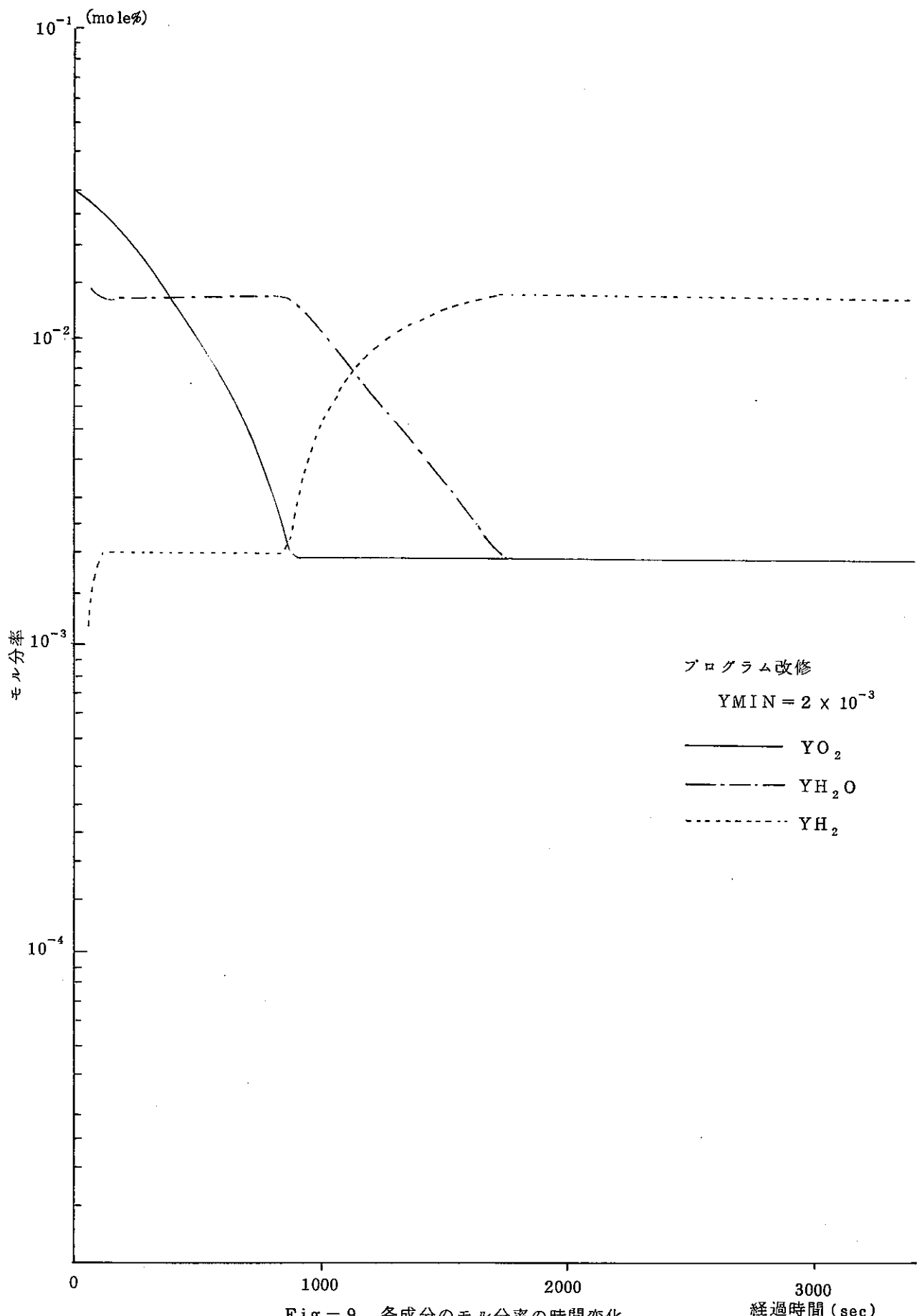


Fig-9 各成分のモル分率の時間変化

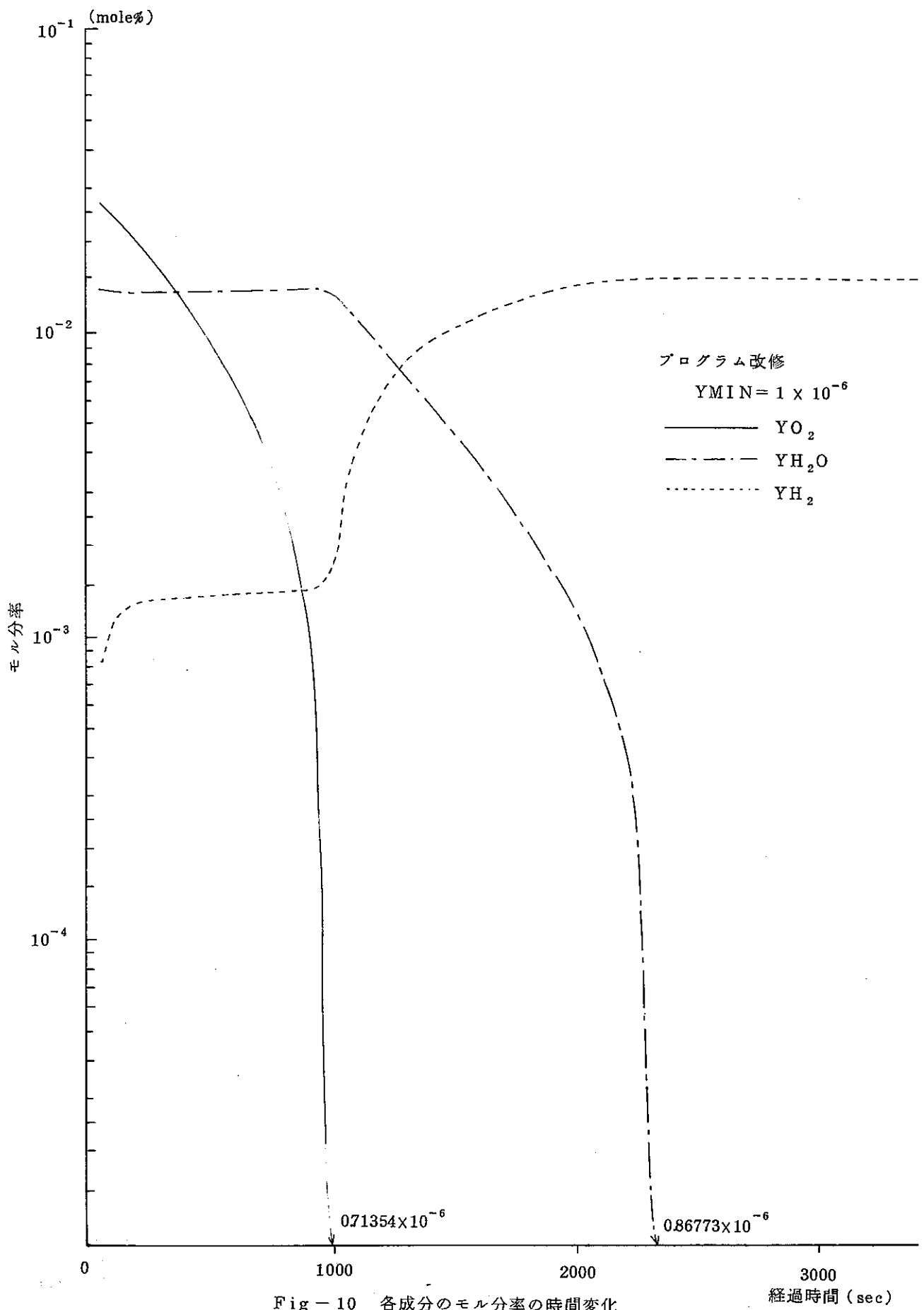


Fig - 10 各成分のモル分率の時間変化

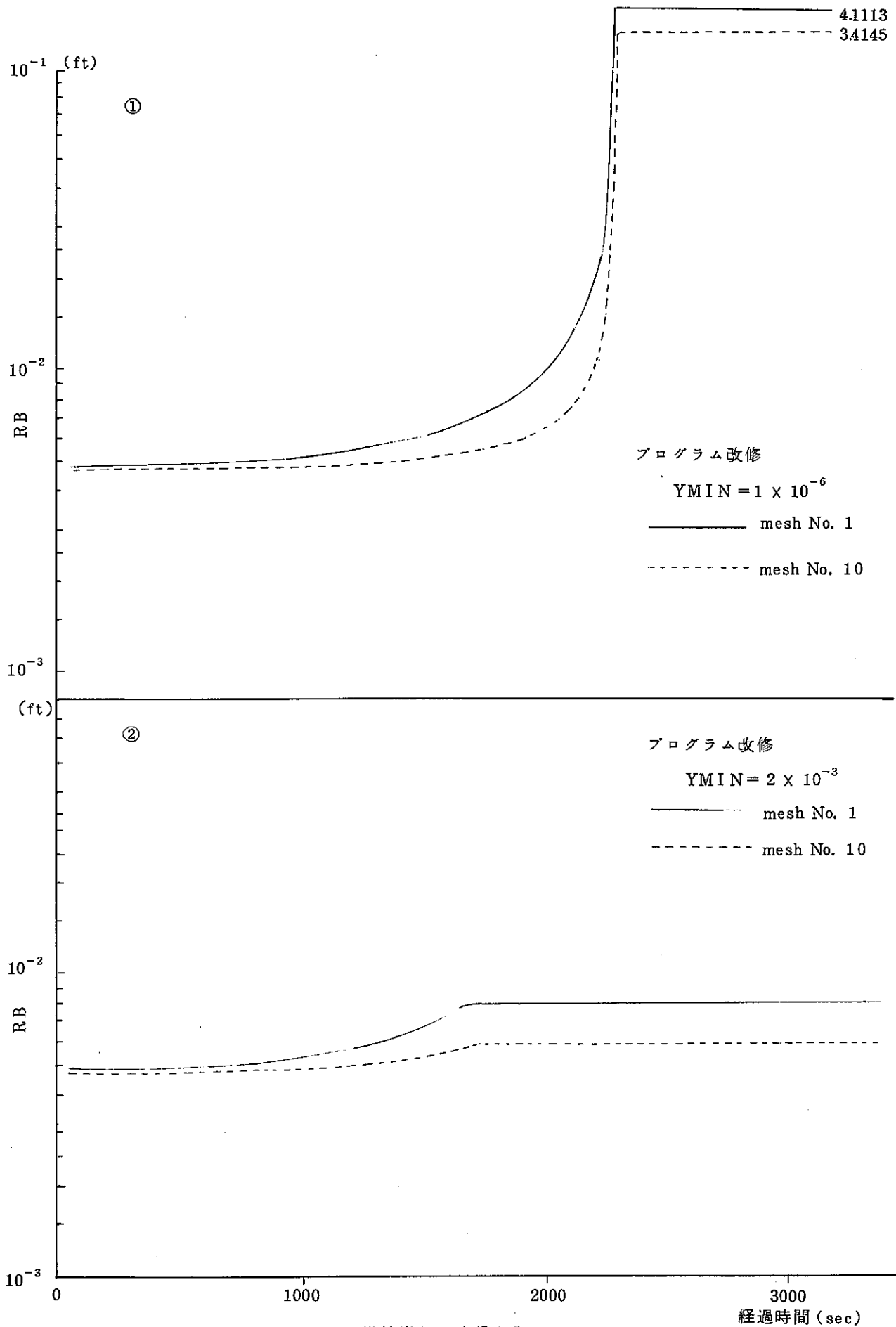


Fig - 11 燃焼半径の時間変化

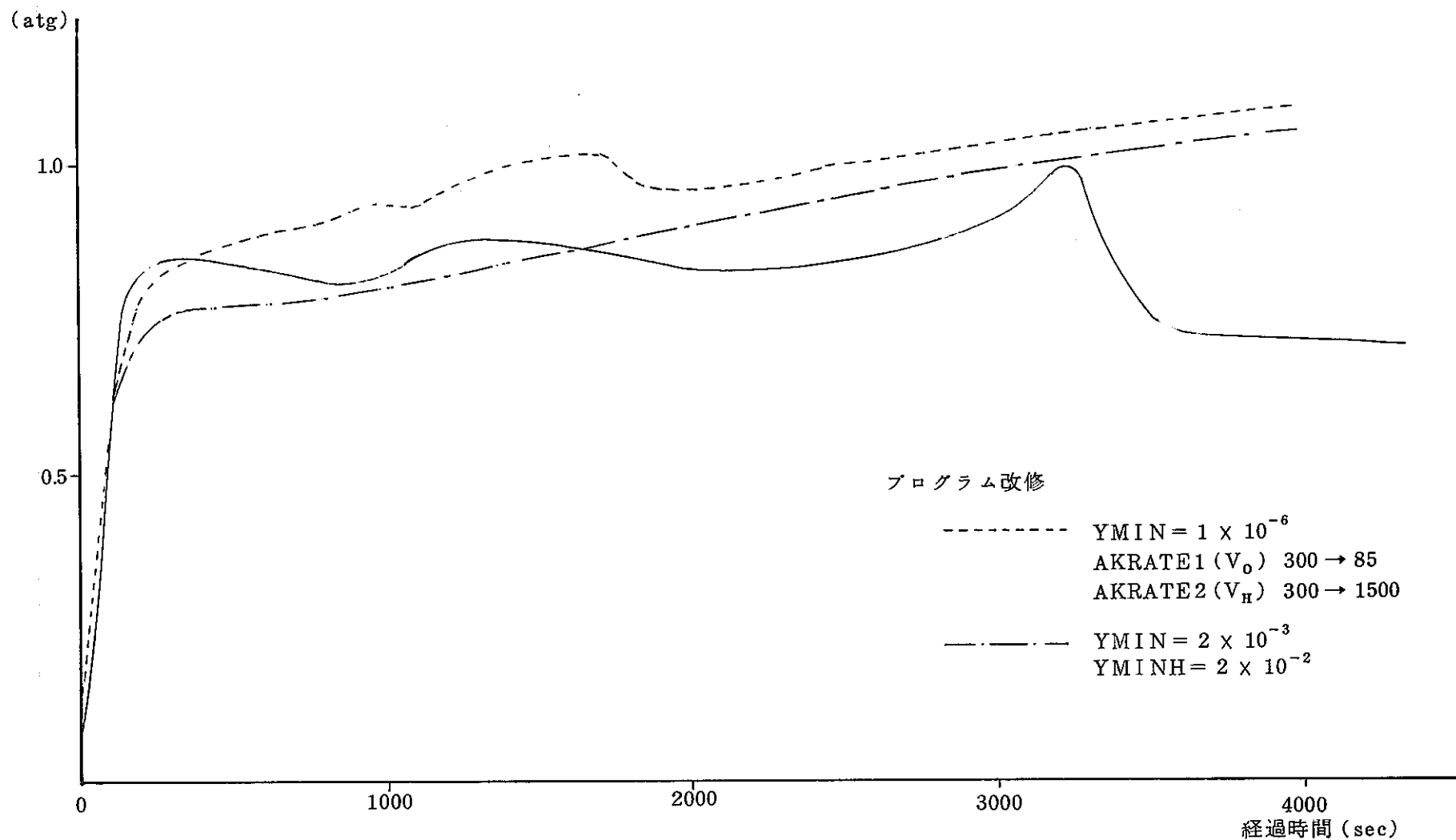


Fig-12 霧囲気圧力変化 (ホットレグ配管 $\frac{1}{4} D$, 破損時)

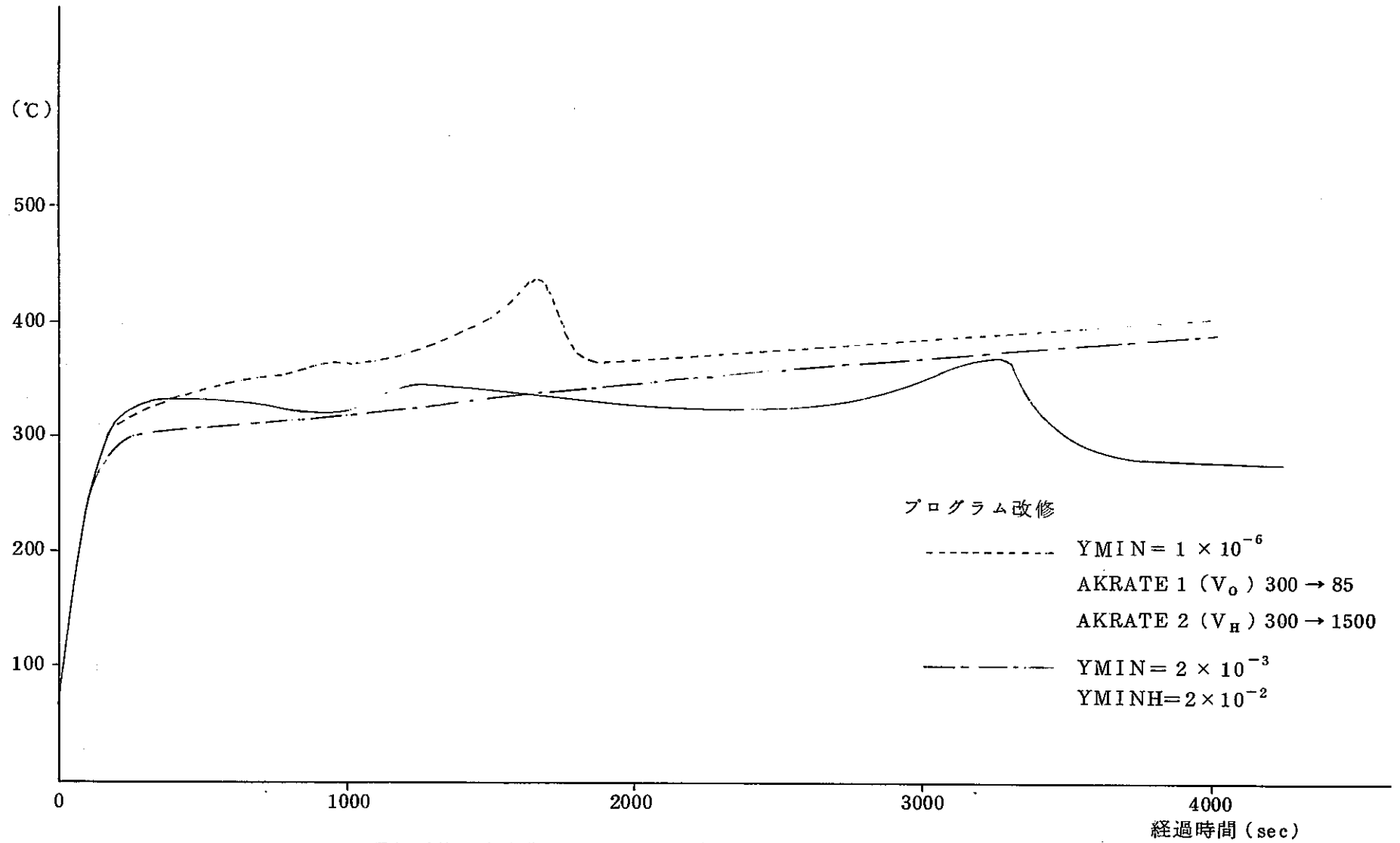


Fig - 13 雰囲気平均温度変化 (ホットレグ配管 ¼ D_t 破損時)

