

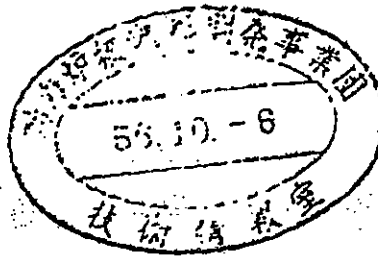
T  
PNC 8J206 81-05

本資料は1997年4月30日付で  
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

配布限定

# ナトリウム・コンクリート反応の解析

(受託研究)



1981年2月

三菱原子力工業株式会社

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)

本資料は1997年4月30日付けで  
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

PNC 8J206 81-05

配布限定

ナトリウム・コンクリート反応の解析  
(受託研究)

1981年2月  
三菱原子力工業株式会社

三菱原子力工業株式会社



配布限定

PNC T&J 206 81-05

1981年2月21日

## ナトリウムとコンクリート反応の解析\*

森井 正\*\*長谷川康雄\*\*

澤田 隆\*\*上野清文\*\*

### 要 旨

H C D A 後、溶融燃料が炉容器やガードベッセルを溶融貫通するような事故を仮定した場合、格納容器内の各部屋の温度、圧力等を解析することは安全上重要である。そのために、昭和53年度より、格納容器応答解析コード「CEDAN」を開発してきた。

今回の研究は、つぎの3部からなる。

#### 1) CEDANコードの改修

今回の改修内容は、

- I) 壁面へのより詳細な凝縮モデルの追加
- II) 蒸気表をフィッティングして、水の詳細な熱力学的物性値を得るルーチンの追加
- III) 計算途中で、系のエネルギー、質量をチェックする機能の追加
- IV) リスタート、プロッター機能の追加

#### 2) 解析コードのチェック・ラン

S O F I R E M II コードと比較計算を行なった。その結果、CEDAN で計算した温度、圧力は、S O F I R E M II で求めたものより低い値となつたが、この差は、両者の燃焼モデルの差に帰因するものと考えられる。また、今回改修した凝縮モデルにより、非凝縮性ガスによる凝縮量の低減効果をより機械論的に評価することが可能となつた。

### 3) 炉心溶融貫通事故を模擬した計算

原型炉を対象に、仮想的な炉心溶融貫通事故を模擬した計算をCEDANを用いて行なった。今回の計算では、炉容器室の雰囲気圧力が、設計圧力（ $\sim 1.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$ ）を上回ると、炉容器室と、格納容器床上との間のシールが破損するものと仮定した。結果は、格納容器床上の水素濃度は、約2～3時間で4パーセント（体積）に到達した。これは、ナトリウム・コンクリート反応により生じた水素ガスが、シール破損部を通って床上に出て来ることによるものである。

今回の研究で、炉心溶融事故後、格納容器内での事故シーケンスを一通り理解することが出来た。しかし、事故シナリオや物理モデルに多くの不確定要因があるので、事故シーケンスを実際に支配しているのは何かを決めるため、パラメータ・サーベイを行なう必要があると考えられる。

---

\*) 本報告書は、三菱原子力工業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団殿の委託により実施した研究の成果である。

\*\*）三菱原子力工業株式会社 動力炉開発部



NOT FOR PUBLICATION  
PNC/JBJ 206 81-05  
February 27, 1981

## Analysis of Containment Response by Using CEDAN Code\*

Tadashi Morii\*\*, Yasuo Hasegawa\*\*  
Takashi Sawada\*\*, Kiyobumi Ueno\*\*

### Key Words

Containment building, Sodium fire, CEDAN code,  
SOFIRE-MII code Sodium-concrete chemical reaction,  
Core melt down accident, Post accident heat  
removal, LMFBR safety

### Abstract

In an accident of an LMFVR, such as core materials melting through reactor vessel following a HCDA, it is important for the safety assessment to obtain complete pressure-temperature histories of the containment building. An LMFBR containment response analysis code CEDAN has been developed for this of application since 1978.

This study consists of three parts,

#### 1) Improvements of the CEDAN code

The following models have been incorporated into the code

- i) more detailed model of vapor condensation on a cold wall.
- ii) algorithms to obtain detail thermodynamic properties of water
- iii) algorithms to evaluate the total mass and energy of the system at arbitrary moment
- iv) restart and plotting capabilities

2) Examinations of the CEDAN code

Results obtained using the CEDAN code are compared to those obtained from the sodium pool fire code SOFIRE MII. It is found that temperature and pressure histories of cell atmosphere obtained from the CEDAN code is lower than those from the SOFIRE MII code. It is considered that this difference is due to sodium fire modeling differences between the CEDAN and SOFIRE MII codes. Results obtained from the improved models of vapor condensation show that it is feasible to treat mechanistically the effect of the presence of non-condensable gases.

3) Sample calculations of core melt down accident

Sample calculations are performed to investigate the transient containment response of a prototype LMFBR following a hypothetical reactor core melt down.

In this calculation, it is assumed that the seals between containment building and reactor cavity are broken if pressure of reactor cavity atmosphere exceeds the designed pressure (1.0 kg/cm<sup>2</sup>g).

The results show that hydrogen concentration in reactor containment building increases more than 4 volume percent in only two or three hours because of gas flow through an open area between containment building and reactor cavity.

This study can show a brief understanding of the sequences occurring in reactor containment building following hypothetical core melt down accident, but there are many uncertainties in accident scenarios and physical modelings. So future work should be necessary to identify the key parameters controlling the consequences of the accident.

\*) Work performed under contracts between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp. and Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

\*\*\*) Advanced Reactor Engineering Dept., Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

# 目 次

	頁
要 旨	
Abstract	
List of Figures	iii
List of Tables	vi
Nomenclature	vii
序 文	1
第1章 CEDANの改修	3
1.1 概 要	4
1.2 凝縮モデル	5
1.3 質量、エネルギーチェック	10
1.4 水の熱力学的物性値	19
1.5 プロッタ及びリスタート機能	30
1.6 入 力 形 式	32
第2章 チェックランの内容と結果	39
2.1 概 要	40
2.2 凝縮モデルとチェック	41
2.3 ナトリウム燃焼モデルのチェック	44



	頁
第3章 実際の事故を模擬した長時間計算	64
3.1 炉心メルトダウン後、格納容器の長時間応答	65
3.2 解析結果	72
結 言	85
謝 辞	86
参 考 文 献	87
APPENDIX A	A-1
APPENDIX B	B-1
Code Abstract	C-1

## List of Figures

Fig.		Page
1.1	Model of Vapor Condensation in the Presence of Non-Condensable Gas	33
1.2	Flow Chart for WASUP	34
1.3	Flow Chart for WASUB	35
1.4	Flow Chart for SATVAP	36
1.5	Flow Chart for SATWAT	37
1.6	Input Data of Restart Run	38
2.1	Mass Condensation Rate V.S. Non-Condensable Gas Fraction	49
2.2	Cell Atmosphere Temperature History	50
2.3	Pool Temperature History	51
2.4	Roof Temperature History	52
2.5	Oxygen Mole Fraction History	53
2.6	Cell Atmosphere Temperature History	54
2.7	Pool Temperature History	55
2.8	Cell Atmosphere Temperature	56
2.9	Temperature History of Pool	57

List of Figures  
(Continued)

Fig.		Page
2.10	Roof Temperature History	58
2.11	Oxygen Mole Fraction History	59
2.12	Cell Atmosphere Temperature History (Account for Humidity)	60
2.13	Temperature History of Pool (Account for Humidity)	61
2.14	Cell Atmosphere Pressure History (Account for Humidity)	62
2.15	Oxygen, Water and Hydrogen Mole Fraction History (Account for Humidity)	63
3.1	Model for Sample Calculation	75
3.2	Oxygen and Water Mole Histories Obtained by SPRAY Code	76
3.3	Water Release Pattern from Heated Concrete	77
3.4	Temperature Histories of Cell Atmosphere	78
3.5	Pressure Histories of Cell Atmosphere (1)	79
3.6	Pressure Histories of Cell Atmosphere (2)	80
3.7	Gas Concentration Histories of Reactor Cavity	81

List of Figures  
(Continued)

Fig.		Page
3.8	Gas Concentration Histories of Containment Building	82
3.9	Pool Temperature Histories	83
3.10	Temperature Histories of Reactor Cavity Roof	84
B.1	Input Data for Sample Calculation	B-2

## List of Tables

Table		Page
2.1	Calculation result for FILMCN	43
2.2	Structure Models	45
3.1	Initial Conditions of Cells	66
3.2	Structure Models	67
3.3	Conditions of Ventilation and Leak	69

## Nomenclature

### Latin Symbol

$C_p$	specific heat at constant pressure
$C_v$	specific heat at constant volume
$D$	diffusion coefficient
$\Delta H_f$	heat of formation
$g$	gravity constant
$h$	specific enthalpy
$L$	latent heat
$M$	molecular weight
$m$	mass
$P$	pressure
$Pr$	prandtl number
$Sc$	schmidt number
$T$	gas temperature
$u$	velocity (x-direction)
$v$	velocity (y-direction)

### Greek Symbol

$\beta$	gas expansion coefficient
$\beta$	reduced pressure
$\delta$	boundary layer thickness
$\epsilon$	reduced specific enthalpy
$\eta$	reduced specific energy
$\theta$	condensed liquid film temperature
$\theta$	reduced temperature
$\lambda$	thermal conductivity

$\mu$	coefficient of viscosity
$\nu$	kinematic viscosity
$\rho$	density
$\sigma$	reduced specific entropy
$\chi$	reduced specific volume

### Subscripts

a	atmosphere
cr	critical state
g	gas
L	liquid film
l	liquid droplets existing in gas region
P	pool average
R	released gas from heated concrete
S	pool surface
v	vapor
W	wall
o	liquid gas interface
$\infty$	bulk gas

### Superscripts

O	standard temperature and pressure
---	-----------------------------------

序 文



## 序 文

高速増殖炉において、炉心溶融事故が起こり、溶融炉心が炉容器を溶融貫通した場合、サイト外への影響を評価するには格納容器内における温度、圧力の詳細な解析が必要となる。このため、格納容器内の各室について、そこで発生する熱及び圧力並びに各室間の熱及び物質の移動を考慮しつつ、その温度及び圧力変化を解析するコード「CEDAN」の開発を進めて来た。今回、炉心溶融貫通事故後、長期にわたる格納容器内各部屋の挙動を計算するに当たり、CEDANの改修及びCEDANの凝縮、ナトリウム燃焼モデルの検討等を行なった。そして、改修されたコードを使用して、原型炉を対象に、仮想炉心溶融貫通事故後、格納容器内各部屋の挙動を評価した。

本研究は3つの章から成り、第1章では、今回改修した内容を詳述し、第2章では、CEDANのモデルのうち、蒸気の壁面への凝縮モデル及びSOFIRE M<sub>1</sub>コードとの比較計算によるナトリウムプール燃焼モデルの検討の結果と内容とを記した。第3章では、仮想炉心溶融貫通事故後の格納容器内の挙動をCEDANコードを使用して解析した。

## 第 1 章 CEDAN の改修

今回改修した内容について  
詳述する。

## 1.1 概 要

昭和53年にコードの基本的なフローが完成し、昭和54年にはほぼひと通りの解析が可能になったが、長時間の実際の事故を模擬するに当たり、2つの方向でコードの改修を行なった。

1つは、従来のコードのモデルでは不完全だったところの改修、他の1つは、長時間の計算をする場合のコードの使いやすさを増す改修である。

前者の改修として、壁面への蒸気の凝縮モデルの詳細化、計算中にエネルギー、質量が保存されているかどうかをチェックする機能、従来のCEDANでは不十分であった水の物性値計算ルーチンの追加である。

後者の改修として、リスタート機能、プロッタ機能の追加がある。

以上の改修内容を以下の頁にわたってもう少し詳しく述べる。

## 1.2 凝縮モデル

CEDANのような、事故後比較的長期間にわたり、格納容器各部屋の温度、圧力挙動を解析するコードには、例えば軽水炉にはCONTEMPT<sup>(1-1)</sup>、COCO、MARCH<sup>(1-2)</sup>、高速炉にはCACECO<sup>(1-3)</sup>、CONTAIN、CONAN<sup>(1-4)</sup>、NABE<sup>(1-5)</sup>等が上げられる。

蒸気の壁面への凝縮モデルについてみると、凝縮熱伝達係数を与えて、凝縮量は伝熱量を蒸気の潜熱でわって求めるもの(COCO、MARCH、NABE等軽水炉関係に多い。これは、蒸気の凝縮熱伝達係数に関する実験が比較的昔から行なわれてきているからであろう。)蒸気は雰囲気中で常に飽和であり、凝縮量は飽和からずれた分で求めるもの(CACECO)それから、膜状凝縮モデルを組み込んだもの(CONAN)に分類できるであろう。

ナトリウム蒸気の凝縮に関しては、実験がほとんどなされていなくて、いきおい凝縮モデルを組み込むという方向になっている。

現在のCEDANモデルにおける壁面への凝縮モデルは、飽和蒸気が膜状に凝縮しながら冷却面を流れ落ちてゆく、いわゆるNusseltのモデルを使っている。ところが、蒸気の中にたとえ少量でも非凝縮性ガスが混在していると、蒸気の凝縮量が格段に小さくなる。このことは蒸気の液膜への移動につれて蒸気中の不凝縮性気体が液膜近傍に集まり、蒸気が液膜上に凝縮するためには、この濃度の高い不凝縮気体を含む層を通過せねばならず、その際生ずる拡散抵抗により説明される。

現在のCEDANでは、その効果をインプットで与えられるが、その入力値の根拠があまりないため、改善の必要がある。

不凝縮性気体を含む蒸気の垂直平板上への自然対流凝縮伝熱に関し、Sparrow<sup>(1-6)</sup>らは境界層理論を用いて、その厳密解を求めているが、あまりに複雑すぎて問題が多い。今回の改修には解を得ることがより簡明で、しかも理論的にも妥当と思われる森、土方<sup>(1-7)</sup>の研究をもとにした。

### 1.2.1 基礎式(Fig. 1.1)

解析の前提となる仮定等、詳細な説明は元論文(1-8)にゆずり、ここでは基礎式のみを述べるにとどめる。モデルの基本概念は、液膜と気体とについて、それぞれ

れ境界層近似をし、気・液界面でエネルギーと質量が保存するように、両者を関係づけている。又、この論文では特に蒸気の濃度と温度とを飽和条件を満たすようにして、気体境界層において、液滴の存在を仮定している点が、それ以前の研究と異なる点である。

液膜については、ヌセルトの解がそのまま使用でき、境界面を通過する単位時間、単位面積当たり流入する凝縮量  $\dot{m}$ 、伝熱量  $\dot{q}$  及び境界面速度  $u_0$  は、液膜厚さ  $\delta_L$  の関数として

$$\dot{m} = \frac{g\delta_L}{\nu_L} \delta_L^2 \frac{d\delta_L}{dx} \sin\phi \quad (1-1)$$

$$\dot{q} = \frac{\lambda_L \Delta\theta}{\delta_L} - \dot{m}_{\text{vapor}} L \quad (1-2)$$

$$u_0 = \frac{g}{2\nu_L} \delta_L^2 \sin\phi \quad (1-3)$$

ここで  $\dot{m}$  と  $\dot{m}_{\text{vapor}}$  の相異は、 $\dot{m}$  が蒸気の液膜への凝縮と液滴の液膜への移動の和であり、 $\dot{m}_{\text{vapor}}$  は前者のみであるということである。

一方、非凝縮性ガス、蒸気及びその液滴が共存する気体境界層内では、つぎの基礎式が成立する。

気液混合全体の連続の方程式

$$\frac{\partial}{\partial x} \{(\rho + \rho_\ell) u\} + \frac{\partial}{\partial y} \{(\rho + \rho_\ell) v\} = 0 \quad (1-4)$$

ここでは、 $\rho$  は単位体積中の重量で、添字のないものは気相、添字  $\ell$  は液相をあらわす。混合気体の速度は各成分の速度で次のようにあらわす。

$$\rho = \rho_g + \rho_\ell, \quad \rho u = \rho_g u_g + \rho_v u_v, \quad \rho v = \rho_g v_g + \rho_v v_v \quad (1-5)$$

各成分の速度は2成分拡散に対するFickの法則により拡散係数Dを用いて

$$\rho_g (u - u_g) = \rho D \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho_g}{\rho} \right), \quad \rho_g (v - v_g) = \rho D \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho_g}{\rho} \right) \quad (1-6)$$

で与えられるが、境界層近似により、x方向への拡散速度は無視して、

$u_g = u_v = u$  となる。

一方、不凝縮性気体について考えると、その連続の方程式は

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho_g u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_g v_g) = 0 \quad (1-7)$$

となる。

運動量保存方程式は

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \{ (\rho + \rho_\ell) u^2 \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (\rho + \rho_\ell) uv \} \\ = (\rho + \rho_\ell - \rho_\infty) g \sin \phi + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \quad (1-8)$$

エネルギー保存方程式は

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \{ (\rho_g h_g + \rho_v h_v + \rho_\ell h_\ell) u \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ \rho_g h_g v_g + \rho_v h_v v_v + \rho_\ell h_\ell v_\ell \} \\ = \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \end{aligned} \quad (1-9)$$

となる。

つぎに、速度  $u$ 、液滴濃度、蒸気濃度、温度の境界層内分布を  $y$  方向のべき乗で仮定し、(1-4)~(1-9)に代入し、気・液境界層で(1-1),(1-2),(1-3)式の  $\dot{m} \dot{q} u_0$  が連続になるように(1-4)~(1-9)式を解く。

最終的には

$$\frac{g^{\rho L}}{\nu_L} \sin \phi \frac{1}{4} c^3 = \rho_0 (Y_0 + W_0) \left( \frac{g}{2 \nu_L} \sin \phi \frac{1}{4} c^3 + \frac{V_0 \nu_0}{b} \right) \quad (1-10)$$

$$\frac{\nu_0 c p_0 \rho_0 n \Delta T}{b \cdot Pr} = \frac{\lambda_L \Delta \theta}{c} - \rho_0 W_0 \left( \frac{g}{2 \nu_L} \sin \phi \frac{1}{4} c^3 + \frac{V_0 \nu_0}{b} \right) L \quad (1-11)$$

$$\frac{g}{2 \nu_L} c^2 = a \phi \quad (1-12)$$

$$R(V_\infty - Y_0) = V_0(1 + Y_0) \quad (1-13)$$

$$\begin{aligned} R^2 \left[ \frac{100(1+7\phi+21\phi^2)}{21(6\phi+1)^2} + Y_0 \frac{125(1+9\phi+36\phi^2)}{63(6\phi+1)^2} \right] \\ + R \left[ \frac{10}{6\phi+1} \{ 1-2\phi+(1+Y_0)V_0\phi \} \right] \\ = \frac{g\beta\Delta T}{4\nu^2} b^4 \left[ \frac{1}{n+1} + 1 \frac{\Delta W}{3\beta\Delta T} \left( \frac{Mg-Mv}{M} \right) + \frac{Y_0}{3\beta\Delta T} \right] \end{aligned} \quad (1-14)$$

$$R \left[ \frac{30\{\phi(n+4)+1\}}{(6\phi+1)(n+3)(n+4)} \frac{c_{p\infty}}{c_{p0}} + \frac{30\{\phi(n+6)+1\}}{(6\phi+1)(n+5)(n+6)} \times \left( \frac{c_{pg}-c_{pv}}{c_{p0}} \Delta W + \frac{c_{\ell}}{c_{p0}} Y_0 \right) + E Y_0 \right]$$

$$= -V_0 \left[ \frac{c_{pv}}{c_{p0}} + \frac{c_{\ell}}{c_{p0}} Y_0 + E Y_0 \right] + \frac{n}{Pr} \quad (1-15)$$

ここで

$$n = 2 \frac{(\Delta W / \Delta T)}{(\partial W / \partial T)_{y=0}} \quad W = \frac{\rho_v}{\rho} \quad , \quad Y = \frac{\rho_{\ell}}{\rho}$$

$$a = \frac{u_x}{\frac{1}{x^4}} \quad , \quad b = \frac{\delta_x}{\frac{1}{x^4}} \quad , \quad c = \frac{\delta_L}{\frac{1}{x^4}} \quad , \quad \phi = \frac{u_0}{u_x}$$

$$R = \left( \frac{6\phi+1}{40} \right) \frac{ab^2}{\nu_0} \quad , \quad V_0 = \frac{\Delta W}{1-W_0} \frac{2}{Sc} \quad , \quad V_{\infty} = \frac{\Delta W}{1-W_{\infty}}$$

$$c_{p0} = (1-W_0) c_{pg} + W_0 c_{pv} \quad , \quad c_{p\infty} = (1-W_{\infty}) c_{pg} + W_{\infty} c_{pv}$$

$$M = (1-W_{\infty}) M_v + W_{\infty} M_g \quad , \quad E = \frac{L}{c_{p0} \Delta T}$$

$$\Delta T = T_{\infty} - T_0 \quad , \quad \Delta W = W_{\infty} - W_0$$

添字 0 は気・液境界面， $\infty$  は bulk ガスでの値

(1-10) ~ (1-15) までは，未知数が  $a, b, c, \phi, Y_0, T_0$  の 6 元連立方程式になる。

## 1.2.2 解 法

1.2.1 節で導いた連立方程式を以下の手順で解く。なお，これはサブルーチン FILMCN で行なっている。

- (i)  $\phi, T_0$  を推定する。
- (ii) (1-13), (1-15) より  $R$  を消去すると， $Y_0$  に関する 2 次方程式となる。  
これを解いて正根を  $Y_0$  とする。
- (iii) (1-13) より  $R$  を求める。

- (iv) (1-14)より  $b$  を求める。
- (v)  $R, \phi, b$  により  $a$  を求める。
- (vi) (1-10)より  $c$  を求める。
- (vii) (1-11)より  $T_0$  を, (1-12)より  $\phi$  を求める。
- (viii) (vii)で求まった  $T_0, \phi$  が, 最初の  $T_0, \phi$  に十分近くなるまで, (i)~(vii)のステップをくり返す。



### 1.3 質量、エネルギーチェック

CEDANは、たがいに異なるセルについて、質量、エネルギー保存式を解いている。従って、計算が妥当か否かの判断の1つに質量とエネルギーとが計算中も保存されているかどうかということがある。すなわち、質量については、それぞれの物質について、又エネルギーは、全体エネルギーについて計算の初期の値が計算中に保存されているかをチェックする。

#### 1.3.1 質量チェック

系に存在する質量はつぎの和で求められる。

(I) 水

(プール) + (壁面での凝縮水) + (雰囲気中)  
+ (この時点までに(コンクリートから放出された量 + 外気からの出入り))

(II) ナトリウム

(プール) + (壁面での凝縮水) + (雰囲気中)  
+ (この時点までに(ナトリウム・コンクリート反応によるナトリウム消費量 + 外気からの出入り))

(III) 酸素、炭酸ガス、水素、窒素

(雰囲気中)  
+ (この時点までに(外気からの出入り + コンクリートから放出された量)) (炭酸ガスのみ)

(IV) 反応生成物 ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NaH}$ ,  $\text{C}$ )

(雰囲気中に存在する量) + (プール中に存在する量)

もし、化学反応が起らないとすると、当然(IV)は0であり、(I)~(III)のそれぞれの質量は、計算中保存されねばならない。

化学反応が起る場合、化合物ベースでの質量は保存されない。すなわち、ナトリウムと酸素とから酸化ナトリウムが出来るとき、ナトリウム、酸素、酸化ナトリウムといった物質の質量は保存されない。しかし、ナトリウム原子、酸素原子の質量は保存される。従って、原子レベルでの質量を計算し、それが保存されるか否か調べる必要がある。

CEDANで扱える物質は、 $H_2O$ 、 $Na$ 、 $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $H_2$ 、 $N_2$ 、 $Na_2O$ 、 $Na_2O_2$ 、 $NaH$ 、 $C$ であるから、原子の種類はつぎの5つにすぎない。

$C$ 、 $H$ 、 $N$ 、 $Na$ 、 $O$

それぞれの原子の質量は、つぎのようにして求める。

$$M_{(C)} = M_{(CO_2)} \frac{12}{44} + M_{(C)}$$

$$M_{(H)} = M_{(H_2O)} \frac{2}{18} + M_{(H_2)} + M_{(NaH)} \frac{1}{24}$$

$$M_{(N)} = M_{(N_2)}$$

$$M_{(Na)} = M_{(Na)} + M_{(Na_2O)} \frac{46}{62} + M_{(Na_2O_2)} \frac{46}{78} + M_{(NaH)} \frac{23}{24}$$

$$M_{(O)} = M_{(H_2O)} \frac{16}{18} + M_{(O_2)} + M_{(CO_2)} \frac{32}{44} + M_{(NaO)} \frac{16}{62}$$

$$+ M_{(Na_2O_2)} \frac{32}{78} \quad M_{(i)} : i \text{種物質の質量 (kg)}$$

### 1.3.2 エネルギーチェック

CEDANをエネルギーバランスがとれるようにするための改修にあたり、各成分のエンタルピーを計算できるようにしなければならない。そのため、以下の頁に各種ガス、各反応生成物のエンタルピーを求める手順と、その出典をまとめた。

ここで、注意すべきことはすべての物質の基準エンタルピーをそろえたことである。すなわち、 $25^\circ C$ 、 $1 \text{ atm}$ におけるおのおのの元素の安定状態を0にする。たとえば、 $25^\circ C$ の酸素ガス、水銀液、固体ナトリウム等をそれぞれの元素の基準エンタルピーとし、0と定義する。

このようにすることにより、化学反応が生じる現象をより統一的に扱うことが可能になる。化学反応が生じない現象を解析する場合、それぞれの物質において、かってに基準エンタルピーを仮定しても何ら問題が生じない。たとえば、水に対しては $100^\circ C$ の飽和液を0にし、ナトリウムに対しては、OKのナトリウム固体を0にとっても、ナトリウムと水との反応を考えなければ、何ら問題がない。ところが、

ナトリウムと水とから水酸化ナトリウムが生じるというような場合、反応熱をインプットしてやらねばならない。反応熱は、左辺と右辺の全エンタルピーの差にすぎないのであるが、基準エンタルピーを別々にとっているので、反応熱をコード上で計算することができないのである。

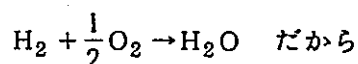
一方、基準エンタルピーをそろえると、反応熱はただその時のナトリウム・水の全エンタルピーから反応生成物の全エンタルピーを引くことにより、いろいろな温度、圧力の下での値がたやすく得られる。

### 1.3.2.1 比熱と基準エンタルピー

#### (i) 水 (H<sub>2</sub>O)

比熱は蒸気表より求まる。

基準エンタルピーは25℃の飽和水蒸気の比エンタルピー JANAF Table によると (1-8)



$$H_{\text{H}_2\text{O},g}^0 = \Delta H_{f,\text{H}_2,g}^0 + (H_{\text{H}_2,g}^0 + \frac{1}{2}H_{\text{O}_2,g}^0)$$

↑  
上の反応の25℃ 1 atmにおける生成熱

$$H_{\text{H}_2,g}^0, H_{\text{O}_2,g}^0 \text{ は定義により, } 0$$

$$\Delta H_{f,\text{H}_2\text{O}}^0 \text{ は } -57.7979 \text{ kcal/mol}$$

$$\therefore H_{\text{H}_2\text{O},g}^0 = -57.7979 \text{ kcal/mol} \quad (1-16)$$

一方、蒸気表から得られる25℃の飽和水蒸気の比エンタルピーは、

$$608.41 \text{ kcal/kg} \quad (1-17)$$

(1-16)、(1-17)が等しくなるためには、蒸気表から得られるエンタルピーから、

$$608.41 \times 4187 - (-57.7979 \times \frac{1000}{18} \times 4187) = 1.599185 \times 10^7$$

(J/kg)

を引けばよい。

### (III) ナトリウム (Na)

#### a 飽和ナトリウム

比熱等の EOS は ANL-8095 による。(1-9)

エンタルピーに関して、400K の飽和ナトリウム液を JANAF の値に合わせる。(1-8) 400K を採用したのは、ANL-8095 のデータで信用できる温度範囲の中で 25°C に最も近いと思われるからである。

JANAF Table によると (1-8)

$\text{Na}_s \rightarrow \text{Na}_\ell$  であるから

$$H_{\text{Na}, \ell}^{400} = H_{\text{Na}, \ell}^{400} + H_{\text{Na}, \ell}^{298.15} = H_{\text{Na}, \ell}^{400} + \Delta H_f^{298.15} + (H_{\text{Na}, s}^{298.15})$$

$H_{\text{Na}, s}^{298.15}$  は定義により 0

$$\Delta H_f = 0.575, H_{\text{Na}, \ell}^{400} = 0.781 \quad (\text{JANAF})$$

であるから

$$H_{\text{Na}, \ell}^{400} = 2.46851 \times 10^5 \text{ (J/kg)} \quad (1-18)$$

一方、ANL-8095 によると、400K、飽和ナトリウム液の比エンタルピーは

$$5.274 \times 10^5 \text{ (J/kg)} \quad (1-19)$$

ゆえに、(1-18)、(1-19) が等しくなるためには、ANL-8095 から得られるエンタルピーから

$$5.274 \times 10^5 - 2.46851 \times 10^5 = 2.80549 \times 10^5$$

を引けばよい。

#### b 非飽和ナトリウム

EOS は ANL-7323 を使う。(1-10)

ANL-7323 のエンタルピーは、ANL-8095 のエンタルピーと比較し、飽和蒸気エンタルピーに関し、300K~1900K 程度の範囲で数%程度の差しかない。

よって、飽和ナトリウムと同様、ANL-7323 から得られるエンタルピーより、 $2.80549 \times 10^5 \text{ (J/kg)}$  引けばよい。

(iii) 酸素 (O<sub>2</sub>), 炭酸ガス (CO<sub>2</sub>), 水素 (H<sub>2</sub>), 窒素 (N<sub>2</sub>)

上記4つのガスは, コード上理想気体的なとり扱いをする。

定圧比熱, 定容比熱は, 伝熱工学資料のデータを最小2乗法でフィッティングする。結果は,

$$C_P = C_P^0 + C_P^1 \cdot T + C_P^2 \cdot T^2$$

$$C_V = C_V^0 + C_V^1 \cdot T + C_V^2 \cdot T^2$$

$$T : (\text{K}) \quad C_P, C_V : (\text{kcal/kg} \cdot \text{K})$$

	$C_P^0$	$C_P^1$ ( $\times 10^{-5}$ )	$C_P^2$ ( $\times 10^{-8}$ )	Maximum Error (%)	$C_V^0$	$C_V^1$ ( $\times 10^{-5}$ )	$C_V^2$ ( $\times 10^{-8}$ )	Maximum Error (%)
O <sub>2</sub>	0.194956	8.89725	-2.43496	1.3 (T=223.15)	0.133719	8.74500	-2.37030	2.2 (T=223.15)
CO <sub>2</sub>	0.146005	21.8154	-6.82033	-5.3 (T=223.15)	0.111872	19.7038	-5.91646	-7.4 (T=223.15)
H <sub>2</sub>	3.36032	8.61291	14.5045	-2.6 (T=223.15)	2.37710	7.98726	14.8272	-3.7 (T=223.15)
N <sub>2</sub>	0.230214	5.36120	-0.621634	2.5 (T=223.15)	0.159348	5.35358	-0.616301	3.5 (T=223.15)

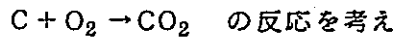
$$223.15 (\text{K}) < T < 1773.15 (\text{K})$$

各ガスの比エンタルピーは,

$$H = \int_{298.15}^T C_P dT + H_{298.15}^0$$

$H_{298.15}^0$  は, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> については定義により 0

CO<sub>2</sub> については,



$$H_{298.15}^0 = \Delta H_f^0 + (H_C^0 + H_{O_2}^0); \Delta H_f^0 = -8.95009 \times 10^6 (\text{J/kg})$$

[ JANAF Table ]

$$\therefore H = C_P^0 \cdot T + C_P^1 \cdot \frac{T^2}{2} + C_P^2 \cdot \frac{T^3}{3} + H_{298.15}^0 - C_P^0 \cdot 298.15$$

$$- C_P^1 \cdot \frac{298.15^2}{2} - C_P^2 \cdot \frac{298.15^3}{3}$$

(V) 反応生成物 酸化ナトリウム (Na<sub>2</sub>O), 過酸化ナトリウム (Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

カーボン(C), 水素化ナトリウム (NaH)

コード上では, 反応生成物はすべて固体としてとり扱う。

比熱は, 定圧比熱のみ考えればよく, JANAF Tableのデータを1.3と同じく最小2乗法で処理する。

$$C_P = C_P^0 + C_P^1 \cdot T + C_P^2 \cdot T^2$$

$$T : (\text{K}) \quad C_P : (\text{cal/mol} \cdot \text{K})$$

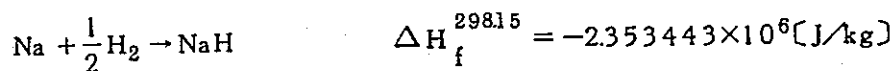
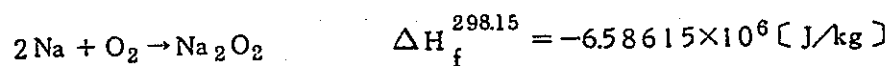
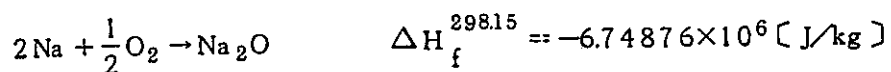
	$C_P^0$	$C_P^1$	$C_P^2$	温度範囲	maximum error (%)
Na <sub>2</sub> O	$1.24609 \times 10^1$	$1.52445 \times 10^{-2}$	$-4.86239 \times 10^{-6}$	200 ~ 1800	-7.6 (200K)
Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$1.09954 \times 10^1$	$4.17685 \times 10^{-2}$	$-2.76364 \times 10^{-5}$	200 ~ 700*	1.5 (300K)
C	$8.90119 \times 10^{-2}$	$7.72005 \times 10^{-3}$	$-2.60864 \times 10^{-6}$	200 ~ 1800	-27.0 (200K)
NaH	2.28341	$2.57358 \times 10^{-2}$	$-1.53433 \times 10^{-5}$	200 ~ 700**	1.2 (300K)

\* 700K以上では, 27.15 cal/mol·Kで一定 [JANAF]

\*\* 700Kで分解する。

各固体のエンタルピーは

$$H = \int_{298.15}^T C_P dT + H_{298.15}^0$$



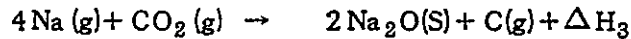
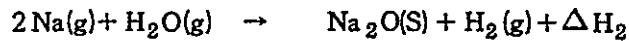
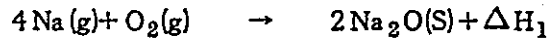
$H_{\text{Na}}^{298.15}$ ,  $H_{\text{O}_2}^{298.15}$ ,  $H_{\text{H}}^{298.15}$ ,  $H_{\text{C}}^{298.15}$  は定義より0であるから

$$H_{298.15}^0 : \begin{array}{ll} \text{Na}_2\text{O} & -6.74876 \times 10^6 \\ \text{Na}_2\text{O}_2 & -6.58615 \times 10^6 \\ \text{NaH} & -2.353443 \times 10^6 \\ \text{C} & 0 \end{array}$$

### 1.3.2.2 化学反応熱

#### (i) プール火災

CEDANでは、炎中でつぎの3つの反応を考えている。



反応物の温度として、ナトリウム蒸気はプール表面温度、その他の物質は、雰囲気温度を採用する。

反応熱は、

$$\Delta\text{H}_1 = H_{\text{O}_2}(\text{Ta}) + 4 \cdot H_{\text{Na}}(\text{Ts}) - 2 \cdot H_{\text{Na}_2\text{O}}(\text{Ta})$$

$$\Delta\text{H}_2 = H_{\text{H}_2\text{O}}(\text{Ta}) + 2 \cdot H_{\text{Na}}(\text{Ts}) - H_{\text{Na}_2\text{O}}(\text{Ta}) - H_{\text{H}_2}(\text{Ta})$$

$$\Delta\text{H}_3 = H_{\text{CO}_2}(\text{Ta}) + 4 \cdot H_{\text{Na}}(\text{Ts}) - 2 \cdot H_{\text{Na}_2\text{O}}(\text{Ta}) - H_{\text{C}}(\text{Ta})$$

$\Delta\text{H}$  : 反応熱 [J/1モル反応]

$H_i(\text{T})$  : 温度Tにおけるi種化合物のモル比エンタルピー

[J/モル]

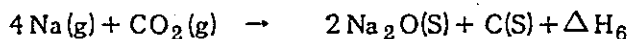
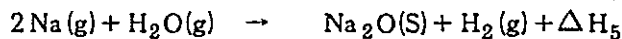
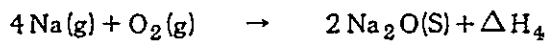
$\text{Ta}$  : 雰囲気温度 [K]

$\text{Ts}$  : プール表面温度 [K]

で計算される。

#### (ii) 気相反応

気相反応として、つぎの3つを考えている。



反応物の温度として、すべて雰囲気温度  $\text{Ta}$  を採用する。

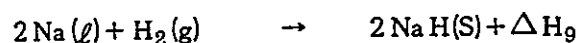
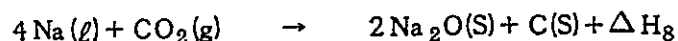
$$\Delta\text{H}_4 = H_{\text{O}_2}(\text{Ta}) + 4 \cdot H_{\text{Na}}(\text{Ta}) - 2 \cdot H_{\text{Na}_2\text{O}}(\text{Ta})$$

$$\Delta\text{H}_5 = H_{\text{H}_2\text{O}}(\text{Ta}) + 2 \cdot H_{\text{Na}}(\text{Ta}) - H_{\text{Na}_2\text{O}}(\text{Ta}) - H_{\text{H}_2}(\text{Ta})$$

$$\Delta\text{H}_6 = H_{\text{CO}_2}(\text{Ta}) + 4 \cdot H_{\text{Na}}(\text{Ta}) - 2 \cdot H_{\text{Na}_2\text{O}}(\text{Ta}) - H_{\text{C}}(\text{Ta})$$

### (iii) プール・ガス反応

加熱コンクリートからナトリウムプールに放出された水蒸気や炭酸ガスは、ナトリウムと以下の3つの反応式に従って反応する。



ナトリウムの温度はプール平均温度，水蒸気，炭酸ガスは放出時の平均温度， $\text{Na}_2\text{O}$ ， $\text{C}$ ， $\text{NaH}$ はプール平均温度，水素は雰囲気温度を採用する。

以上の温度条件により，反応熱は以下のように計算される。

$$\Delta H_7 = H_{\text{H}_2\text{O}}(\bar{T}_R) + 2 \cdot H_{\text{Na}}(\bar{T}_P) - H_{\text{Na}_2\text{O}}(\bar{T}_P) - H_{\text{H}_2}(T_a)$$

$$\Delta H_8 = H_{\text{CO}_2}(\bar{T}_R) + 4 \cdot H_{\text{Na}}(\bar{T}_P) - 2 \cdot H_{\text{Na}_2\text{O}}(\bar{T}_P) - H_{\text{C}}(\bar{T}_P)$$

$$\Delta H_9 = H_{\text{H}_2}(T_a) + 2 \cdot H_{\text{Na}}(\bar{T}_P) - 2 \cdot H_{\text{NaH}}(\bar{T}_P)$$

$\bar{T}_R$  : コンクリートから放出されたガスの平均温度 [K]

$\bar{T}_P$  : プール平均温度

### (iv) 液・液反応

ナトリウムと水とが液相状態で反応するときの反応熱は，



$$\Delta H_{10} = H_{\text{H}_2\text{O}}(T) + 2 \cdot H_{\text{Na}}(T) - H_{\text{Na}_2\text{O}}(T) - H_{\text{H}_2}(T_a)$$