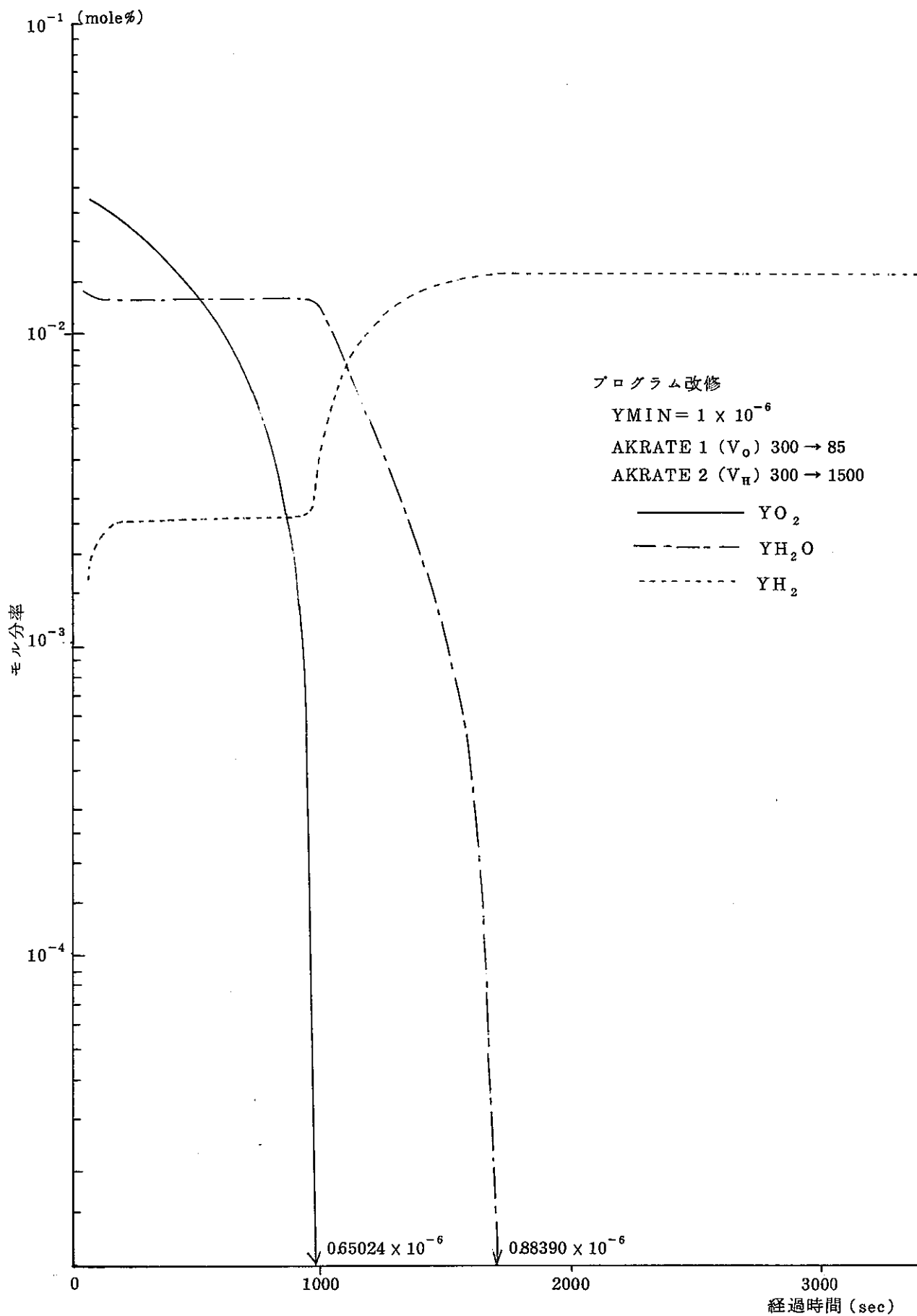


Fig - 14 各成分のモル分率の時間変化

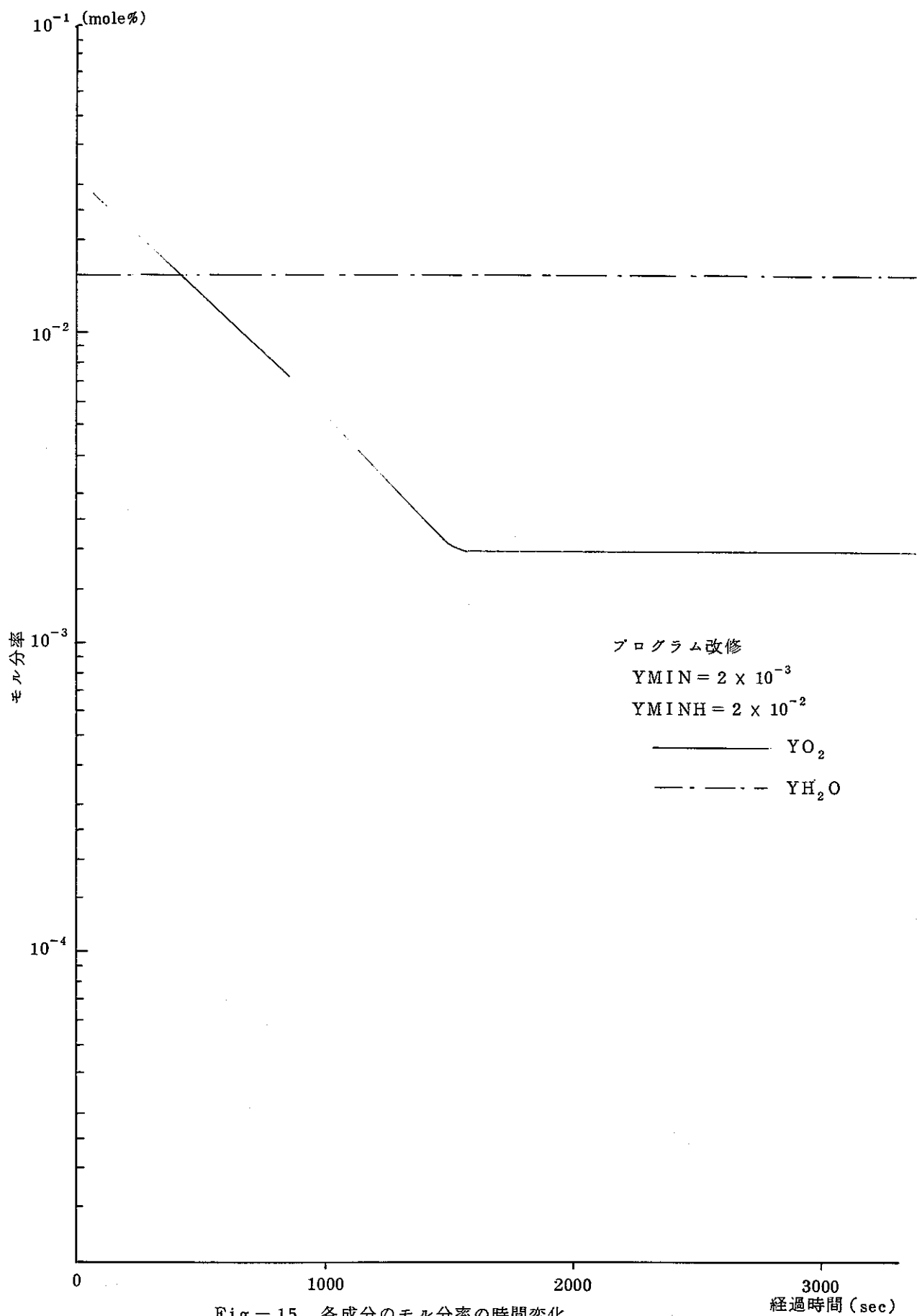


Fig - 15 各成分のモル分率の時間変化

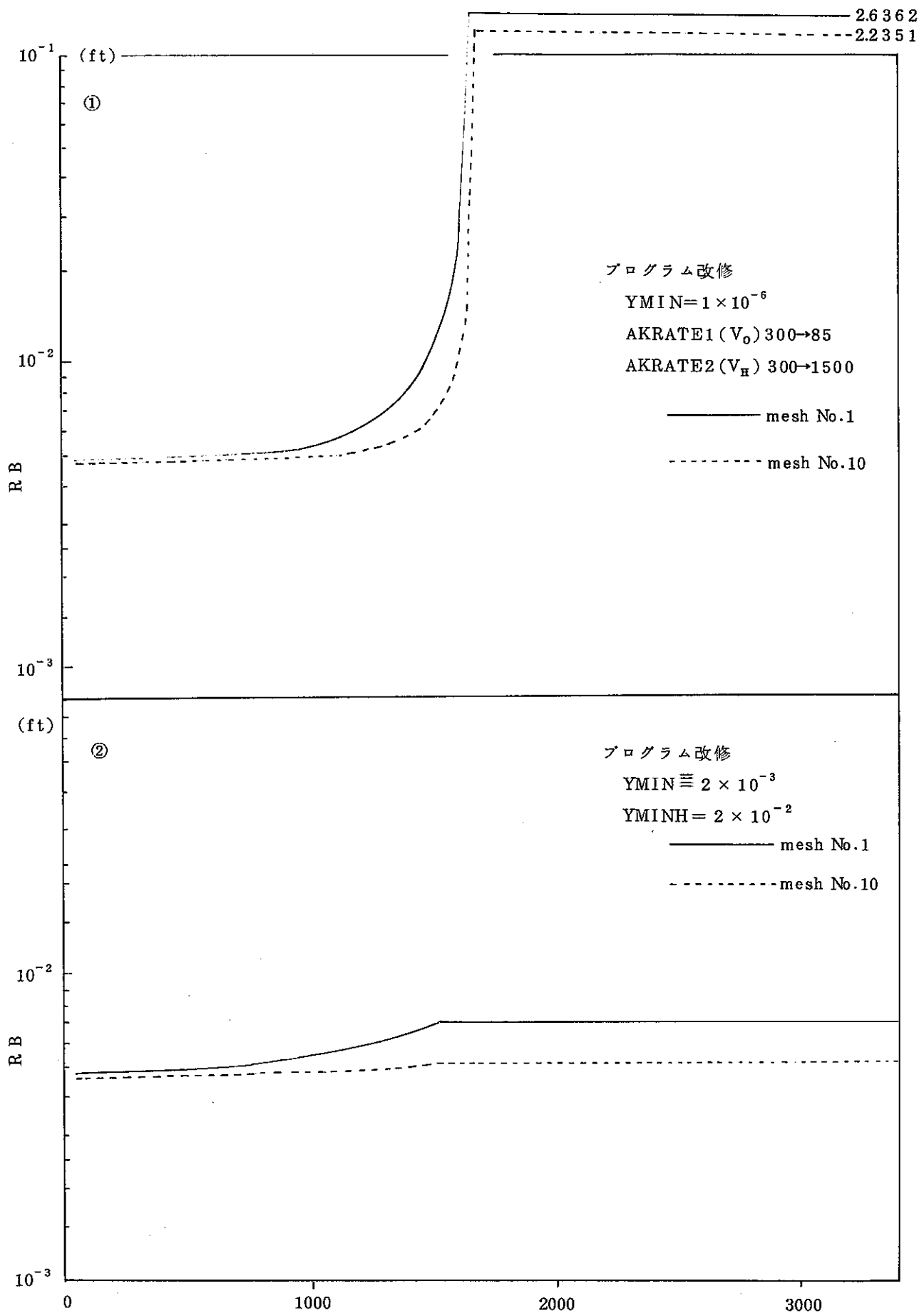


Fig-16 燃焼半径の時間変化

経過時間 (sec)

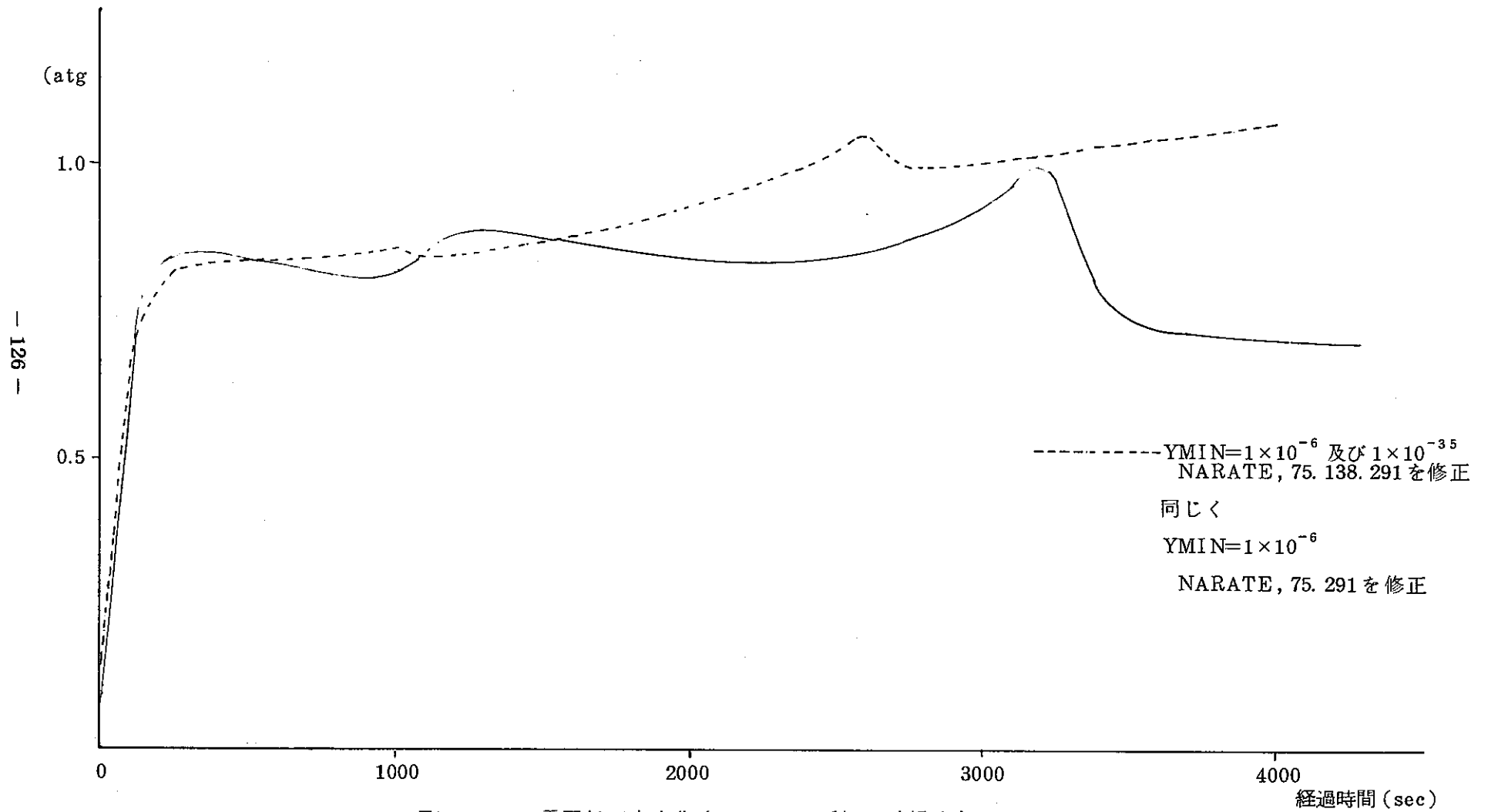


Fig-17 雰囲気圧力変化 (ホットレグ 1/4 D_t 破損時)