ここに，温度 $T$ は反応型態によりいろいろな温度をとる。たとえば，凝縮水の温度やプール温度である。



### 1.3.2.3 系の全エネルギー

系の全エンタルピーを以下のHTOT1～HTOT9の9つの和で表わす。

HTOT1	ガスの全エンタルピー
HTOT2	プールの全エンタルピー
HTOT3	凝縮水の全エンタルピー
HTOT4	構造材の全エンタルピー
HTOT5	化学反応物の全エンタルピー
HTOT6	その時点までにコンクリートから放出されたガスのエンタルピー
HTOT7	その時点までに外気とガスのやりとりによるエンタルピー
HTOT8	その時点までにナトリウム・コンクリートにより発生するエンタルピー
HTOT9	その時点までに外気との熱のやりとりにより変化したエンタルピー

上記のうち、HTOT6～HTOT9は、サブルーチンTSCALで積分して求める。

計算中にエネルギー保存がなされているかどうかは、つぎの量 $H_T$ が計算中保存されているかを見ればよい。

$$H_T = HTOT1 + HTOT2 + HTOT3 + HTOT4 + HTOT5 - HTOT6 \\ - HTOT7 - HTOT8 - HTOT9$$

#### 1.4 水の熱力学的物性値

旧CEDANでは、水蒸気の熱力学的物性値（密度、比エンタルピー、圧力等）は、理想気体の式で近似していた。しかし、水蒸気の挙動が事故シーケンスに及ぼす影響は重要であるので、物性値をより詳細に知る必要がある。又、水蒸気は理想気体からのずれが大きく（水分子が双極子モーメントを持っているから）、この点からも、改修が必要とされていた。幸い、水は非常によく知られた物質であり、飽和、非飽和にかかわらず、蒸気表として整備されている。

1968年JSME蒸気表に示されているフィッティング式で、物性値及びその微分を計算できるサブルーチンを作成した。

作成したのは、以下の4つのサブルーチンである。但し、CEDANコード内では、加熱蒸気に対して、WASUP、飽和蒸気と水とに対して、WAPROPとして使用している。

##### 1) サブルーチンWASUP

加熱蒸気に関するものを計算する。

##### 2) サブルーチンWASUB

圧縮水に関するものを計算する。

##### 3) サブルーチンSATVAP

飽和蒸気に関するものを計算する。

##### 4) サブルーチンSATWAT

飽和水に関するものを計算する。

これらのサブルーチンについての詳細を、次頁より示す。

#### 1.4.1 WASUP

##### 1) 入力

T : 温度 [°K]

SPV : 比容積 [m<sup>3</sup>/kg]

##### 2) 出力

P : 圧力 [Pa]

H : エンタルピー [J/kg]

DPDV :  $(\partial P / \partial V)_T$

$$DPDT: (\partial P / \partial T)_V$$

$$DHDP: (\partial H / \partial P)_T$$

$$DHDT: (\partial H / \partial T)_P$$

3) 換算変数は,

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_t \leq \theta \leq \theta_1 : 0 \leq \beta < \beta_K(\theta) \\ \theta_1 < \theta < \theta_2 : 0 \leq \beta \leq \beta_L(\theta) \\ \theta_2 < \theta < \theta_3 : 0 \leq \beta \leq \beta_2 \end{array} \right.$$

の範囲において,

$$\theta = T / T_{cr} \quad \text{換算温度}$$

$$\beta = P / P_{cr} \quad \text{換算圧力}$$

$$X = v / v_{cr} \quad \text{換算比容積}$$

$$\varepsilon = h / (P_{cr} \cdot v_{cr}) \quad \text{換算エンタルピー}$$

$$\sigma = S / (P_{cr} \cdot v_{cr} / T_{cr}) \quad \text{換算エントロピー}$$

で定義される。

4) フローチャートは次頁に示す。 fig. 1.2

5) サブルーチンPRIMALで

$$X_2, \varepsilon_2, \left( \frac{\partial X_2}{\partial \beta} \right)_\theta, \left( \frac{\partial X_2}{\partial \theta} \right)_\beta$$

を求める。

6) 具体的な数値

$$P_{cr} = 2.212 \times 10^7 \text{ [Pa]}$$

$$T_{cr} = 647.3 \text{ [°K]}$$

$$v_{cr} = 3.17 \times 10^{-3} \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

$$I_1 = 4.260321148 \times 10^0$$

$$\theta_1 = 9.626911787 \times 10^{-1}$$

$$\theta_2 = 1.333462073 \times 10^0$$

$$\theta_3 = 1.657886606 \times 10^0$$

$$\theta_t = 4.219990731 \times 10^{-1}$$

$$\beta_1 = 7.475191707 \times 10^{-1}$$

$$\beta_2 = 4.520795660 \times 10^0$$

$$L = 7.160997524 \times 10^0$$

$$\alpha_0 = 0$$

これらの値は、以下に共通

#### 1.4.2 WASUB

##### 1) 入力

T : 温度 [°K]

SPV : 比容積 [m<sup>3</sup>/kg]

##### 2) 出力

P : 圧力 [Pa]

H : エンタルピー [J/kg]

DPDV :  $(\partial P / \partial V)_T$

DPDT :  $(\partial P / \partial T)_V$

DHDP :  $(\partial H / \partial P)_T$

DHDT :  $(\partial H / \partial T)_P$

##### 3) 換算変数は、

$$\theta_t \leq \theta \leq \theta_1 ; \beta_K < \beta \leq \beta_t$$

の範囲において定義される。

##### 4) サブルーチンMISERYで

$$X_2, \varepsilon_2, \left( \frac{\partial X_2}{\partial \beta} \right)_\theta, \left( \frac{\partial X_2}{\partial \theta} \right)_\beta$$

を求める。

##### 5) フローチャートを次頁に示す。

fig. 1.3

#### 1.4.3 SATVAP

##### 1. 入力

T : 温度 [°K]

## 2. 出力

BETA : 換算圧力  $\beta$

X2 : 換算比容積  $X_2$

E2 : 換算エンタルピー  $\epsilon_2$

YENE : 換算エネルギー  $\eta$

$$DBDT : \frac{d\beta}{d\theta}$$

$$DXDT : \frac{dX_2}{d\theta}$$

$$DYDT : \frac{d\eta}{d\theta}$$

## 3. 手法

1) フローチャートを次頁に示す。 fig. 1.4

2) サブルーチンPRIMALで

$$\beta_K(\theta), \frac{d\beta_K(\theta)}{d\theta}, X_2, \epsilon_2, \left(\frac{\partial X_2}{\partial \theta}\right)_\beta, \left(\frac{\partial X_2}{\partial \beta}\right)_\theta$$

を求める。

## 4. 換算変数は

$\theta = T/T_{cr}$  : 換算温度

$\beta = P/P_{cr}$  : 換算圧力

$X = v/v_{cr}$  : 換算比容積

$\epsilon = h/(P_{cr} \cdot v_{cr})$  : 換算エンタルピー

$\eta = e/(P_{cr} \cdot v_{cr})$  : 換算エネルギー

で定義される。

### 1.4.4 SATWAT

#### 1. 入力

T : 温度 [°K]

## 2. 出力

BETA : 換算圧力  $\beta$

X1 : 換算比容積  $X_1$

E2 : 換算エンタルピー  $\varepsilon_1$

YENE : 換算エネルギー  $\eta$

$$DBDT : \frac{d\beta}{d\theta}$$

$$DXDT : \frac{dX_1}{d\theta}$$

$$DYDT : \frac{d\eta}{d\theta}$$

## 3. 手法

1) フローチャートを次頁に示す。 fig. 1.5

2) サブルーチンPRIMALで計算..... $\beta_K(\theta), \frac{d\beta_K(\theta)}{d\theta}$

サブルーチンMISERYで計算..... $X_1, \varepsilon_1, \left(\frac{\partial X_1}{\partial \theta}\right)_\beta, \left(\frac{\partial X_1}{\partial \beta}\right)_\theta$

## 4. 換算変数は

$\theta = T/T_{cr}$  : 換算温度

$\beta = P/P_{cr}$  : 換算圧力

$X = v/v_{cr}$  : 換算比容積

$\varepsilon = h/(P_{cr} \cdot v_{cr})$  : 換算エンタルピー

$\eta = e/(P_{cr} \cdot v_{cr})$  : 換算エネルギー

で定義される。

### 1.4.5 サブルーチンPRIMAL

#### 1. 目的

K関数, L関数と部分領域2における換算エンタルピー, 換算比容積とその導関数を計算する。

2. 手 法

① 入 力

THETA : 換算温度  $\theta$

BETA : 換算圧力  $\beta$

② 出 力

BETAL : L関数  $\beta_L(\theta)$

DBETAL :  $\beta_L'(\theta)$

BETAK : K関数  $\beta_K(\theta)$

DBTKDT :  $B_K'(\theta)$

EPSI : 換算エンタルピー  $\varepsilon_1$

X : 換算比容積  $X_1$

DBX :  $\left(\frac{\partial X_1}{\partial \beta}\right)_{\beta}$

DTX :  $\left(\frac{\partial X_1}{\partial \theta}\right)_{\theta}$

③ 演算式は後に示す。

(1) 部分領域の境界線に対する式

1. K関数(飽和線)

$$\beta_K(\theta) = \exp \left[ \frac{1}{\theta} \cdot \frac{\sum_{\nu=1}^5 k_{\nu} (1-\theta)^{\nu}}{1+k_6(1-\theta)+k_7(1-\theta)^2} - \frac{1-\theta}{k_8(1-\theta)^2+k_9} \right]$$

$$-\frac{d\beta_K(\theta)}{d\theta} = \beta_K'(\theta) = \beta_K(\theta) \cdot \frac{d}{d\theta} f(\theta)$$

但し、

$$f(\theta) = \frac{1}{\theta} \cdot \frac{\sum_{\nu=1}^5 k_{\nu} (1-\theta)^{\nu}}{1+k_6(1-\theta)+k_7(1-\theta)^2} - \frac{1-\theta}{k_8(1-\theta)^2+k_9}$$

とする。

2. L関数(領域2と3の境界)

$$\beta_L = \beta_L(\theta) = \frac{(\theta_2 - \theta)\beta_1 + (\theta - \theta_1)\beta_2 - L(\theta_2 - \theta)(\theta - \theta_1)}{\theta_2 - \theta_1}$$

$$\frac{d\beta_L}{d\theta} = \beta_L' = \beta_L'(\theta) = \frac{\beta_2 - \beta_1 - L(\theta_2 - 2\theta + \theta_1)}{\theta_2 - \theta_1}$$

(2) 部分領域2

1. 換算比容積

$$X_2 = \frac{I_1 \theta}{\beta} - \sum_{\mu=1}^5 \mu \beta^{\mu-1} \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{Z(\mu,\nu)} - \sum_{\mu=6}^8 \frac{(\mu-2)\beta^{1-\mu} \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} \beta_{\mu\nu} X^{Z(\mu,\nu)}}{A^2}$$

$$+ 11 \left(\frac{\beta}{\beta_L}\right)^{10} \sum_{\nu=0}^6 B_{9\nu} X^\nu$$

但し,  $X = \exp\{b(1-\theta)\}$

2. 換算エンタルピ

$$\varepsilon_2 = B_0 \theta - \sum_{\nu=1}^5 B_{0\nu} (\nu-2) \theta^{\nu-1} - \sum_{\mu=1}^5 \beta^\mu \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} \{1 + Z(\mu,\nu)b\theta\} X^{Z(\mu,\nu)}$$

$$- \sum_{\mu=6}^8 \frac{\sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{Z(\mu,\nu)} \left( [1 + Z(\mu,\nu)b\theta] - \frac{b\theta \sum_{\lambda=1}^{\ell(\mu)} x(\mu,\lambda) b_{\mu,\lambda} X^{x(\mu,\nu)}}{\beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{\ell(\mu)} b_{\mu\nu} X^{x(\mu,\nu)}} \right)}{\beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{\ell(\mu)} b_{\mu\lambda} X^{x(\mu,\lambda)}}$$

$$+ \beta \left(\frac{\beta}{\beta_L}\right)^{10} \sum_{\nu=0}^6 \left[ \left\{ 1 + \theta \left( \frac{10\beta_L'}{\beta_L} + \nu b \right) \right\} B_{9\nu} X^\nu \right]$$



$$3. \left( \frac{\partial X_2}{\partial \beta} \right) \theta = -\frac{I_1 \cdot \theta}{\beta^2} - \sum_{\mu=2}^5 M(\mu-1) \beta^{\mu-2} \frac{\sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{Z(\mu,\nu)}}{\sum_{\mu=6}^8 \frac{(\mu-2) \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{Z(\mu,\nu)} \{ (1-\mu) A \beta^{-\mu} - 2(2-\mu) \beta^{2(1-\mu)} \}}{A^3}} \\ + 110 \frac{\beta^9}{\beta_L^{10}} \sum_{\nu=0}^6 B_{9\nu} X^\nu$$

但し、

$$A = \beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{\ell(\mu)} b_{\mu\lambda} X^{x(\mu,\lambda)}$$

$$4. \left( \frac{\partial X_2}{\partial \theta} \right) \beta = \frac{I_1}{\beta} + b \sum_{\mu=1}^5 \mu \beta^{\mu-1} \frac{\sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} Z(\mu,\nu) X^{Z(\mu,\nu)}}{\sum_{\mu=6}^8 \frac{(\mu-2) \beta^{1-\mu} \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{Z(\mu,\nu)} \{ Z(\mu,\nu) \cdot A - 2 \sum_{\lambda=1}^{\ell(\mu)} b_{\mu\lambda} X^{x(\mu,\lambda)} \}}{A^3}} \\ - 11 \cdot \frac{\beta^{10}}{\beta_L^{11}} \left[ 10 \beta_L' \sum_{\nu=0}^6 B_{9\nu} X^\nu + \beta_L b \sum_{\nu=1}^6 B_{9\nu} \nu X^\nu \right]$$

但し、

$$X = \exp \{ b(1-\theta) \}$$

④ 定数の数値

$k_1 = -7.691234564 \times 10^0$	$k_4 = 6.423285504 \times 10^1$	$k_7 = 2.097506760 \times 10^1$
$k_2 = -2.608023696 \times 10^1$	$k_5 = -1.189646225 \times 10^2$	$k_8 = 10^9$
$k_3 = -1.681706546 \times 10^2$	$k_6 = 4.167117320 \times 10^0$	$k_9 = 6$
$B_0 = 1.683599274 \times 10^1$	$B_{32} = 1.069036614 \times 10^{-1}$	$B_{90} = 1.936587558 \times 10^2$
$B_{01} = 2.856067796 \times 10^1$	$B_{41} = -5.975336707 \times 10^{-1}$	$B_{91} = -1.388522425 \times 10^3$
$B_{02} = -5.438923329 \times 10^1$	$B_{42} = -8.847535804 \times 10^{-2}$	$B_{92} = 4.126607219 \times 10^3$
$B_{03} = 4.330662834 \times 10^{-1}$	$B_{51} = 5.958051609 \times 10^{-1}$	$B_{93} = -6.508211677 \times 10^3$
$B_{04} = -6.547711697 \times 10^{-1}$	$B_{52} = -5.159303373 \times 10^{-1}$	$B_{94} = 5.745984054 \times 10^3$
$B_{05} = 8.565182058 \times 10^{-2}$	$B_{53} = 2.075021122 \times 10^{-1}$	$B_{95} = -2.693088365 \times 10^3$
$B_{11} = 6.670375918 \times 10^{-2}$	$B_{61} = 1.190610271 \times 10^{-1}$	$B_{96} = 5.235718623 \times 10^2$
$B_{12} = 1.388983801 \times 10^0$	$B_{62} = -9.867174132 \times 10^{-2}$	$b = 7.633333333 \times 10^{-1}$
$B_{21} = 8.390104328 \times 10^{-2}$	$B_{71} = 1.683998803 \times 10^{-1}$	$b_{61} = 4.006073948 \times 10^{-1}$
$B_{22} = 2.614670893 \times 10^{-2}$	$B_{72} = -5.809438001 \times 10^{-2}$	$b_{71} = 8.636081627 \times 10^{-2}$
$B_{23} = -3.373439453 \times 10^{-2}$	$B_{81} = 6.552390126 \times 10^{-3}$	$b_{81} = -8.532322921 \times 10^{-1}$
$B_{31} = 4.520918904 \times 10^{-1}$	$B_{82} = 5.710219649 \times 10^{-4}$	$b_{82} = 3.460208861 \times 10^{-1}$

⑤  $\eta(\mu)$ ,  $l(\mu)$ の数,  $Z(\mu, \nu)$ ,  $x(\mu, \lambda)$ の値

$\mu$	$\mu(\mu)$	$Z(\mu, \nu)$			$l(\mu)$	$x(\mu, \lambda)$	
		$\nu = 1$	$\nu = 2$	$\nu = 3$		$\lambda = 1$	$\lambda = 2$
1	2	13	3	-	-	-	-
2	3	18	2	1	-	-	-
3	2	18	10	-	-	-	-
4	2	25	14	-	-	-	-
5	3	32	28	24	-	-	-
6	2	12	11	-	1	14	-
7	2	24	18	-	1	19	-
8	2	24	14	-	2	54	27

#### 1.4.6 サブルーチンMISERY

##### 1. 目的

部分領域1における換算エンタルピー, 換算比容積とその導関数を求める。

##### 2. 手法

換算温度  $\theta$ , 換算圧力  $\beta$  を入力,  $\varepsilon_2$ ,  $X_2$ ,  $(\frac{\partial X_2}{\partial \theta})_{\beta}$ ,  $(\frac{\partial X_2}{\partial \beta})_{\theta}$  の順で計

算する。

##### ① 入力

THETA :  $\theta$

BETA :  $\beta$

##### ② 出力

EPSI : 換算エンタルピー  $\varepsilon_2$

X : 換算比容積  $X_2$

DTX :  $(\frac{\partial X_2}{\partial \theta})_{\beta}$

DBX :  $(\frac{\partial X_2}{\partial \beta})_{\theta}$

③ 定数の数値

$$\begin{array}{lll}
 A_0 = 6.824687741 \times 10^3 & A_{12} = -2.616571843 \times 10^{-2} & a_2 = 5.362162162 \times 10^{-4} \\
 A_1 = -5.422063673 \times 10^2 & A_{13} = 1.522411790 \times 10^{-3} & a_3 = 1.720000000 \times 10^0 \\
 A_2 = -2.096666205 \times 10^4 & A_{14} = 2.284279054 \times 10^{-2} & a_4 = 7.342278489 \times 10^{-2} \\
 A_3 = 3.941286787 \times 10^4 & A_{15} = 2.421647003 \times 10^2 & a_5 = 4.975858870 \times 10^{-2} \\
 A_4 = -6.733277739 \times 10^4 & A_{16} = 1.269716088 \times 10^{-10} & a_6 = 6.537154300 \times 10^{-1} \\
 A_5 = 9.902381028 \times 10^4 & A_{17} = 2.074838328 \times 10^{-7} & a_7 = 1.150000000 \times 10^{-6} \\
 A_6 = -1.093911744 \times 10^5 & A_{18} = 2.174020350 \times 10^{-8} & a_8 = 1.510800000 \times 10^{-5} \\
 A_7 = 8.590841667 \times 10^4 & A_{19} = 1.105710498 \times 10^{-9} & a_9 = 1.418800000 \times 10^{-1} \\
 A_8 = -4.511168742 \times 10^4 & A_{20} = 1.293441934 \times 10^1 & a_{10} = 7.002753165 \times 10^0 \\
 A_9 = 1.418138926 \times 10^4 & A_{21} = 1.308119072 \times 10^{-5} & a_{11} = 2.995284926 \times 10^{-4} \\
 A_{10} = -2.017271113 \times 10^3 & A_{22} = 6.047626338 \times 10^{-14} & a_{12} = 2.040000000 \times 10^{-1} \\
 A_{11} = 7.982692717 \times 10^0 & a_1 = 8.438375405 \times 10^{-1} &
 \end{array}$$

④ 部分領域 I における演算式

1. 換算比容積

$$\begin{aligned}
 X_1 = & A_{11} a_5 Z^{-5/17} + (A_{12} + A_{13} \theta + A_{14} \theta^2 + A_{15} (a_6 - \theta)^{10} + A_{16} (a_7 + \theta^{19})^{-1}) \\
 & - (a_8 + \theta^{11})^{-1} (A_{17} + 2A_{18} \beta + 3A_{19} \beta^2) \\
 & - A_{20} \theta^{18} (a_9 + \theta^2) \{-3(a_{10} + \beta)^{-4} + a_{11}\} \\
 & + 3A_{21} (a_{12} - \theta) \beta^2 + 4A_{22} \theta^{-20} \beta^3
 \end{aligned}$$

ここで

$$Z = Y + (a_3 Y^2 - 2a_4 \theta + 2a_5 \beta)^{1/2}$$

$$Y = 1 - a_1 \theta^2 - a_2 \theta^{-6}$$

とする。

2. 換算エンタルピー

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 = & a_0 + A_0 \theta - \sum_{\nu=1}^{10} (\nu-2) A_\nu \theta^{\nu-1} \\ & + A_{11} \left[ Z \left\{ 17 \left( \frac{Z}{29} - \frac{Y}{12} \right) + 5 \theta \frac{Y'}{12} \right\} + a_4 \theta - (a_3 - 1) \theta Y Y' \right] Z^{-5/17} \\ & + \{ a_{12} - A_{14} \theta^2 + A_{15} (9\theta + a_6)(a_6 - \theta)^9 + A_{16} (20\theta^{19} + a_7)(a_7 + \theta^{19})^{-2} \} \beta \\ & - (12\theta^{11} + a_8)(a_8 + \theta^{11})^{-2} (A_{17}\beta + A_{18}\beta^2 + A_{19}\beta^3) \\ & + A_{20} \theta^{18} (17a_9 + 19\theta^2) \{ (a_{10} + \beta)^{-3} + a_{11}\beta \} \\ & + A_{21} a_{12} \beta^3 + 21 A_{22} \theta^{-20} \beta^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3. \left( \frac{\partial X_1}{\partial \theta} \right)_\beta = & -\frac{5}{17} A_{11} a_5 Z^{-\frac{22}{17}} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} Z \\ & + A_{13} + 2A_{14} \theta - 10A_{15} (a_6 - \theta)^9 - 19A_{16} (a_7 + \theta^{19})^{-2} \cdot \theta^{18} \\ & + 11\theta^{10} (a_8 + \theta^{11})^{-2} \cdot (A_{17} + 2A_{18}\beta + 3A_{19}\beta^2) \\ & - 2A_{20} \theta^{17} \{ -3(a_{10} + \beta)^{-4} + a_{11} \} (9a_9 + 10\theta^2) \\ & - 3A_{21} \beta^2 - 80A_{22} \theta^{-21} \beta^3 \end{aligned}$$

但し、

$$\begin{aligned} Z = & Y + (a_3 Y^2 - 2a_4 \theta + 2a_5 \beta)^{\frac{1}{2}} \\ \frac{\partial}{\partial \theta} Z = & \frac{\partial}{\partial \theta} Y + \frac{1}{2} (a_3 Y^2 - 2a_4 \theta + 2a_5 \beta)^{-\frac{1}{2}} \cdot (2a_3 Y \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} Y - 2a_4) \\ Y = & 1 - a_1 \theta^2 - a_2 \theta^{-6} \\ \frac{\partial}{\partial \theta} Y = & -2a_1 \theta + 6a_2 \theta^{-7} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4. \left( \frac{\partial X_1}{\partial \beta} \right)_\theta = & -\frac{5}{17} A_{11} a_5 Z^{-\frac{22}{17}} \cdot \frac{\partial}{\partial \beta} Z - (a_8 + \theta^{11})^{-1} \cdot (2A_{18} + 6A_{19}\beta) \\ & - 12A_{22} \theta^{18} (a_9 + \theta^2) (a_{10} + \beta)^{-5} \\ & + 6A_{21} (a_{12} - \theta) \beta + 12A_{22} \theta^{-20} \beta^2 \\ \text{但し、} \quad Z = & Y + (a_3 Y^2 - 2a_4 \theta + 2a_5 \beta)^{\frac{1}{2}} \\ \frac{\partial}{\partial \beta} Z = & a_5 (a_3 Y^2 - 2a_4 \theta + 2a_5 \beta)^{-\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

とする。

## 1.5 プロッタ及びリスタート機能

### 1.5.1 プロッタ (CEDAN) [ APPENDIX A参照 ]

JPRINT回おきに以下の変数をコモンSAVEに記憶する。

セルの温度	最大4つまで
セルの圧力	同上
ガス質量	8種類まで*
プール質量	最大4つまで
構造材温度	24個まで**

\* 任意のセルの任意のガス種類を指定できるが、その数の最大が8つという意味

\*\* 任意の構造材の任意のメッシュの温度を指定できるが、その数の最大が、24つという意味である。

以上、記憶したデータをUNIT番号4にフォーマットなしで書き出す。

なお、上のデータはそのまま計算終了時にサマリーアウトとして、サブルーチンPRINTSで書き出している。

### 1.5.2 CEDAN-PLOT

CEDAN-PLOTの入力は、カードとCEDANからのデータとの2種類がある。カードとして、各プロット変数の最大、最小値、1枚のグラフに何を書くかという情報を与える。

CEDAN-PLOTコードは、上述のデータを基にして、CALCOMP用のプロットテープを作成する。

### 1.5.3 リスタート

計算終了時に、リスタートに必要なデータをサブルーチンHISWで、UNIT番号8に書き出す。

リスタート時には、一番最初のカードの4カラム目に1を入力し、後はリスタート時に変更したいデータの共通上の番地を入力してやればよい。

すなわち、リスタート時には、任意のデータの変更が容易に行なえるようにしてある。

なお、一番最初のランの時は、一番最初のカードをブランクにしておけばよい。  
 リスタートデータは、サブルーチンHISRでUNIT番号9より読み込み、変更データはサブルーチンREADHにより、通常のカードインプットすなわちUNIT番号5から読み込む。

リスタート時に変更できるデータは、/ATMSTE/以下44個のコモンブロック中の変数である。

Fig. 1.6にリスタート時インプット例を示す。

インプットは、つぎの2枚のカードの組から成り立っている。

コモン名*	I.**	J.**	コメント文
24X			データ***

\* リスタート時に変更したい変数が入っているコモン名

\*\* 変更したい変数のコモン中での番地

I .....最 初

J .....最 後

\*\*\* 変更したい数値

実数の場合      4F12.0

整数の場合      8I6

リスタートデータは、最初のカードの4カラム目に1、又最後のカードには、ENDが必ず必要である。

## 1.6 入力形式

今回の改修により、追加された入力はごくわずかであり、本報告書では、追加された入力のみ書くことにする。残りの入力形式は前回報告書のAPPENDIX Cと同じである。

NLIMIT(1)	:	新凝縮モデル計算サブルーチンFILMCNでの繰り返し回数	
NLIMIT(2)	:	エネルギーチェック間隔	
NCLINE(J, K)	:	削 除	
CAPCP1(7)~(10)			J/kg·deg
CAPCP2(7)~(10)		化学反応物の定圧比熱	J/kg·deg <sup>2</sup>
CAPCP3(7)~(10)			J/kg·deg <sup>3</sup>
CAVPL0(1)			J/kg·deg
CAVPL1(1)		水の定容比熱*	J/kg·deg <sup>2</sup>
CAVPL2(1)			J/kg·deg <sup>3</sup>
CAVPL0(2)			
CAVPL1(2)		ナトリウムの定容比熱**	
CAVPL2(2)			

\* CAPPL0(1), CAPPL1(1), CAPPL2(1)のつきに入れる。

\*\* CAPPL0(2), CAPPL1(2), CAPPL2(2)のつきに入れる。

VLIMIT(1) サブルーチンFILMCNでの収束判定誤差

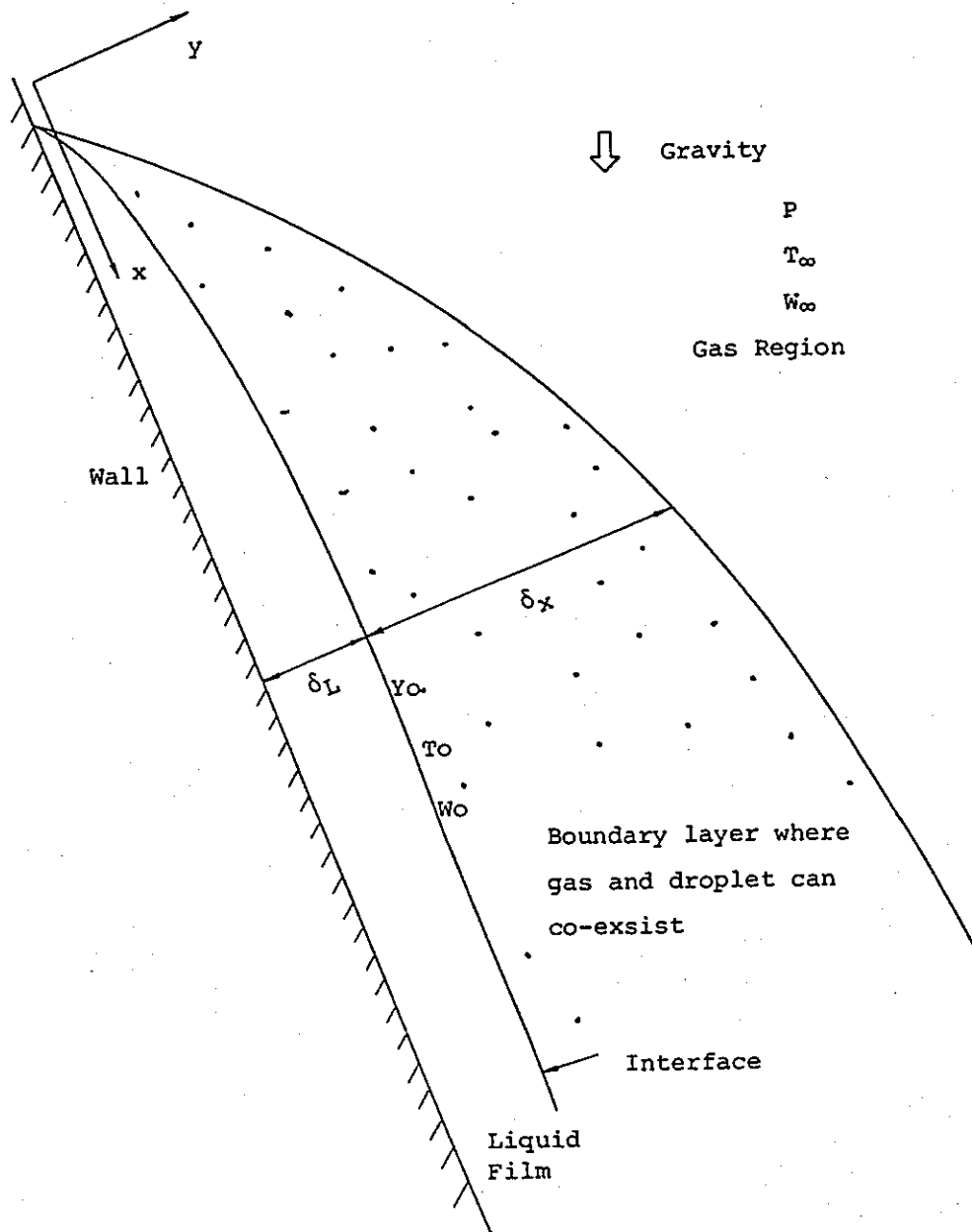


Fig. 1.1 Model of Vapor Condensation in the Presence of Non-Condensable Gas



Fig. 1.2

Flow Chart for WASUP

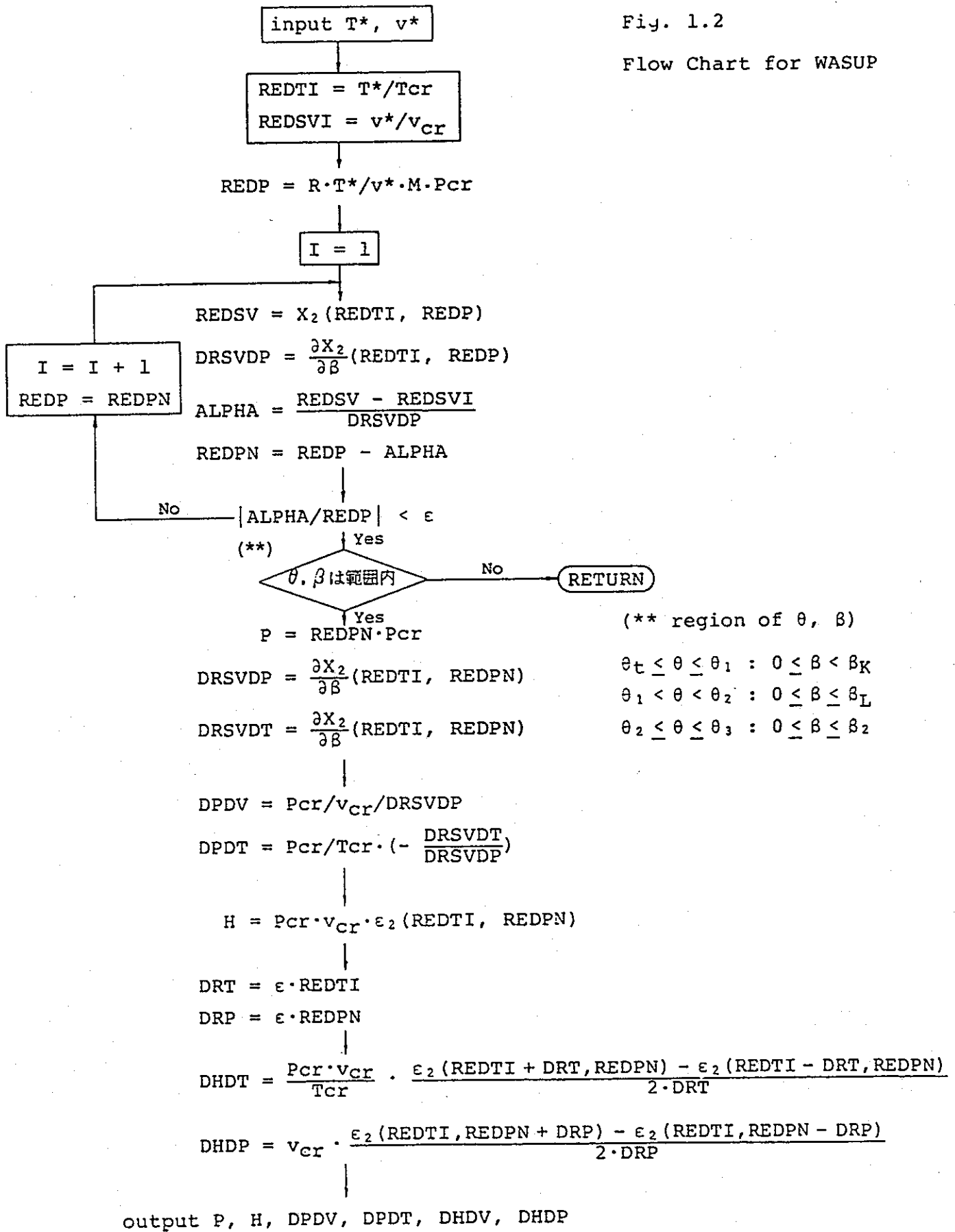


Fig. 1.3

Flow Chart for WASUB

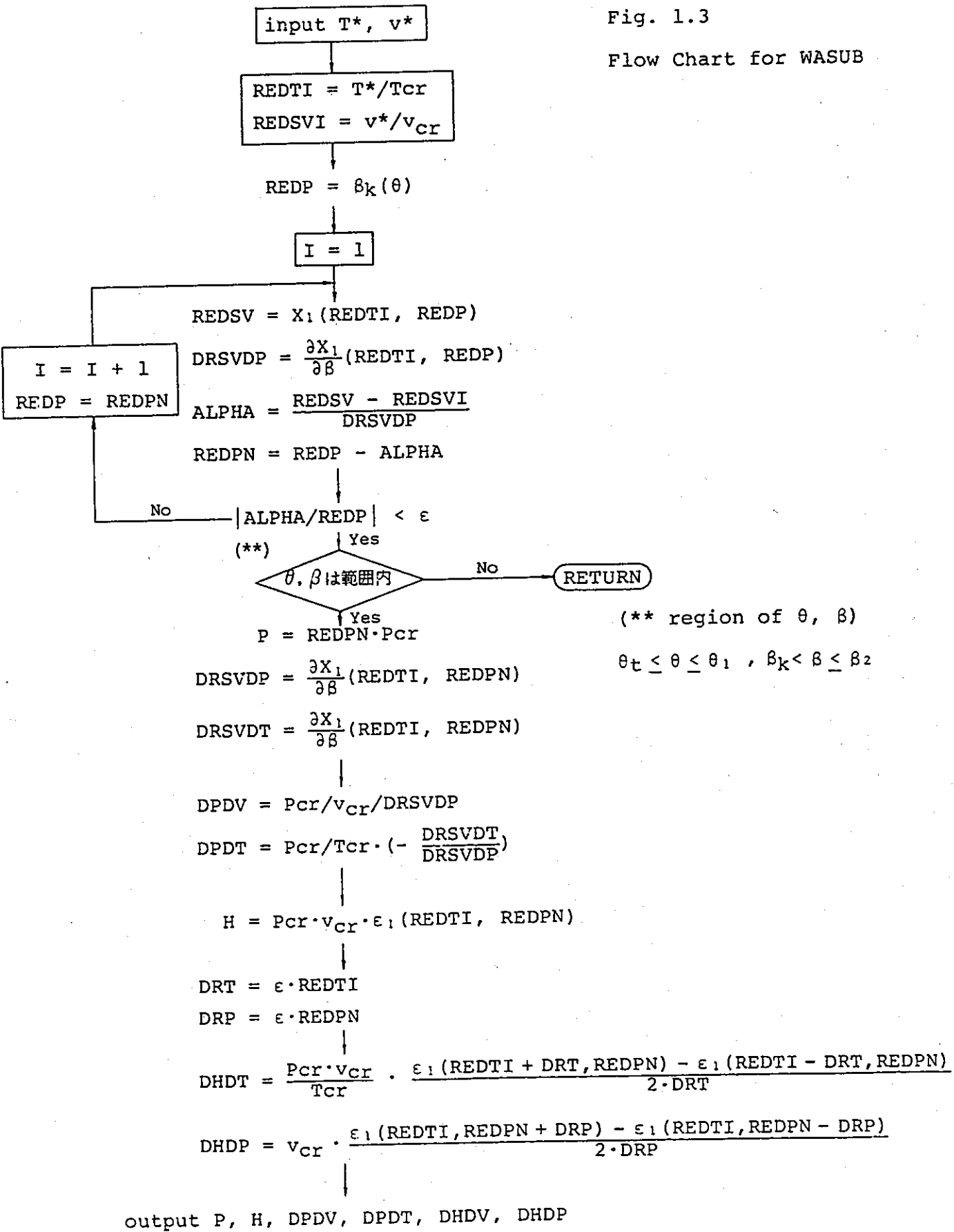
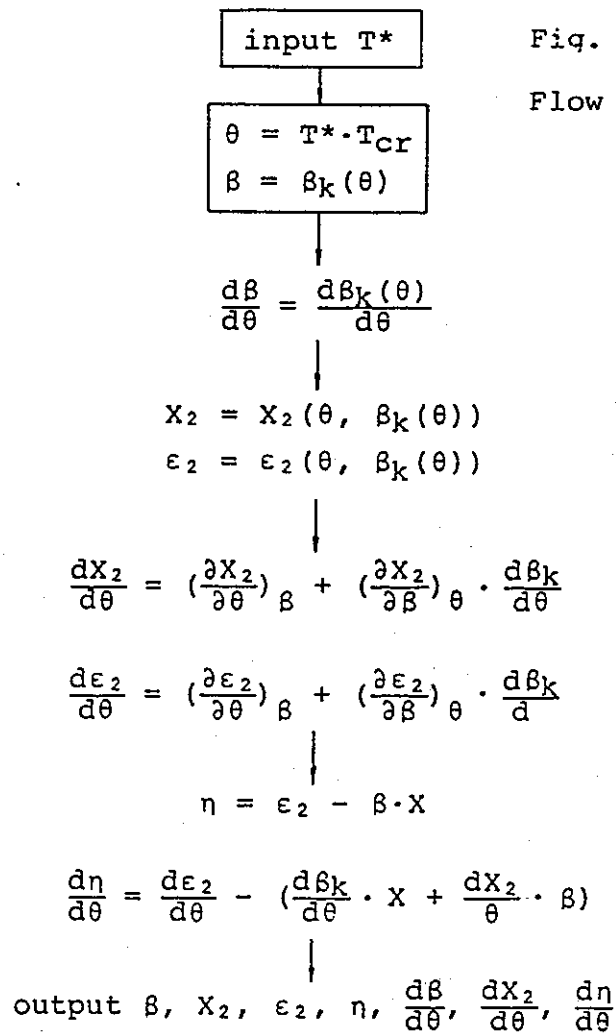