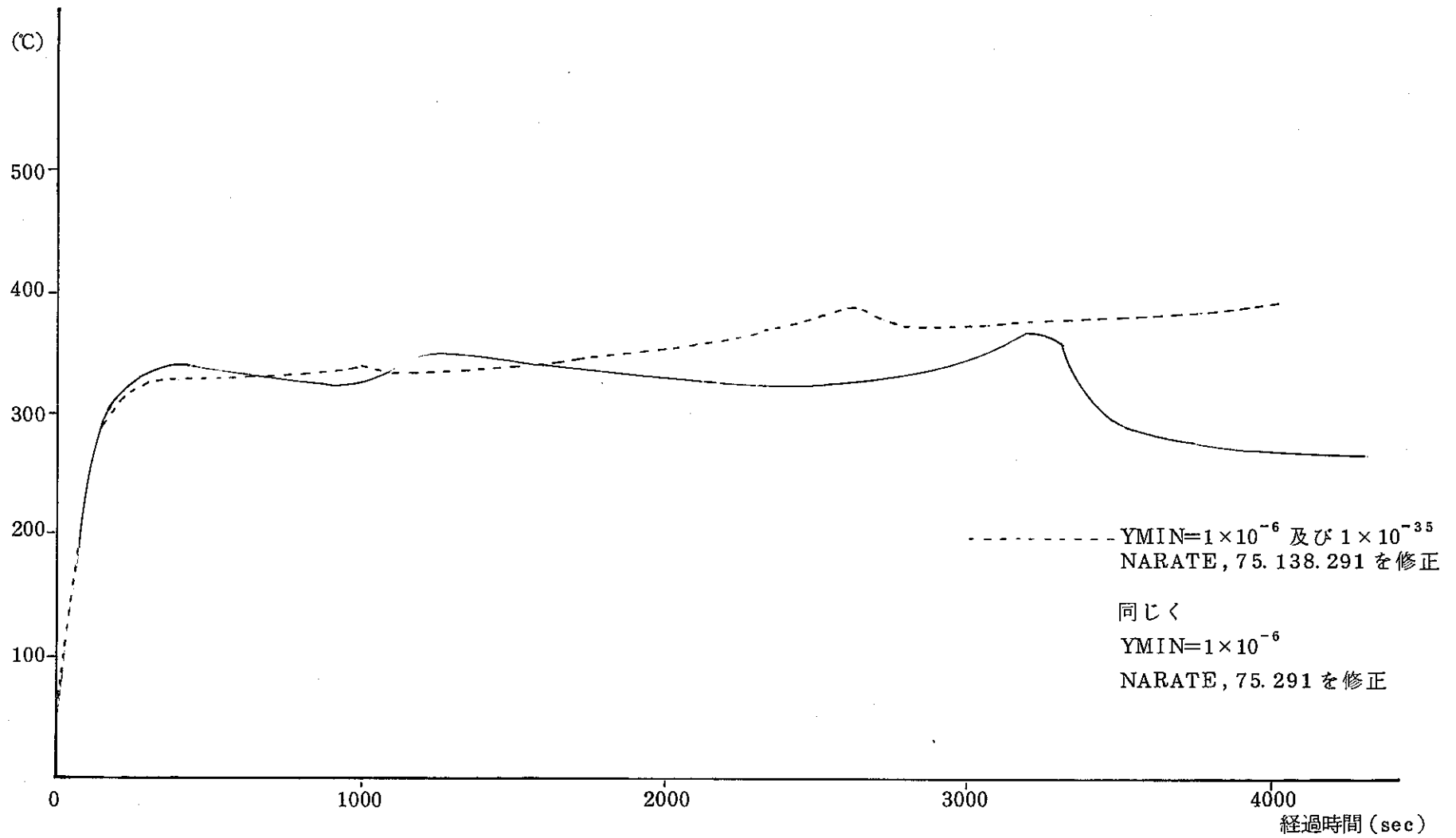


Fig-18 雰囲気平均温度変化 (ホットレグ $\frac{1}{4} D_1$ 破損時)