Fig. 1.4

Flow Chart for SATVAP



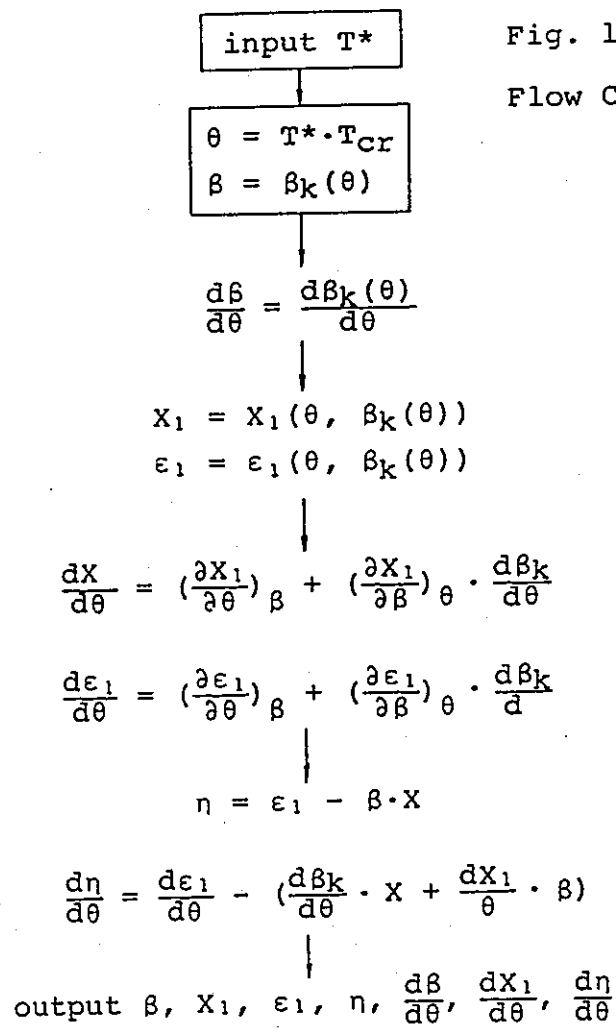
\*  $\frac{\partial \epsilon_2}{\partial \theta}, \frac{\partial \epsilon_2}{\partial \beta}$

$$\frac{\partial \epsilon_2}{\partial \theta} = \frac{\epsilon_2(\theta + \Delta\theta, \beta) - \epsilon_2(\theta - \Delta\theta, \beta)}{2 \cdot \Delta\theta}$$

$$\frac{\partial \epsilon_2}{\partial \beta} = \frac{\epsilon_2(\theta, \beta + \Delta\beta) - \epsilon_2(\theta, \beta - \Delta\beta)}{2 \cdot \Delta\beta}$$

Fig. 1.5

Flow Chart for SATWAT



\*  $\frac{\partial \epsilon_1}{\partial \theta}, \frac{\partial \epsilon_1}{\partial \beta}$

$$\frac{\partial \epsilon_1}{\partial \theta} = \frac{\epsilon_1(\theta + \Delta\theta, \beta) - \epsilon_1(\theta - \Delta\theta, \beta)}{2 \cdot \Delta\theta}$$

$$\frac{\partial \epsilon_1}{\partial \beta} = \frac{\epsilon_1(\theta, \beta + \Delta\beta) - \epsilon_1(\theta, \beta - \Delta\beta)}{2 \cdot \Delta\beta}$$



## 第2章 チェックランの内容と結果

【凝縮モデルと火災モデルのチェック  
ランの内容と結果】

## 2.1 概 要

第1章で述べたように、今回、長時間計算に先立って、コードの改修を行なった。しかし、CEDANで採用されているモデルについて、まだ十分に、その妥当性について検討が加えられていないのが現状である。そこで、本章ではCEDANのモデルのうち、プール燃焼モデルと、今回改修した、凝縮モデルにつき検討を加えてみた。

その結果、凝縮モデルについてはおおむね妥当な結果になったが、プール燃焼モデルについては、SOFIRE MIIコードとの比較計算の結果、燃焼量について差が見られた。

SOFIREとCEDANとはプール燃焼モデルについて、かなり異なっているので、もっと詳細な検討が必要である。

## 2.2 凝縮モデルチェック

第1.2節で説明した凝縮モデルを単独でランさせて、妥当な結果が出るかどうか確認する。

### 2.2.1 解析条件

ナトリウム蒸気が、垂直冷却面に凝縮するとする。冷却面温度は400℃とする。非凝縮性ガスとして空気を考える。

バルクガス温度が410℃, 900℃ について、非凝縮性ガスの重量パーセントをパラメータとして、凝縮量, 壁面への伝熱量, 気・液界面におけるナトリウムミストの蒸気に対する比を計算した。

### 2.2.2 計算結果

結果をTable 2.1に示す。又、非凝縮性ガス分率に対する凝縮速度をFig. 2.1に示す。

非凝縮性ガス分率の凝縮速度に対する影響は非常に大きい。(Fig. 2.1の縦軸は対数目盛であることに注意。)

さらに、ガス分率の1.0及び0.0近傍における凝縮速度の傾きが大きいことがわかる。これは、ごく少量の蒸気が存在することにより凝縮量が格段に増加、従って、伝熱量が増加するという事実、又、ごく少量の非凝縮性ガスの添加により凝縮量が大きく減少するという事実とよく合っている。

一方、雰囲気温度の影響は小さいことがわかる。

### 2.2.3 非凝縮性ガスが両極端の場合の漸近性のチェック

非凝縮性ガスが存在している場合の凝縮量及び伝熱量は、前節で説明したように定性的によい結果を得ている。ここでは、非凝縮性ガスが全然ない場合に、伝熱量及び凝縮量が、ヌセルトの理解論に漸近すること及び、ナトリウム蒸気が全然ない場合に、凝縮量がゼロに、伝熱量が、自然対流伝熱解に漸近することを示す。

ヌセルトの膜状凝縮モデルによる解は、

$$q_X = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{Ga_X \cdot Pr_L}{H} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{\lambda_L}{X} \Delta T \quad (\text{伝熱量})$$



ここに,

$$Ga_X \equiv \frac{gX^3}{\nu^2} \left( \frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_L} \right) \sin \phi$$

$$H \equiv \frac{C_{pL} \cdot \Delta T}{\Delta H_{vap}}$$

$$\dot{m}_X = \frac{q_X}{\Delta H_{vap}} \quad (\text{凝縮量})$$

$T_w = 400^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty = 410^\circ\text{C}$ の時に上の値を計算すると

$$q_X = 1.5 \times 10^6 \text{ ( J/s} \cdot \text{m}^2 \text{ )}$$

$$\dot{m}_X = 3.3 \times 10^{-1} \text{ ( kg/s} \cdot \text{m}^2 \text{ )}$$

Table 2.1 での非凝縮性ガス比 0.7 % の時の値

$$q = 1.0 \times 10^6$$

$$\dot{m} = 1.92 \times 10^{-1}$$

は, ヌセルトの解によく漸近している。

一方, 自然対流伝熱による解は,

$$q = 0.14 \frac{\lambda}{X} (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{\frac{1}{3}}$$

$$\dot{m} = 0$$

同様に,  $q$  の値を求めると,

$$q = 30.4 \text{ ( J/m}^2 \cdot \text{s )}$$

一方, Table 2.1 によると, 非凝縮性ガス濃度が, 99.86%の時,

$$q = 34.1 \text{ ( kg/m}^2 \cdot \text{s )}$$

であり, 十分に漸近している。

Table 2.1 Calculation result for FILMCN

	Noncondensable gas fraction (%)	Liquid mist mass	Condensation rate (kg/S·m <sup>2</sup> )	Heat transferred (J/S·m <sup>2</sup> )
		Vapor mass		
T <sub>W</sub> = 400 (°C)  T <sub>∞</sub> = 410 (°C)  T <sub>W</sub> : Wall Temperature  T <sub>∞</sub> : Bulk gas Temperature	99.86	9.14 × 10 <sup>-4</sup>	8.65 × 10 <sup>-10</sup>	3.41 × 10 <sup>1</sup>
	98.63	1.24 × 10 <sup>-2</sup>	1.38 × 10 <sup>-7</sup>	5.53 × 10 <sup>2</sup>
	94.6	5.34 × 10 <sup>-2</sup>	3.63 × 10 <sup>-6</sup>	3.46 × 10 <sup>3</sup>
	87.8	1.24 × 10 <sup>-1</sup>	2.44 × 10 <sup>-5</sup>	1.0 × 10 <sup>4</sup>
	67.0	4.46 × 10 <sup>-1</sup>	4.34 × 10 <sup>-4</sup>	4.97 × 10 <sup>4</sup>
	41.9	1.0	2.51 × 10 <sup>-3</sup>	1.27 × 10 <sup>5</sup>
	25.0	1.82	8.31 × 10 <sup>-3</sup>	2.33 × 10 <sup>5</sup>
	6.7	4.51	4.91 × 10 <sup>-2</sup>	5.41 × 10 <sup>5</sup>
	0.7	9.01	1.92 × 10 <sup>-1</sup>	1.0 × 10 <sup>6</sup>
T <sub>W</sub> = 400 (°C)  T <sub>∞</sub> = 900 (°C)	98.63	8.45 × 10 <sup>-3</sup>	5.32 × 10 <sup>-7</sup>	3.09 × 10 <sup>3</sup>
	94.6	5.28 × 10 <sup>-2</sup>	5.44 × 10 <sup>-6</sup>	5.25 × 10 <sup>3</sup>
	87.8	1.23 × 10 <sup>-1</sup>	2.81 × 10 <sup>-5</sup>	1.17 × 10 <sup>4</sup>
	67.0	4.41 × 10 <sup>-1</sup>	4.47 × 10 <sup>-4</sup>	5.18 × 10 <sup>4</sup>
	41.9	9.89 × 10 <sup>-1</sup>	2.54 × 10 <sup>-3</sup>	1.31 × 10 <sup>5</sup>
	25.0	1.76	8.29 × 10 <sup>-3</sup>	2.4 × 10 <sup>5</sup>
	6.7	4.23	4.74 × 10 <sup>-2</sup>	5.57 × 10 <sup>5</sup>
	0.7	8.02	1.76 × 10 <sup>-1</sup>	1.04 × 10 <sup>6</sup>
	0.1	8.79	2.84 × 10 <sup>-1</sup>	1.45 × 10 <sup>6</sup>

## 2.3 ナトリウム燃焼モデルのチェック

CEDANのナトリウムプール火災モデルは、ナトリウムプール表面からの蒸気を考慮に入れた気相反応モデルである。(2-1)

ナトリウムプール火災コードは、SOFIREが知られており、CEDANの火災モデルの妥当性を確認するために、同じ体系でSOFIRE-MIとCEDANを比較計算した。

### 2.3.1 解析条件

もんじゅEVSTオーバーフロータンク室を対象にし、1セルモデルで行なった。

#### (i) 雰囲気ガスの初期条件

酸素濃度	5V/O	温度	55°C
圧力	1.032 kg/cm <sup>2</sup> a	湿度	0%

#### (ii) 建物、構築物の初期条件

ライナー、コンクリート温度 55°C

#### (iii) 漏洩ナトリウム

総量 60m<sup>3</sup> 漏洩温度 500°C\*

\* もんじゅでは300°Cであるが、CEDANコード上500°Cとした。

#### (iv) 建物・配置関係データ

雰囲気ガス体積 2,800m<sup>3</sup>  
構築物の形状データ Table 2.2

#### (v) その他

外気との間に100%/day at 100mmAqの漏洩がある。

### 2.3.2 解析結果

雰囲気温度変化 Fig. 2.2

ナトリウムプール温度変化 Fig. 2.3

天井ライナー、コンクリート表面 Fig. 2.4

温度変化

雰囲気ガス温度は若干、プール温度はかなり、SOFIREの方が高くなった。これは燃焼速度の違いからくると考えられる。

Table 2.2 Structure Models

HS No.	Structure	Area [m <sup>2</sup> ]	Mesh Number	Comprised of	Top Surface Boundary	Last Surface Boundary	Initial [°C] Temperature
5	Wall	215.4	8	8 mm liner and 1 mm concrete	Convection to Cell 1	adiabatic	55
6	Roof	63.6	8	8 mm liner and 1 mm concrete	Convection to Cell 1	adiabatic	55
7	Floor	61.0	13	8 mm liner 150 mm perlite con- crete 6 mm concrete	Contact with pool	adiabatic	55

そこで、酸素濃度変化をFig. 2.5に示す。これからわかるように、SOFIREの方が約5割程度酸素消費速度が早い。

CEDANの燃焼モデルとSOFIREのそれとはかなり異なっているので、モデルの差が出たと思われるが、詳細は不明である。なお、「もんじゅ」のナトリウム火災解析では、湿分とナトリウムとの反応を考慮している。SOFIREのモデルでは、本来、酸素とナトリウムとの反応だけしかとり扱えないが、湿分との反応を等価的に反応熱、反応量比に換算して計算を行なっている。一方、CEDANでは、もともと酸素、水、炭酸ガスとの反応をもとり扱えるので、湿分を考慮した解析をも比較計算した。湿分の初期相対湿度は、50% at 55°Cである。雰囲気温度変化をFig. 2.6、ナトリウムプール温度変化をFig. 2.7に示す。ここでも、SOFIREの方が温度が高めになっており、しかもその差は前よりもさらに大きくなっている。

### 2.3.3 考 察

前節で行なったSOFIRE、CEDAN比較計算において結果が相異したので、両コードを詳細に検討した。その結果、つぎのことが明らかになった。

#### (I) ナトリウム火災からガスへの熱移行、物質移行について

##### a) CEDANの熱伝達係数

CEDAN、SOFIREともにつぎの実験式を用いている。

$$Nu = a (Pr \cdot Gr)^{1/3} \quad (2-1)$$

しかし、aの値についてSOFIREでは0.14、CEDANでは0.09になっており、CEDANでの値を0.14にした。

##### b) ガス物性値

燃焼面に流れ込んでくるガスは、(2-1)式を相似変換した。つぎの式で両コードとも評価している。

$$\frac{k\ell}{D} = a \cdot (Sc \cdot Gr)^{1/3}$$

(2-1)、(2-2)式で出てくるガスの物性値は、( $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $D$ 等)両コードとも異なる値を用いている。その中で、熱伝導係数と粘性係数とを一致させた。但し、拡散係数については、一致させるのは困難であるため、(CEDANでは、拡散係数はそれぞれのガスの流束に依存するから)そのままにした。

又、ガス密度に関しては、温度のとり方が両者で異なっている。すなわち、SOFIREでは雰囲気温度、CEDANでは雰囲気温度と炎温度との平均でガス密度を計算しており、解析初期のように両温度の差が大きいときはCEDANとSOFIREとでかなり差が生じることになる。

そこで、CEDANをSOFIREに合わせた。

### (ii) 雰囲気ガス温度計算について

今回の解析においては、外気へ漏洩が生じている。このように該当セル雰囲気にガスの出入りがある場合、それによるエネルギー流出入は、一般に次式で評価できる。

$$dQ = (e_i + p v_i + u_i^2) dm_i = (h_i + u_i^2) dm_i \quad (2-3)$$

$dQ$  : エネルギーの流れ

$dm_i$  : 質量変化量

$e_i, v_i, h_i$ : 比エネルギー, 比容積, 比エンタルピー

$u_i$  : 流速

$P$  : 圧力

SOFIREにおいては、(2-3)式をつぎのように近似している。

$$dQ = e_i dm_i$$

そこで、CEDANでは、つぎの2通りの式で評価した。

$$dQ = e_i dm_i$$

$$dQ = h_i dm_i$$

$u_i^2$  は一般に  $h_i$  に比して小さいと考えられる。

例えば、 $u_i \sim 30 \text{ m/sec}$  で  $1^\circ\text{C}$  のエンタルピー上昇と同程度である。

### (iii) ナトリウムプール-床ライナー熱移行

ナトリウムプールから床ライナーへの熱移行に関し、SOFIREでは、熱伝導に相当した熱通過率を、CEDANでは界面での接触熱伝達率を入力するようになっている。そこで、両者ともつじつまの合うデータを用いた。

### 2.3.3.1 解析結果

雰囲気温度変化	Fig. 2.8
ナトリウムプール温度変化	Fig. 2.9
天井ライナー、コンクリート表面温度変化	Fig. 2.10
酸素濃度変化	Fig. 2.11

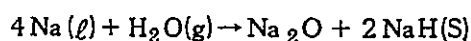
雰囲気温度、ナトリウムプール、天井ライナー、コンクリート表面温度変化はかなりよく一致した。なお、漏洩ガスのエネルギーでエンタルピーを基に評価すると約10℃程度、雰囲気温度が低下する。

つぎに、湿度を考慮した時の結果を示す。

雰囲気温度変化	Fig. 2.12
ナトリウム・プール温度変化	Fig. 2.13
圧力変化	Fig. 2.14
雰囲気ガス濃度変化	Fig. 2.15

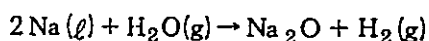
雰囲気温度、ナトリウムプール温度等は、CEDANの方がSOFIREより少し低めになった。これは、CEDANとSOFIREとで考えている反応式が相異しているからである。

—SOFIRE—



$$\Delta H = -74.7 \text{ kcal/mole H}_2\text{O}$$

—CEDAN—



$$\Delta H = -47.3 \text{ kcal/mole H}_2\text{O}$$

すなわち、1モルの水蒸気がナトリウムと反応した時、SOFIREでは、74.7 kcal、CEDANでは47.3 kcalの発熱があることになる。従って、CEDANはSOFIREよりも雰囲気、プール温度が低めになる。

結論として、湿分がない場合、CEDANとSOFIREとはよく一致し、CEDANのモデルは妥当であると考えられる。湿分が存在する場合、湿分とナトリウムとの反応機構（発生水素の問題）が明確でないため、若干差が生じたが、SOFIREの等価湿分反応モデルは、安全側であると考えられる。

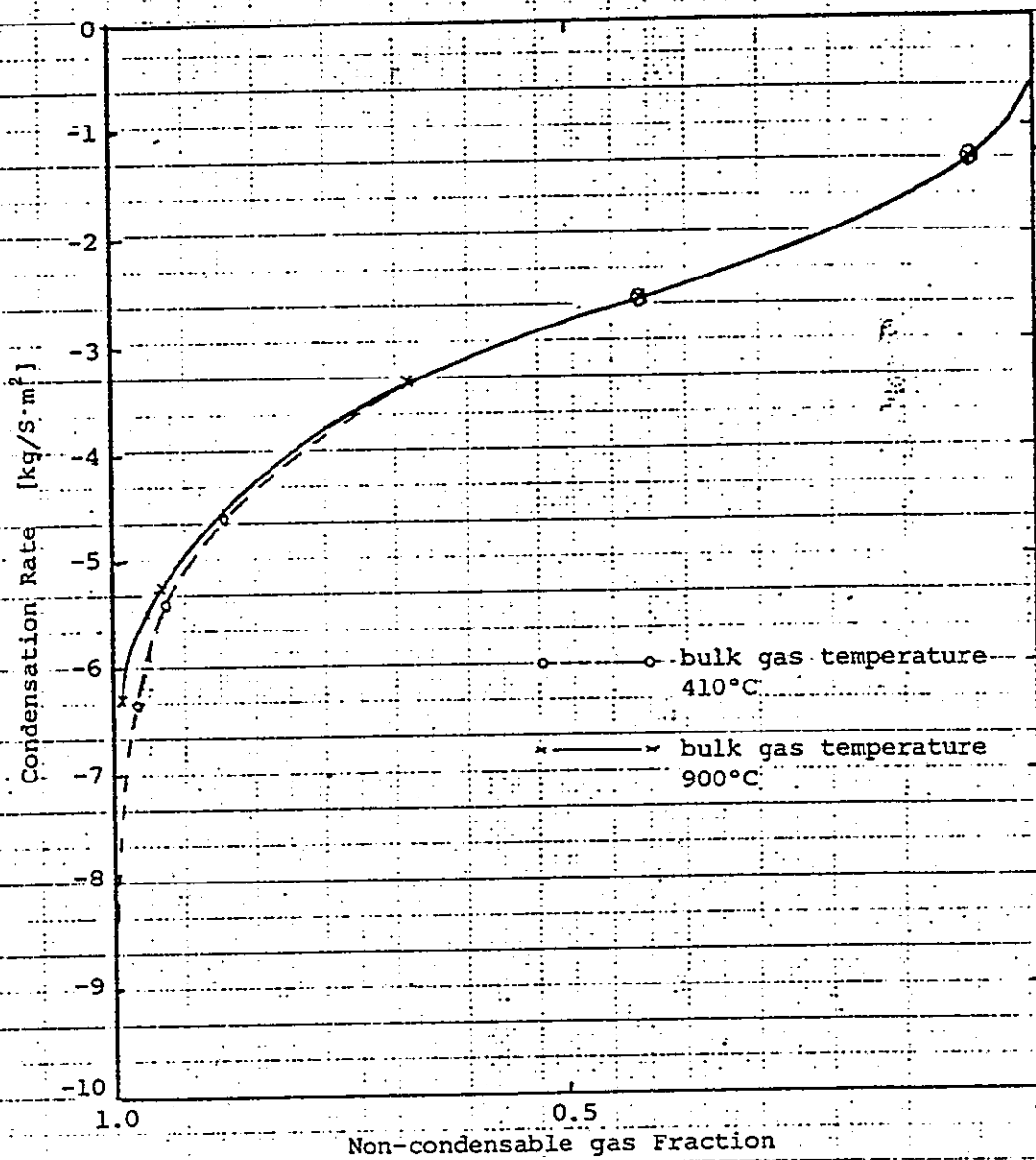


Fig. 2.1— Mass Condensation Rate V.S. Non-condensable gas fraction



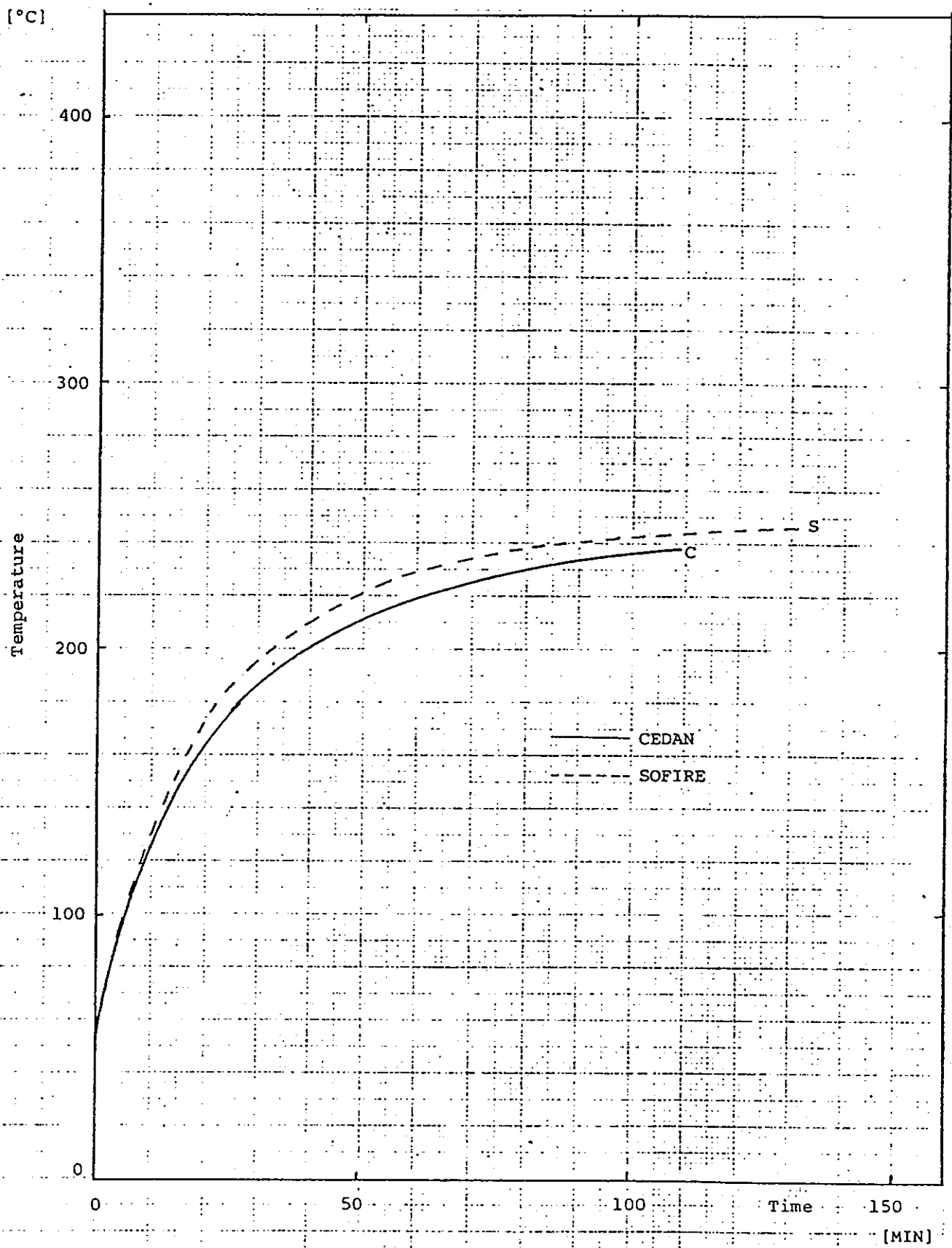


Fig. 2.2 Cell Atmosphere Temperature History

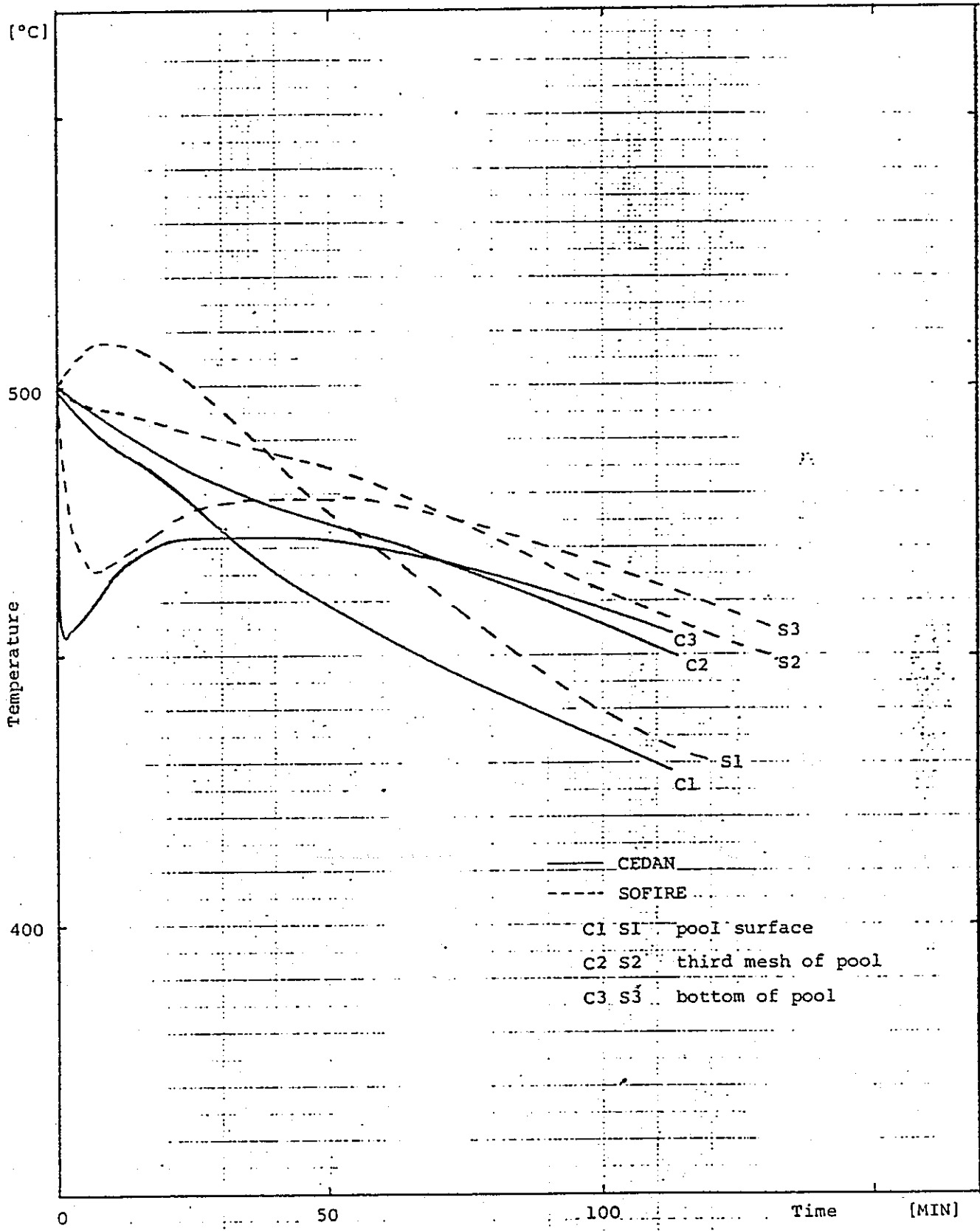


Fig. 2.3 Pool Temperature History

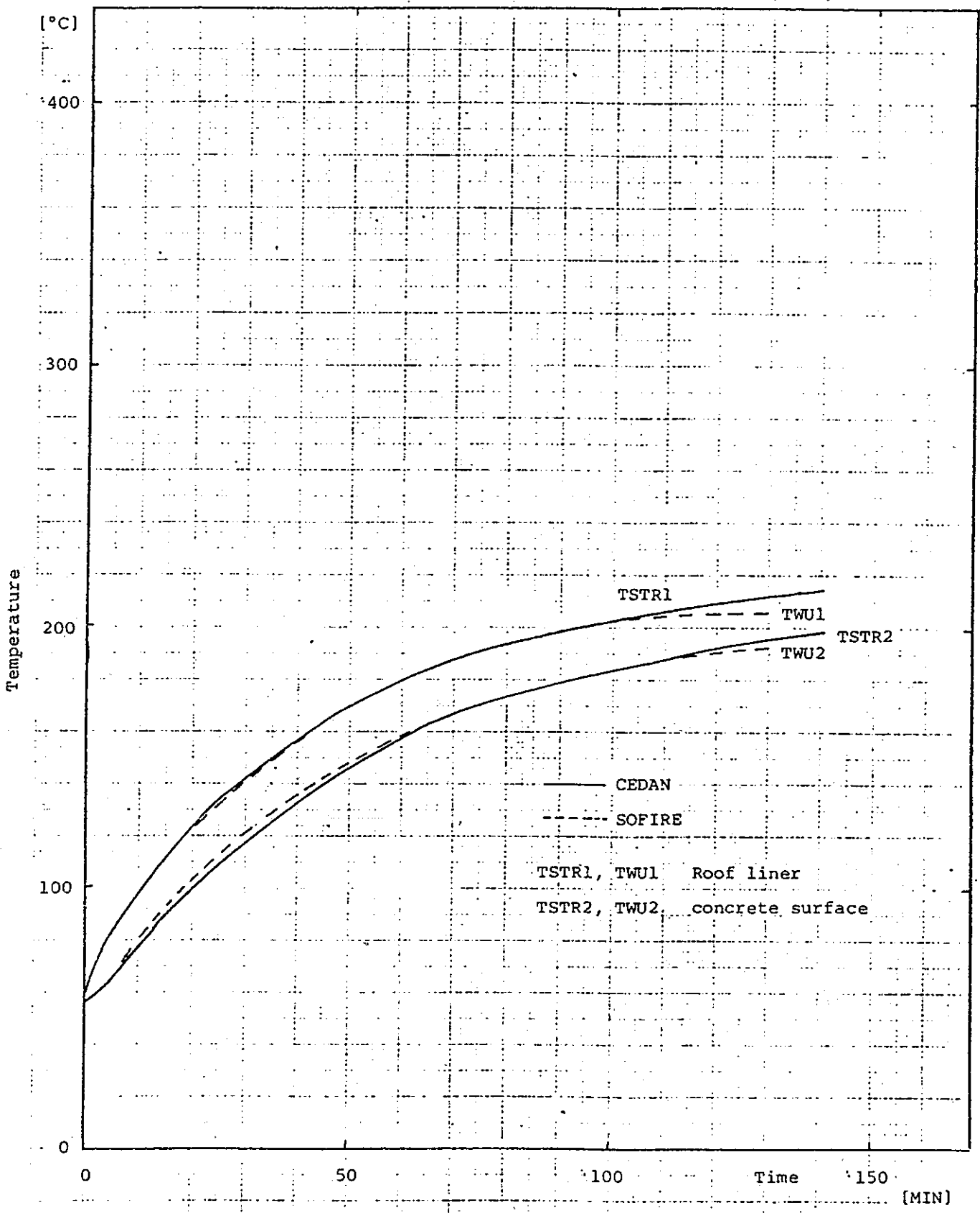


Fig. 2.4 Roof Temperature History

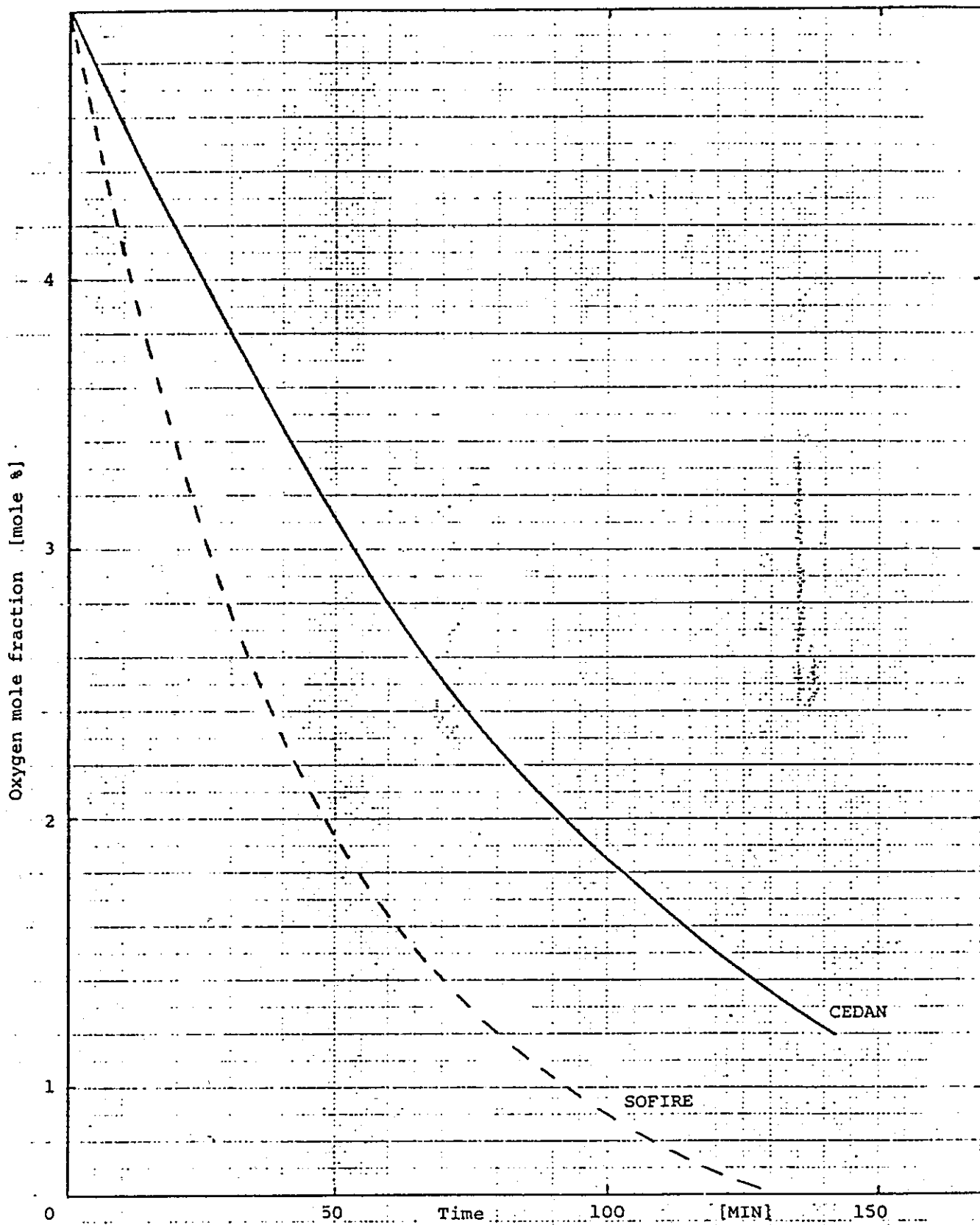


Fig. 2.5 Oxygen Mole Fraction History

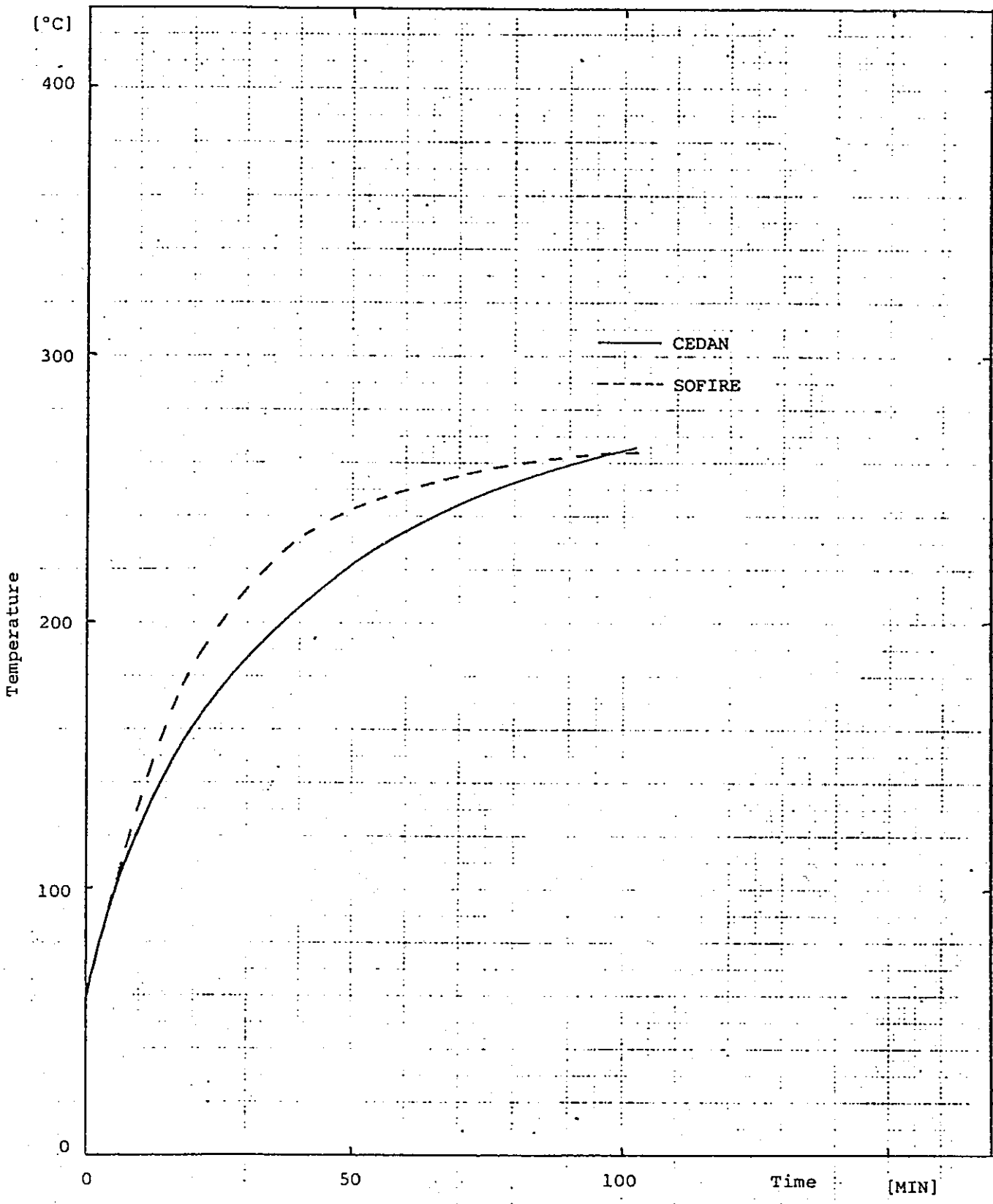


Fig. 2.6 Cell Atmosphere Temperature History

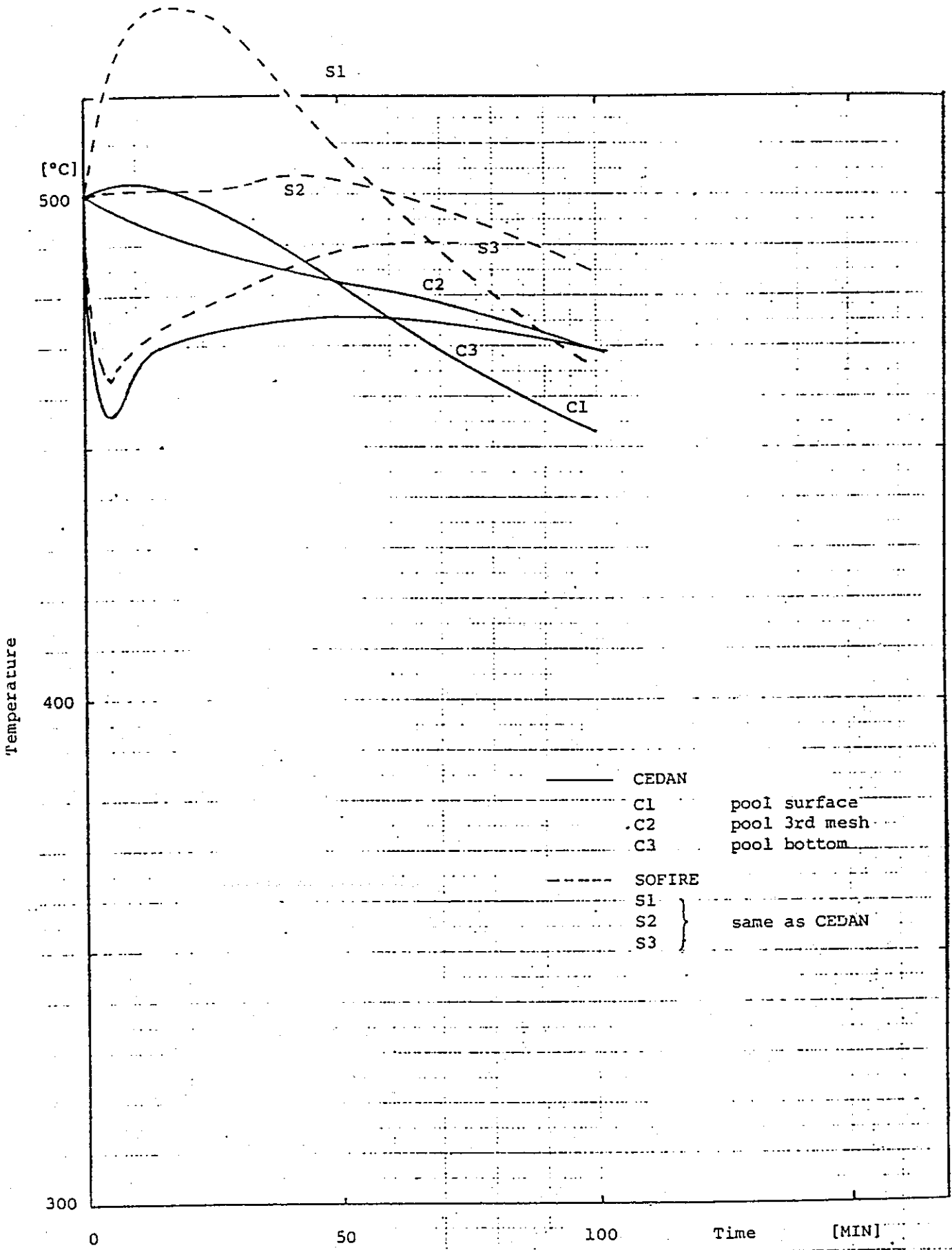


Fig. 2.7 Pool Temperature History

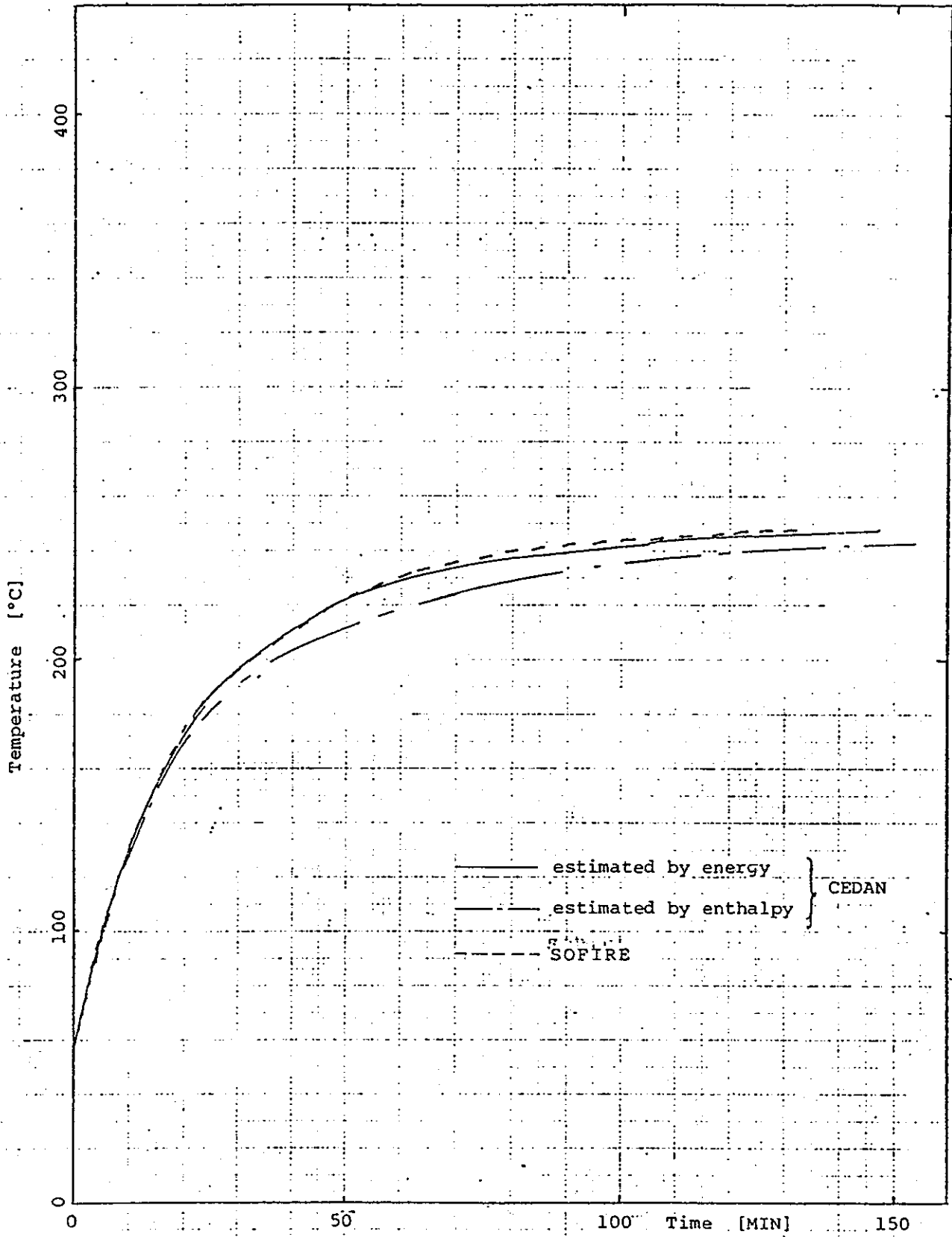


Fig. 2.8 Cell Atmosphere Temperature

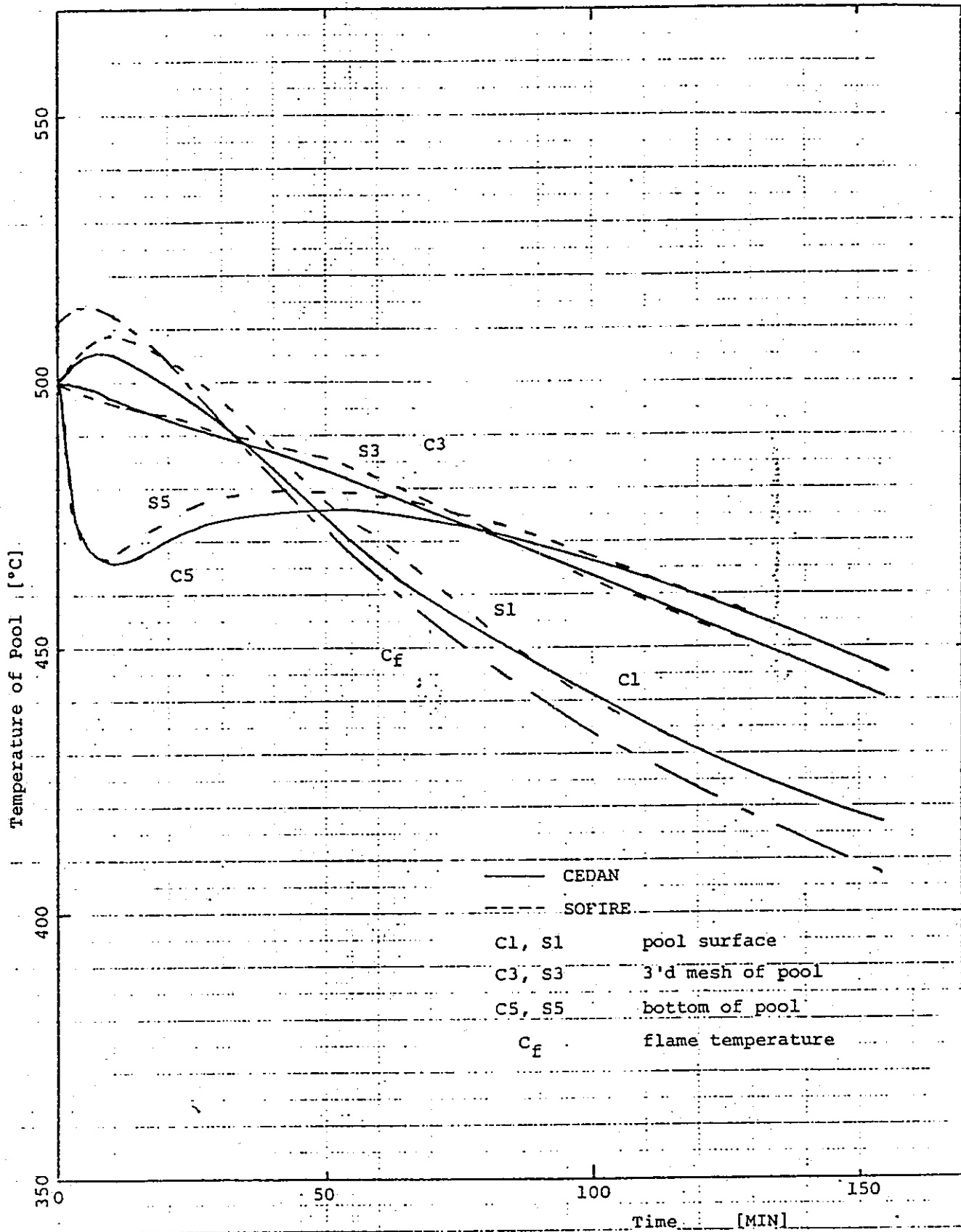


Fig. 2.9 — Temperature History of Pool



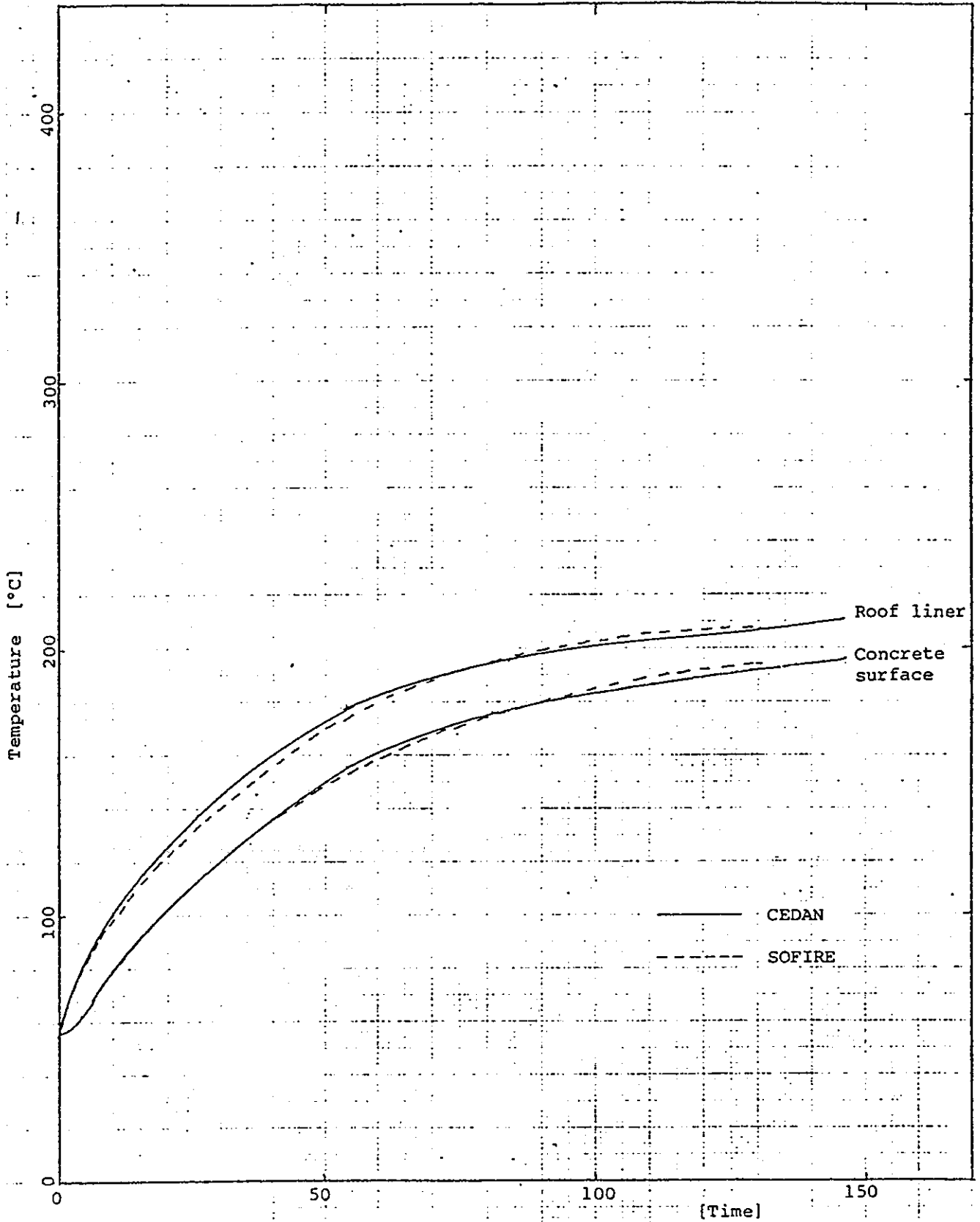


Fig. 2.10 Roof Temperature History

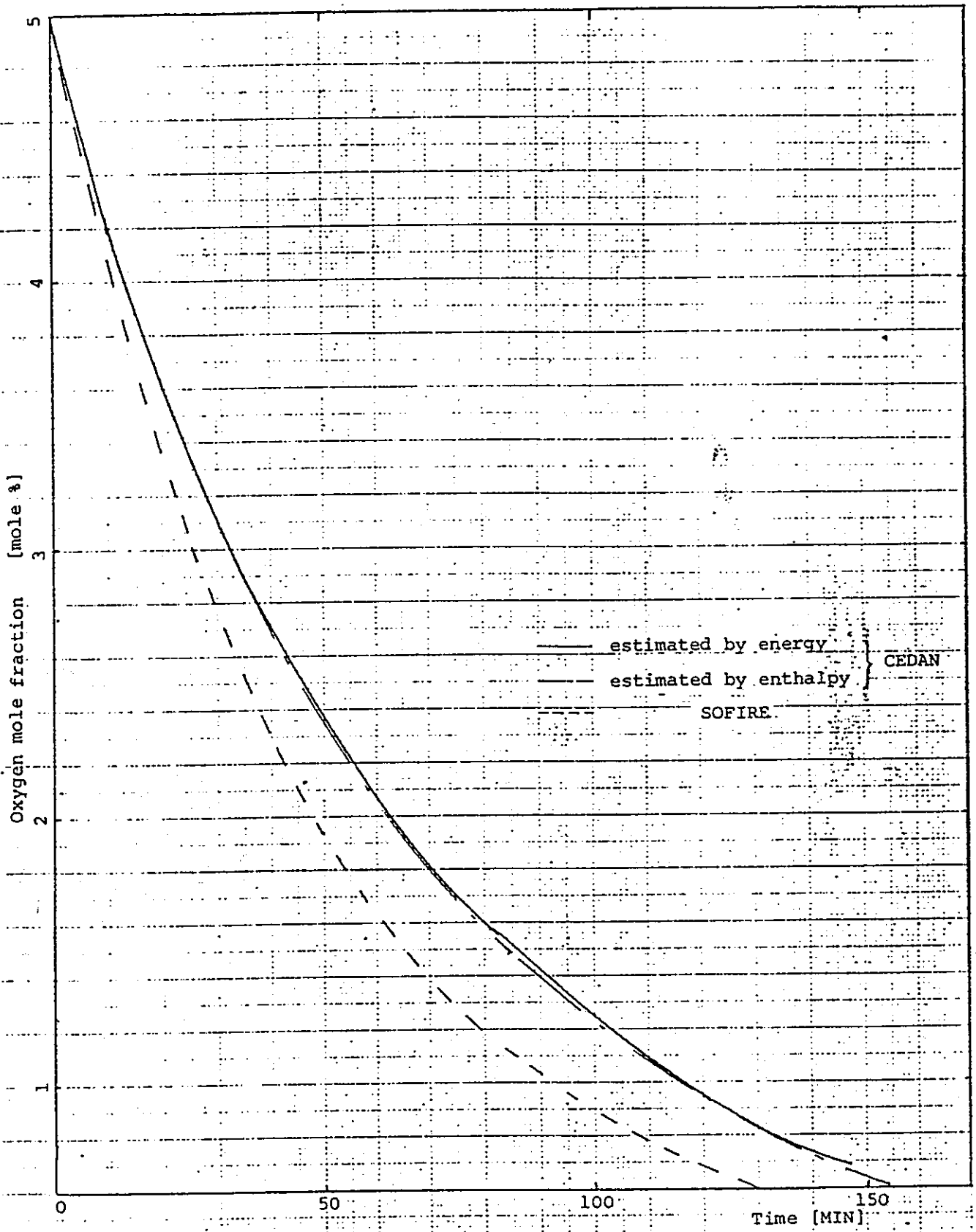


Fig. 2.11 Oxygen Mole Fraction History

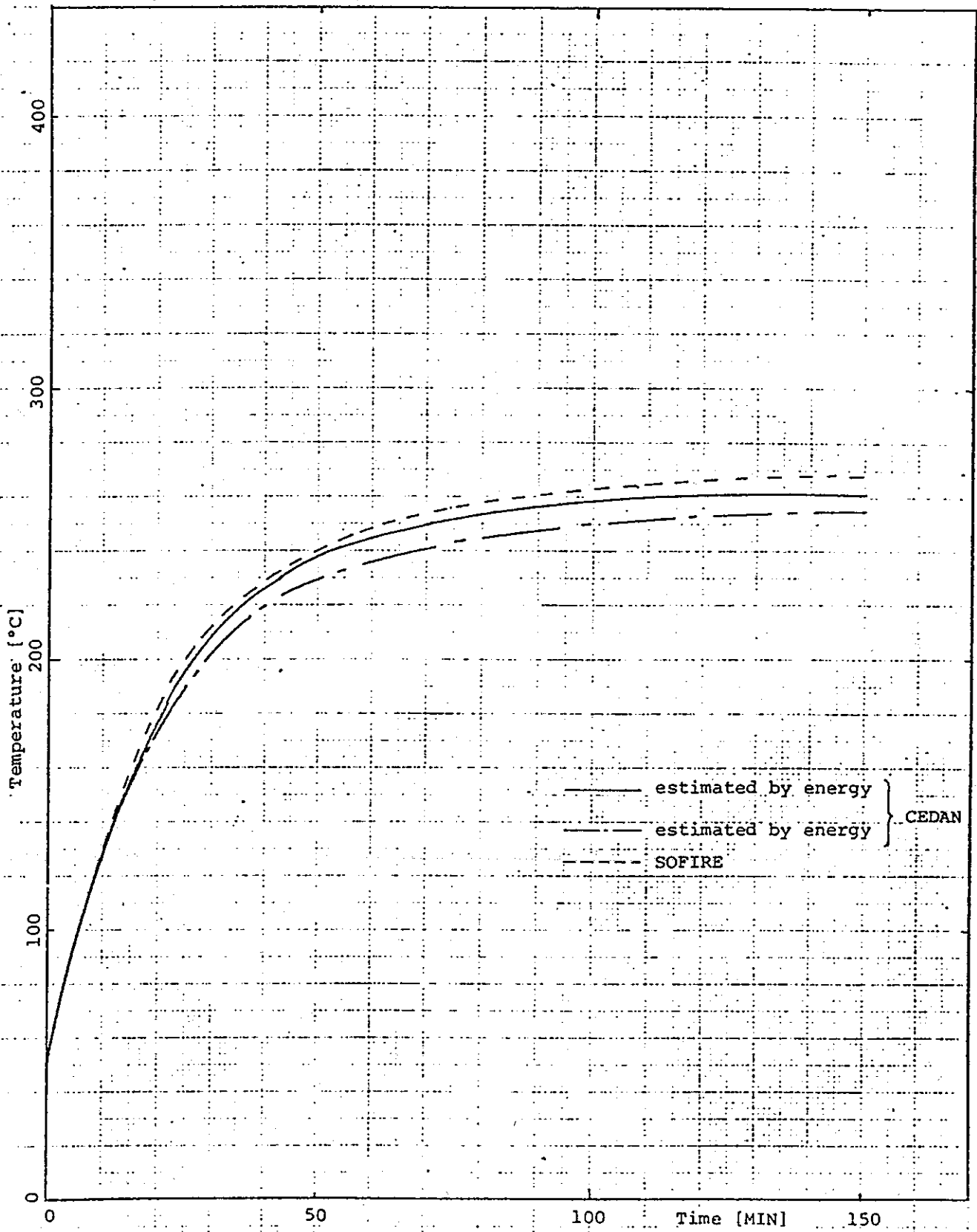


Fig. 2.12 Cell Atmosphere Temperature History  
(Account for Humidity)

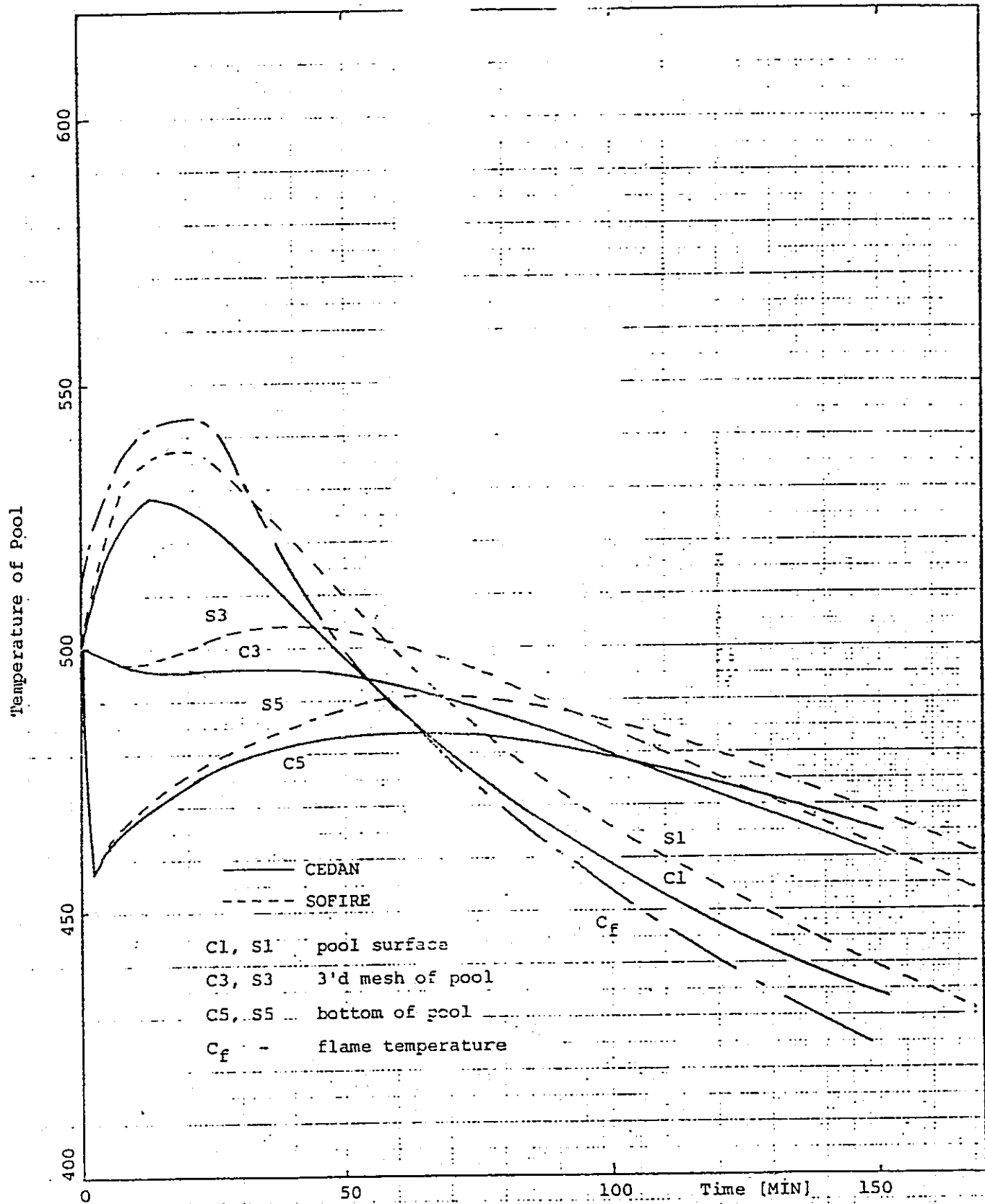