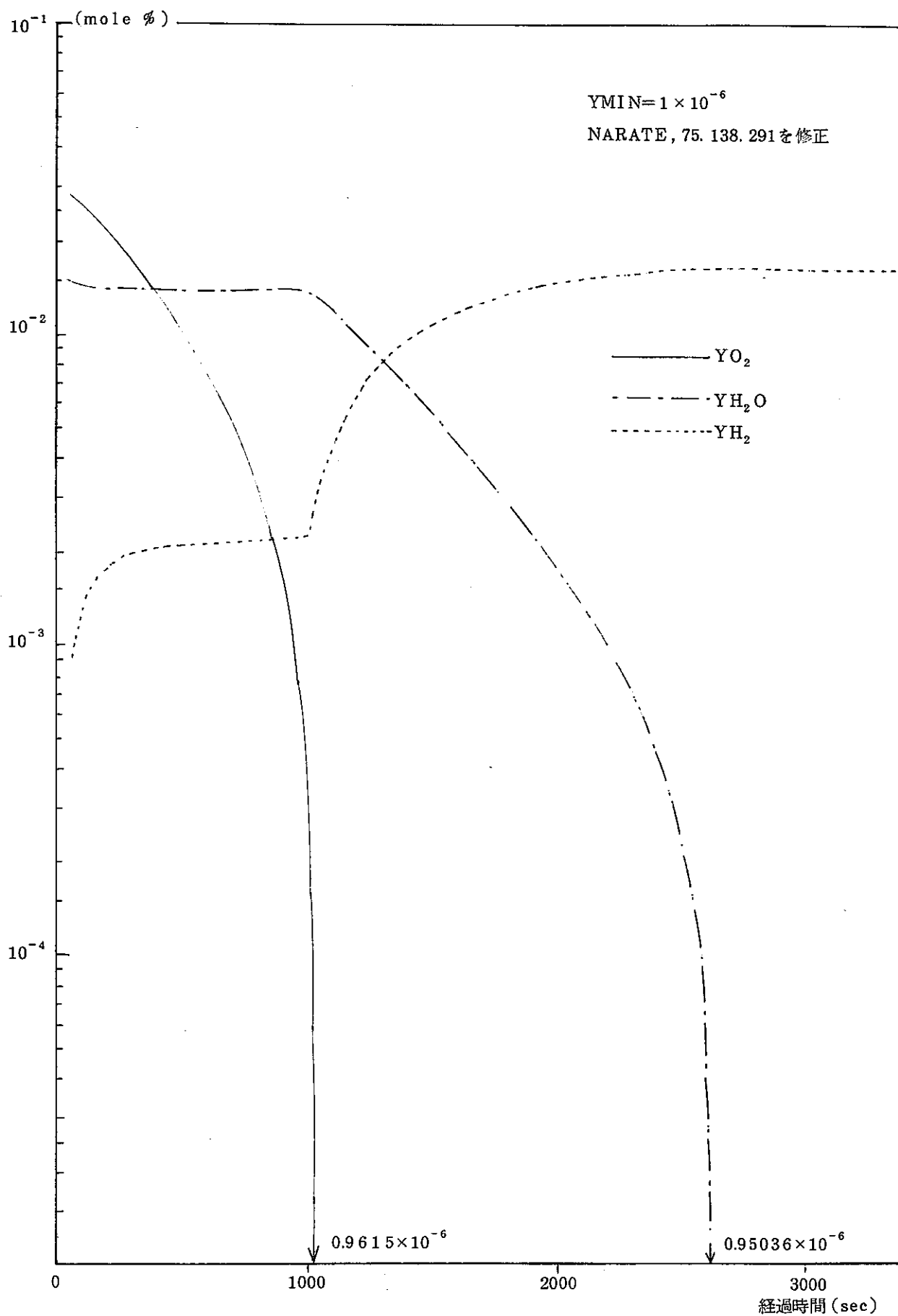


Fig-19 各成分のモル分率の時間変化

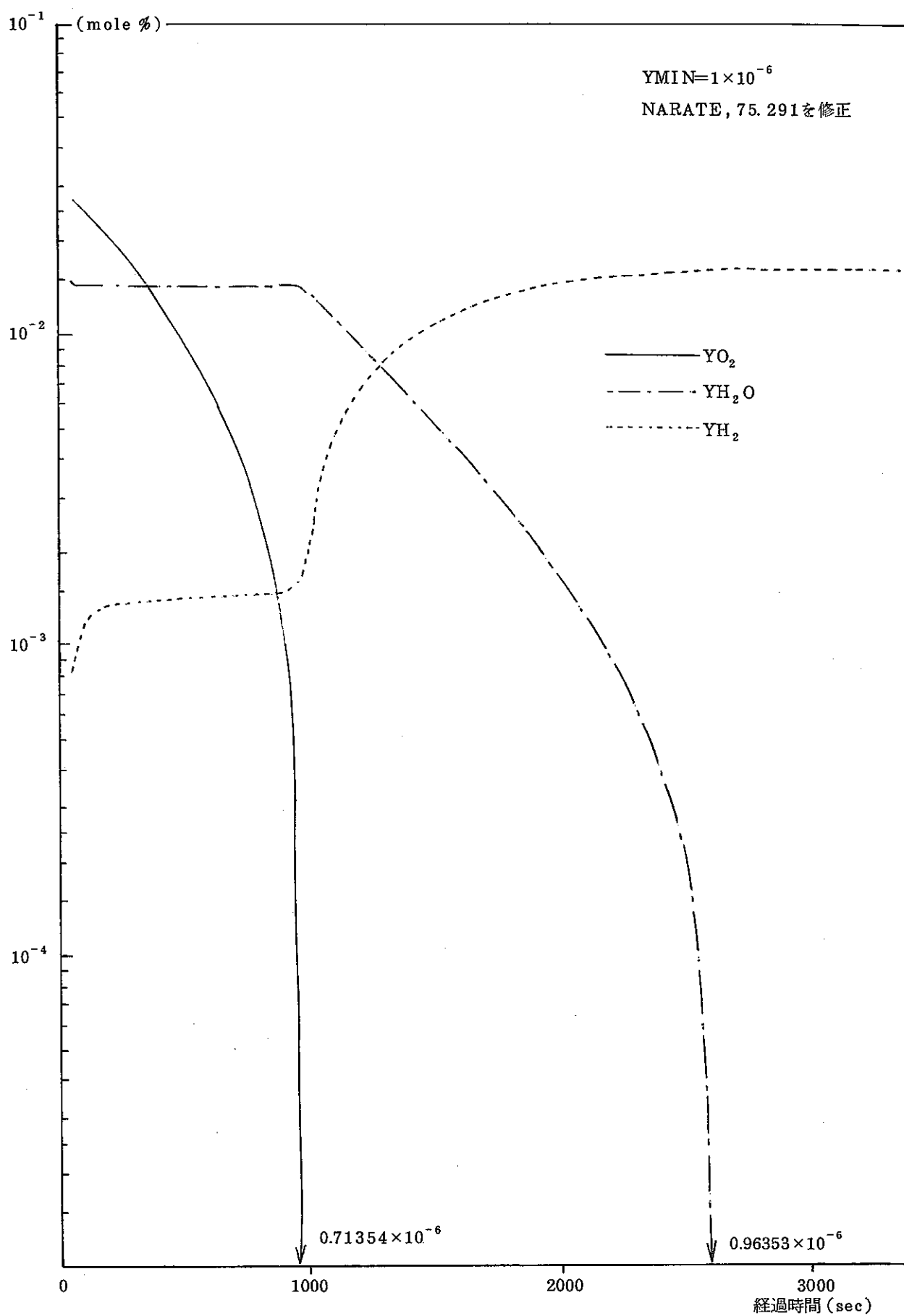


Fig-20 各成分のモル分率の時間変化

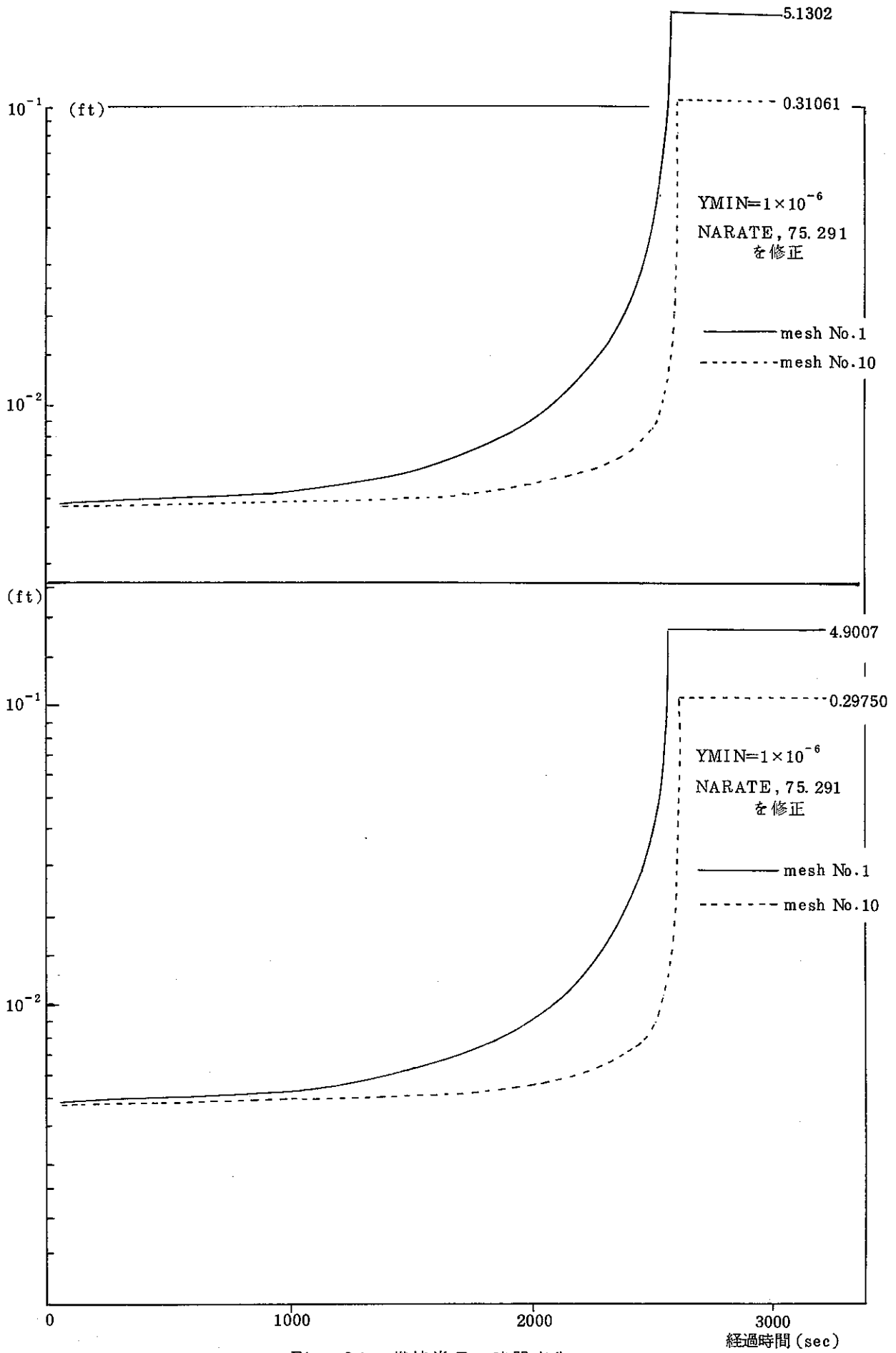


Fig-21 燃焼半径の時間変化