Fig. 2.13 Temperature History of Pool.  
(Account for Humidity)

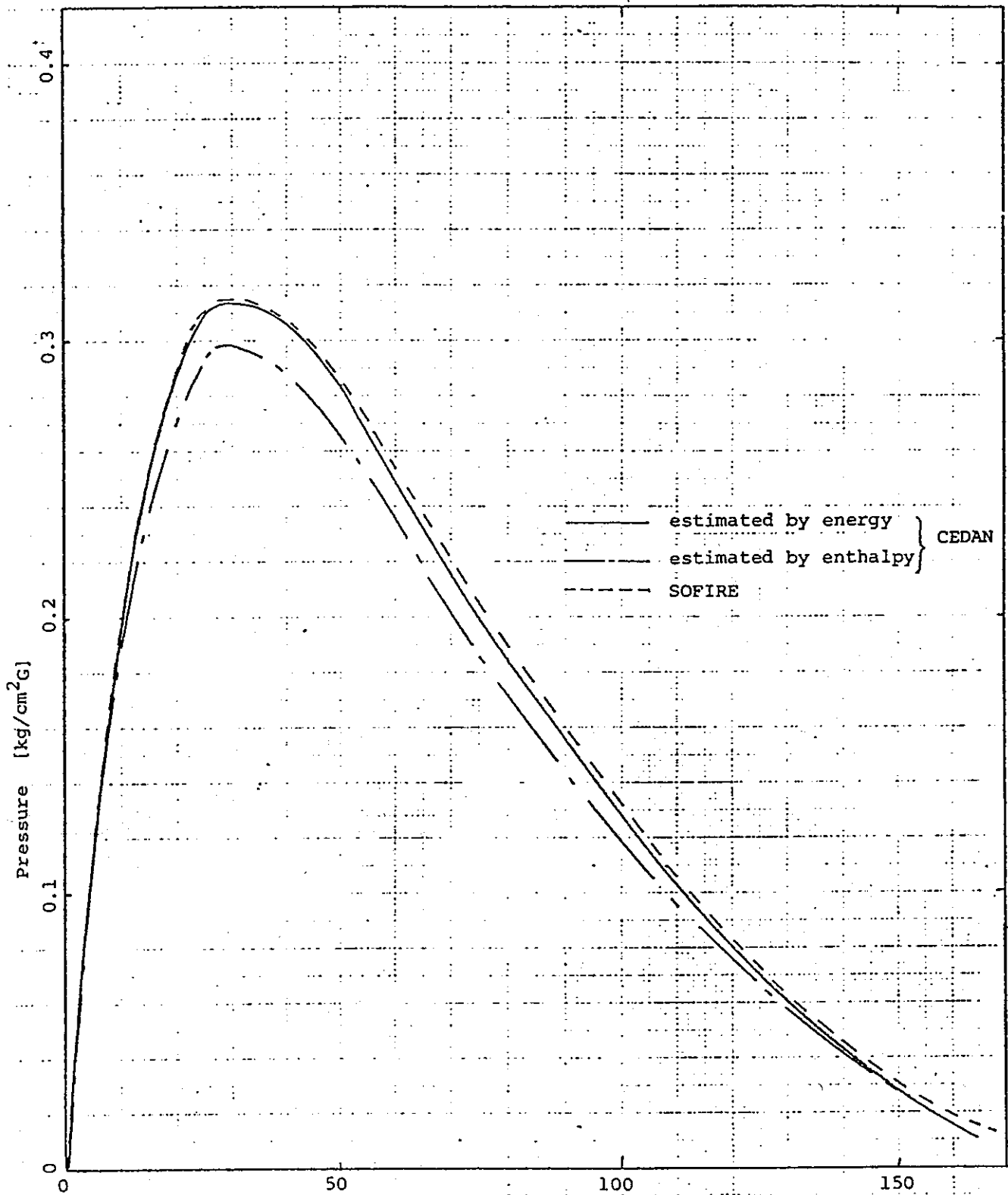


Fig. 2.14 Cell Atmosphere Pressure History  
(Account for Humidity)

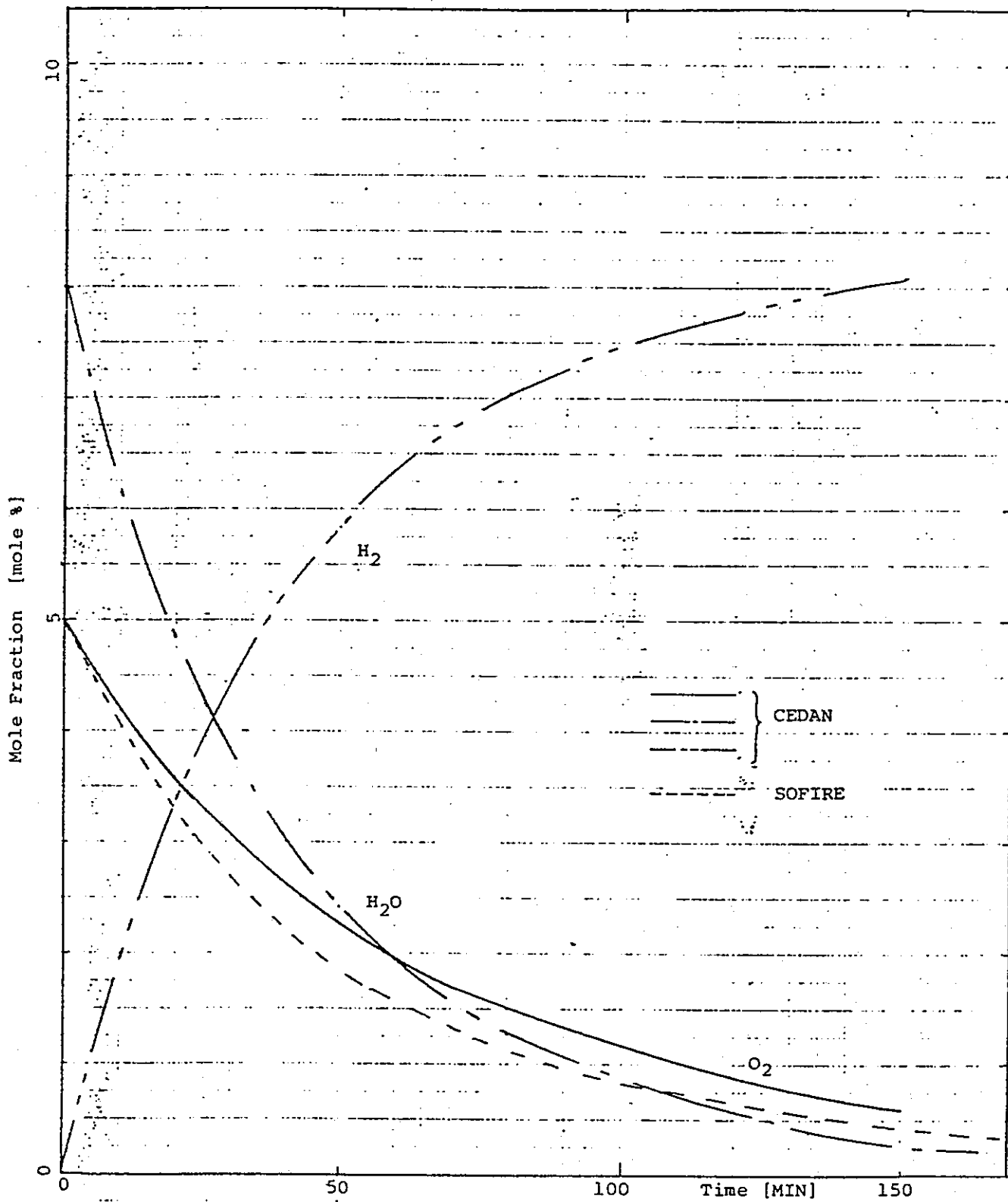


Fig. 2.15 Oxygen, Water and Hydrogen Mole Fraction History (Account for Humidity)

### 第 3 章 実際の事故を模擬した長時間計算

〔 仮想炉心崩壊後・格納容器内各部屋  
の挙動を解析する 〕

### 3.1 炉心メルトダウン後格納容器の長時間応答

何らかの原因で、炉心が溶融し、溶融炉心の崩壊熱除去に、失敗すると、溶融炉心は、炉容器、ガードベッセルを貫通し、一次系ナトリウムとともに、炉容器室床上に落下する。炉容器室の床は、ナトリウム漏洩に備えて、鋼板が張ってあるが、ナトリウムに加えて、高温の溶融炉心が落下すると、鋼板は、破損するものと考えられ、ナトリウム・コンクリート反応は避けられない。

このような事故は、つぎのように進展していくものと考えられる。(3-1) (炉容器室を対象に考える)

#### ○ ナトリウムがなくなるまでの期間(本解析の範囲)

炉容器室に落下したナトリウムは、溶融炉心の崩壊熱、ナトリウム・コンクリート反応、プール表面での燃焼、蒸発により、失なわれてゆく。この時間は、ナトリウム・コンクリート反応の程度により、大きく変わるものと考えられる。

蒸発したナトリウム蒸気は、他の部屋に漏洩してゆく。

#### ○ ナトリウムがなくなった後

ナトリウムが化学反応、あるいは蒸発により失なわれてしまうと、溶融炉心と、コンクリートとの反応が開始され、炉容器室の温度は急上昇する。

#### ○ コンクリート中への溶融炉心の貫通

溶融炉心は、コンクリートを溶かし込みながら、貫通してゆき最終的に、崩壊熱等の内部発熱と、外部への熱移行による除熱とがバランスする位置で、貫通は停止し、そこで固化するものと考えられる。

以上の現象をふまえ、解析条件は以下のように設定した。