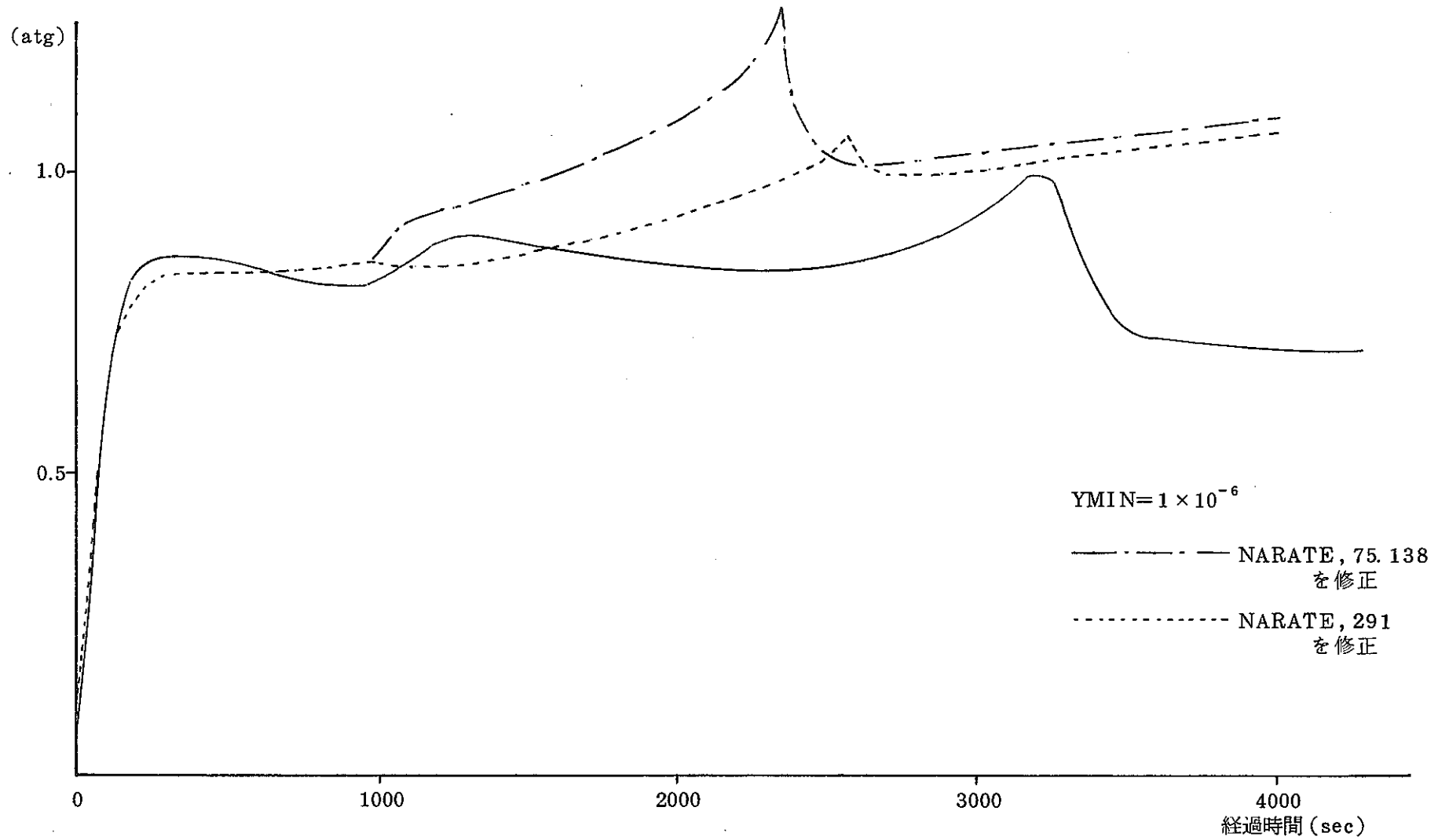


Fig-22 雰囲気圧力変化 (ホットレグ配管 $\frac{1}{4} D_t$ 破損時)

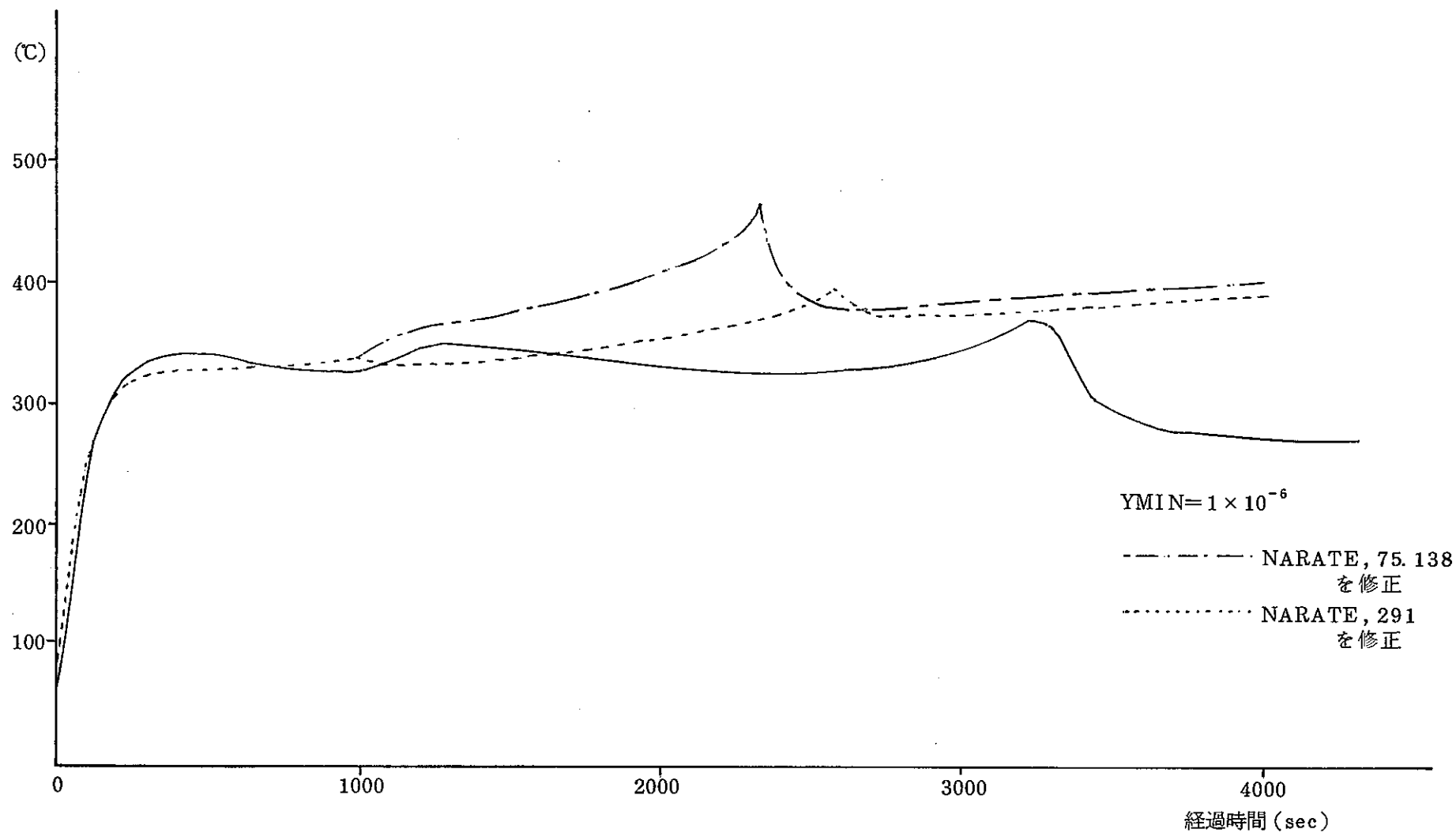


Fig-23 雰囲気平均温度変化 (ホットレグ配管 $\frac{1}{4} D_t$ 破損時)

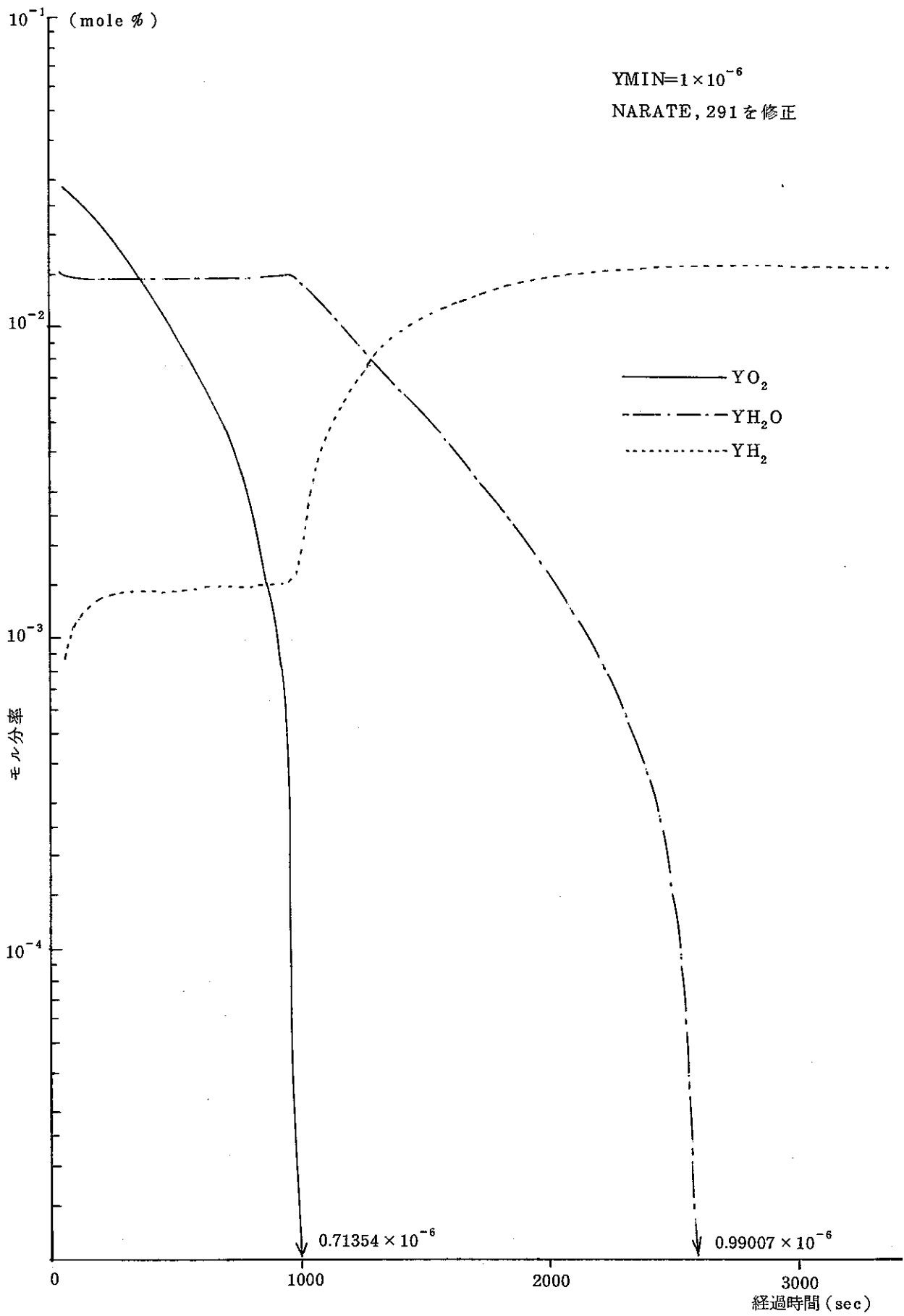


Fig-24 各成分のモル分率の時間変化

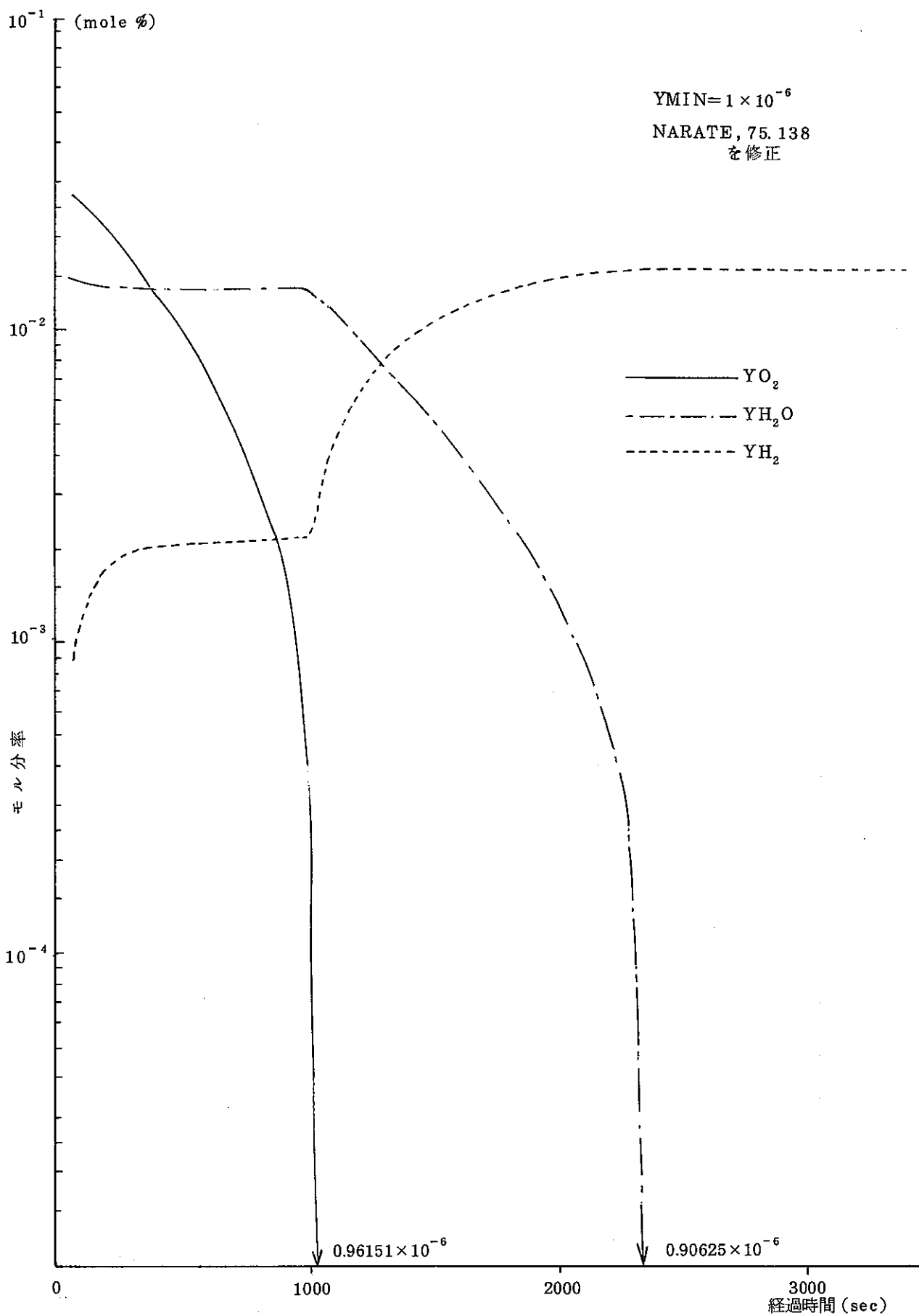


Fig-25 各成分のモル分率の時間変化

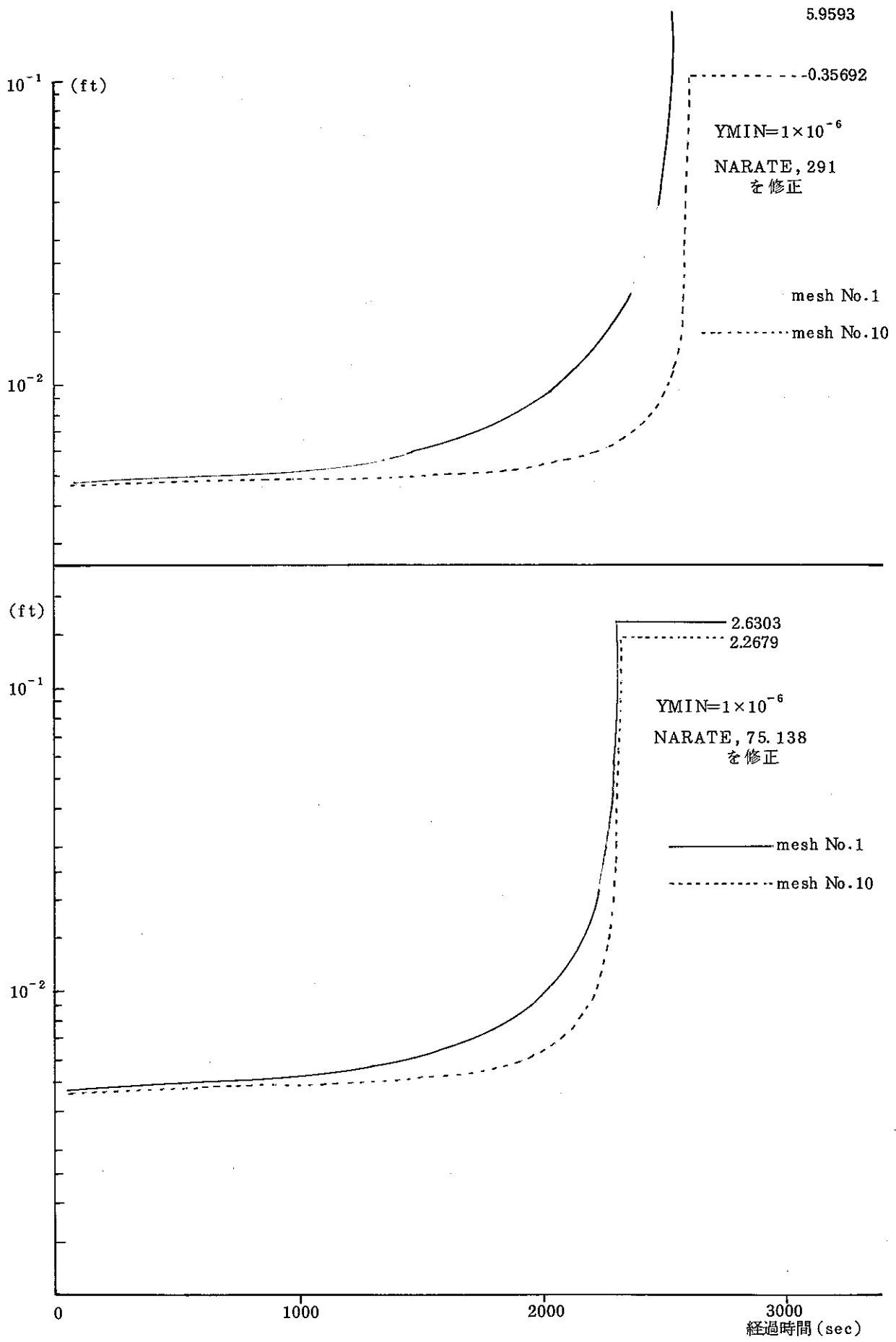


Fig-26 燃焼半径の時間変化

○ ま と め

以上の修正結果を雰囲気圧力変化のグラフで、比較したものが次頁である。

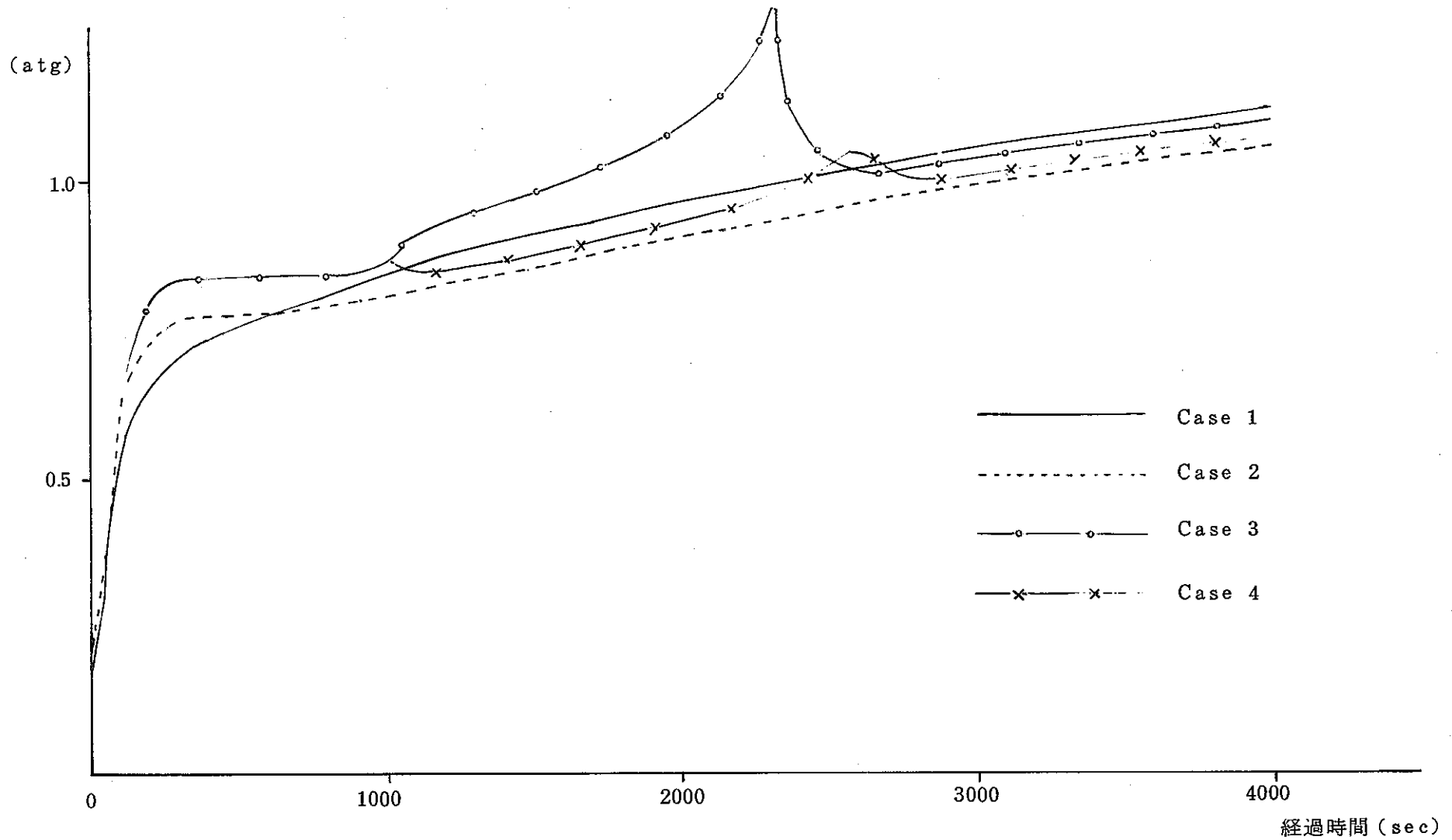
Case 1 : TABLE-2 のみの修正, ナトリウムと酸素及び水蒸気の反応をいずれも無視したものの。

Case 2 : TABLE-2 のみの修正, ナトリウムと酸素の反応のみを考慮し, 水蒸気との反応を無視したものの。

Case 3 : TABLE-2 のみの修正, ナトリウムと酸素及び水蒸気の反応をいずれも考慮したものの。

Case 4 : TABLE-2, 3 の両方を修正, ナトリウムと酸素及び水蒸気の反応をいずれも考慮したもので, $Y_{MIN} = 1 \times 10^{-6}$ 及び 1×10^{-35} 。

Case 1 及び 2 は, TABLE-2, 3 の両方を修正しても同じ結果が得られる。



霧囲気圧力変化 (ホットレグ配管 $\frac{1}{4} D_t$ 破損時)

(2) SPRAYコード使用上の問題点に対する対策

「目的」

日立のナトリウムスプレー燃焼実験のSPRAYコードによる解析では、初期ナトリウム温度が300℃と低いケース(RUN-4)で、計算が途中でストップする事が報告^{*)}されている。そこで、その原因を究明するための計算を行った。

計算はSPRAY-3Aコードで行い、^{*)} 入力^{*)}は報告書に記載されているRUN-4試験のデータ(表1)を用いた。

*) ナトリウムスプレー燃焼の解析, PNC SJ202 81-07 (1981年3月)

「結果と考察」

(1) スプレーコーンのメッシュを10分割($NV=10$)として、日立の計算を追試したところ、サブルーチンNARATEでlogのアンダーフローエラーが発生した。これは、ナトリウムの飽和蒸気圧($PSAT$)が負になったためである。又、この時、セルのガス圧力(PG)、平均ガス温度($TGSV$)、スプレーコーン外側の平均ガス温度($TGOUT$)も負の値となっていた。

(2) $PSAT$ は、ナトリウムの状態方程式より求めているが、雰囲気圧力(P)を超えた場合は、 $PSAT=P$ として与えられる。 P は $TGSV$ を用いて気体の状態方程式から導かれ、 $TGSV$ は、スプレーゾーンの平均ガス温度($TGAV$)と、 $TGOUT$ を平均化して求めている。

SPRAYコードでは、熱移行の計算は、explicitに行われ、このタイムステップは、ナトリウム液滴が各メッシュを通過する時間として決められる。又、スプレーされたナトリウムによって形成されるプールと、周囲の雰囲気との熱移行も考慮している。

従って、ナトリウム温度が低く、ナトリウム液滴径が小さい場合は、周囲の雰囲気とナトリウムプールとの温度差が大きくなるので、雰囲気からプールへの熱移行量が大きくなると考える。

(3) 以上の結果と考察から、スプレーコーンのメッシュを30分割($NV=30$)として、再度計算を行ったところ、正常に終了した。この時のガス圧力(PG)の時間変化を図1に示す。

「結論」

SPRAYコードでは、熱移行の計算をexplicitに行い、このタイムステップは、ナトリ

ウム液滴が各メッシュを通過する時間として決めているので、ナトリウム温度が低く、ナトリウム液滴径が小さい場合にはスプレーコーンのメッシュ数(NV)を細かくしなければなら
ない。

表 1.

SPRAY CODE INPUT DATA
 FORMAT 8E10.0 AND 8I10

Card No. Title Card ≤ 60 characters ("Q" in cc-1 of title card for heat balance output)

1								
2	DI	ALINER	PSIA	TGI	TSI	YH2s	VOL	H
3	FNA	SMAX	TMAX	XS(1)	THETA	YOI	OIAM	HCELL
4	CPS	XSCALE	YSCALE	CPI	V2	XMULT	SIGMA	
5	NV	NPRT	NPI	NCURVE	ITABL	NTEST	HA2O2	

Release Rate Table
 Time(sec) Rate(lb/sec)

SIGMA = Geom. Std. Dev. of droplet distribution (default = 2.64)	0	1.	_____
DI = Initial mean droplet diameter (in) (mass or volume mean)	0.026	2.	_____
ALINER = Cell wall area (ft ²) (default = π·DIAM·(DIAM/2 + HCELL))	0	3.	_____
PSIA = Initial gas pressure (psia)	14.69	4.	_____
TGI = Initial gas temp. (°F)	68.0	5.	_____
TSI = Initial sodium temp. (°F)	572.0	6.	_____
YH2s = Initial water vapor fraction	0	7.	_____
VOL = Gas volume (ft ³)	68.15	8.	_____
H = Spray cone height (ft) (H ≤ HCELL)	8.20	9.	_____
FNA = Constant sodium release rate (lb/sec)	6.7914 × 10 ⁻²	10.	_____
SMAX = Sodium spray period (sec)	1.30	11.	_____
TMAX = Time duration of calculation (sec)	2.00	12.	_____
XS(1) = Effective diameter of spray impact area (ft) (<DIAM)	0.0072	13.	_____
THETA = angle subtended by spray cone (radians)	10.47	14.	_____
YOI = Initial oxygen concentration fraction	0.21	15.	_____
OIAM = Effective cell diameter (ft)	32.81	16.	_____
HCELL = Cell height (ft)	8.20	17.	_____
CPS = Wall heat capacity (Btu/ft ² - °F)	1.59	18.	_____
CPI = Impact plate heat capacity (Btu/ft ² - °F)	0.0	19.	_____
V2 = Secondary volume (ft ³)	0.0	20.	_____
XMULT = Multiplier for release rate table (default = 1.00)	0.0	21.	_____
XSCALE = Curve scale (sec/inch)	0.0	22.	_____
YSCALE = Curve scale (psi/inch)	0.0	23.	_____
NV = No. of volume increments	10及び30	24.	_____
NPRT = Print cycle, time steps per printout (time >SMAX)	4	25.	_____
NPI = Print cycle, time steps per printout (time ≤SMAX)	4	26.	_____
NCURVE = 0 No plot 1 Curve plot	0	27.	_____
ITABL = No. data pairs in release rate table (≤ 50)	0	28.	_____
NTEST = Not used		29.	_____
HA2O2 = Percent of Na ₂ O ₂ product.	0	30.	_____

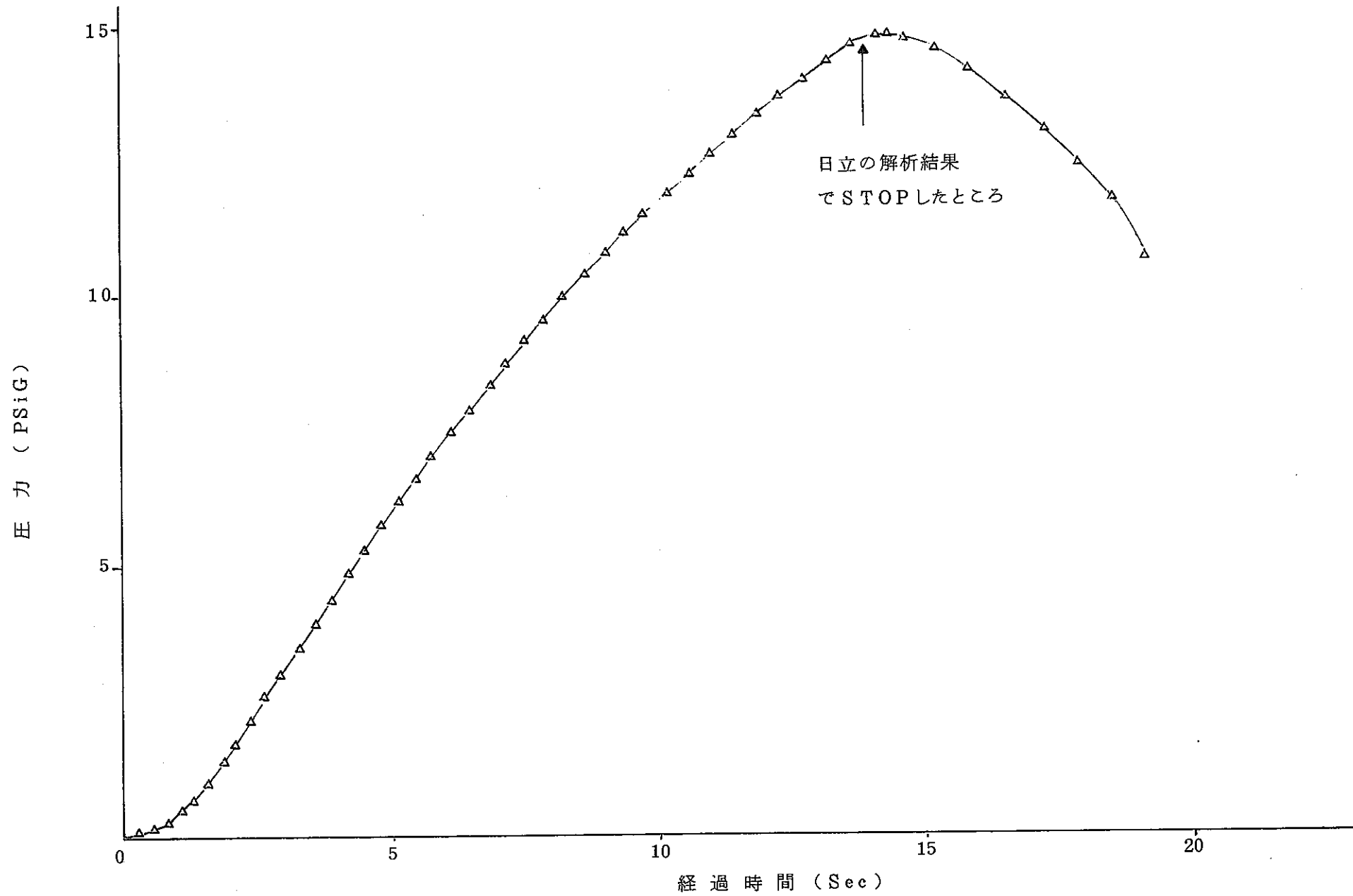


図 1. RUN - 4 の計算結果

(3) SPRAY-3MコードにおけるRESTART使用上の問題点について

「目的」

動燃の委託研究により、三菱重工で現在実施しているナトリウム・スプレー燃焼試験のPRE-CALCULATIONを、SPRAY-3Mコードを用いて行ったところ、RESTARTデータのfileへの書き出しに不備があることが判明した。

そこで、fileへの書き出しがうまく行われるように、コードの改修を行った。

「結果と考察」

- (1) RESTARTの操作を行ったところ、3回目以降のRESTARTデータは、2回目のRESTARTデータと同じfile (FT31) に書き出されていた。
- (2) SPRAY-3Mコードでは、RESTARTデータの書き出しは、MAINプログラム中の下記の部分で行われる。

```
CALL LOOP
```

```
CALL WRITRS (IIWRIT) ..... RESTARTデータのfileへの書き出し
```

```
WRITE(6, 880) IIWRIT ..... OUT PUTリストへの書き出し
```

```
IIWRIT=IIWRIT+1 ..... RESTARTデータの書き出しfile番号の指定
```

```
CALL RESTAT
```

IIWRITは、プログラム中で、IIWRIT=31と与えられており、1回目の計算が行われると、RESTARTデータはFT31にfileされる。又、それ以後のRESTARTデータは、FT32, FT33, ...へ順次fileされる。

しかし、上記FORMATでは、RESTARTデータは、FT31にfileされるのみである。

- (3) 以上の結果と考察により、RESTART用データの読み込みfile番号 (IIREAD)を用いて、コードを次のように変更し、RESTARTを行ったところ、問題は解決した。

```
CALL LOOP
```

```
IF (IIREAD.NE.0) IIWRIT=IIREAD+1 ← 新しく挿入
```

```
CALL WRITRS (IIWRIT)
```

```
WRITE(6, 880) IIWRIT
```

```
CALL RESTAT ← 削除
```

「結 論」

IF (I I R E A D . N E . 0) I I W R I T = I I R E A D + 1 を新しく挿入する。

I I W R I T = I I W R I T + 1 を削除する。

(4) SPRAYコード使用上の問題点に対する対策(Ⅱ)

「目的」

動燃の委託研究により、三菱重工で現在実施しているナトリウム・スプレー燃焼試験のPRE-CALCULATIONを行ったところ、初期ナトリウム温度400℃、液滴径0.85mm、初期酸素濃度21%(RUN B-1)のケースで、エラーが発生し、計算が途中でストップした。

そこで、その原因を究明し、コードの改修を行った。

計算は、SPRAY-3Mコードで行った。

「結果と考察」

- (1) 表1に示したデータを用いて計算を行ったところ、シュミレーション時間32秒付近で、1nのアンダーフローエラーが発生した。これはサブルーチンNARATE中の、ナトリウムの質量移行率(YKNA)、及び液滴の燃焼ゾーン半径(R2)を求めている部分であり、次の式によって与えられている。

$$YKNA = YKNA * DYDR / ALONG(P / (P - PFA))$$

$$R2 = R1 * (1 + YKNA * ALONG(P / (P - PFA))) / DNOM$$

エラーは、この2式における真数部が負になったためである。ここで、Pは雰囲気圧力、PFAは、ナトリウムの飽和蒸気圧である。

- (2) プログラム中では、(P-PFA)が 1×10^{-35} 以下の場合には、補正項DYDR=0.と与えられている。従って、この場合は、必然的にYKNA=0.になる。

しかし、計算機の機能上、他項の計算も行うので、上記エラーが発生したことがわかった。

- (3) 以上の結果と考察から、 $(P - PFA) \leq 1 \times 10^{-35}$ の場合には、YKNA=0.、R2=R1とおきかえるように改修し、再度計算を行った結果、正常に終了した。

改修部分を以下に示す。

```
IF (P-PFA. LE. 1. E-35) Go To 10 ←
YKNA=YKNA * DYDR / ALONG (P / (P-PFA)) ← 新しく挿入
Go To 20
10 YKNA = 0.
20 CONTINUE
.....
.....
```

```

IF(P-PFA. LE. 1.E - 35) Go To 30
R 2 = R 1 * ( 1.+ YKNA*ALONG(P/(P-PFA))/DNOM)
Go To 40
30 R 2 = R 1
40 CONTINUE

```

新しく挿入

表 1. SPRAY-3Mコードインプット変数

名 称	変数名	数値	単位	名 称	変数名	数値	単位
初期平均液滴径	DI	0.085	cm	メッシュ幅	DSMM(i, j)	0.08	m
セル壁面積	ALINER	4.24	m ²	メッシュ幅	DSMM(i, j)	0.133	m
初期ガス圧	PSIA	1.043	atm	メッシュ幅	DSMM(i, j)	0.133	m
初期ガス温度	TGI	20	℃	メッシュ幅	DSMM(i, j)	0.133	m
初期ナトリウム温度	TSI	400	℃	熱伝導率	RAMM(i, j)	0.4	Kcal/mh℃
初期湿分濃度	YH2OI	0.015	mol%	熱伝導率	RAMM(i, j)	1.8	Kcal/mh℃
雰囲気容量	VOL	2.10	m ³	熱伝導率	RAMM(i, j)	1.8	Kcal/mh℃
スプレーコーン高さ	H	3	m	熱伝導率	RAMM(i, j)	1.8	Kcal/mh℃
一定ナトリウム漏洩率	FNA	0.83	Kg/S	メッシュ初期温度	TMPM(i, j)	20	℃
ナトリウムスプレー時間	SMAX	60	sec	ギャップ幅	DGAP(i, j)	0	m
スプレー衝突面実効径	XS(1)	0.01	m	メッシュ密度	ROHM(i, j)	2000	Kg/m ³
スプレーコーン頂角	THETA	0.927	rad	メッシュ密度	ROHM(i, j)	2000	Kg/m ³
初期酸素濃度	YOI	0.21	mol%	メッシュ密度	ROHM(i, j)	2000	Kg/m ³
実効セル径	DIAM	3	m	メッシュ密度	ROHM(i, j)	2000	Kg/m ³
セルの高さ	HCELL	3	m	メッシュ比熱	GAPE(i, j)	0.2	Kcal/Kg℃
壁の熱容量	CPS	5.15	Kcal/m ² ℃	メッシュ比熱	GAPE(i, j)	0.2	Kcal/Kg℃
衝突面熱容量	CPI	0	Kcal/m ² ℃	メッシュ比熱	GAPE(i, j)	0.2	Kcal/Kg℃
液滴径の標準偏差	SIGMA	1.46	—	メッシュ比熱	GAPE(i, j)	0.2	Kcal/Kg℃
スプレーコーンメッシュ数	NV	25	—				
Na ₂ O ₂ 成生割合	NA2O2	0	—				
衝突面メッシュ数	MSN(2)	4	—				
壁メッシュ数	MSN(2)	4	—				
床メッシュ数	MSN(3)	4	—				
衝突面ギャップ熱伝導率	RAMG(1)	0	Kcal/mh℃				
壁ギャップ熱伝導率	RAMG(2)	0.03	Kcal/mh℃				
床ギャップ熱伝導率	RAMG(3)	0.03	Kcal/mh℃				
衝突面外側伝熱量	QSURL(1)	0	Kcal/m ² h				
壁の外側伝熱量	QSURL(2)	0	Kcal/m ² h				
床の外側伝熱量	QSURL(3)	0	Kcal/m ² h				