#### (1) セル分割

解析は、4セルモデルで行なう。すなわち、セル1として炉容器室、セル2として、一次主冷却室(3ループを1つのセルとする)、セル3として、空調室(3ループを1つのセルとする)、セル4として、格納容器床上とする。セル分割の模式図をFig.3.1に示す。各セル雰囲気の初期条件をTable 3.1に、構造材の条件をTable 3.2に、各セル間の通気及び漏洩に関する条件をTable 3.3に、それぞれまとめる。



Table 3.1 Initial Conditions of Cells

	CELL 1	CELL 2	CELL 3	CELL 4
Name	Reactor Cavity	Primary Heat Transport System	Ventilation Room	Reactor Containment Building
Volume (m <sup>3</sup> )	1570	7200**	5700**	68500
Temperature (°C)	55	55	40	40
Water vapor (kg) (V/O)	9.67 0.016	77.3 0.016	149.6 0.038	1798 0.038
Sodium Vapor (kg) (V/O)	24.78 0.032*	negligible	negligible	negligible
Oxygen (kg) (V/O)	32.12 0.03	257 0.03	1485 0.21	1.785 x 10 <sup>4</sup> 0.21
Carbon dioxide (kg) (V/O)	negligible	negligible	negligible	negligible
Nitrogen (kg) (V/O)	862.7 0.92	7150 0.95	4656 0.75	5.595 x 10 <sup>4</sup> 0.75
Pool (kg)	700000 sodium	-	-	-
Pressure (kgw/cm <sup>2</sup> )	1.038	1.038	1.033	1.033

\* : sodium saturation value corresponding to 600°C

\*\* : 3 loop value

Table 3.2 Structure Models

H-S No.	Structure	Area (m <sup>2</sup> )	Mesh Number	Comprised of	Top Surface Boundary	Last Surface Boundary	Initial Temperature (°C)
5	Cavity Floor	167	11	10 mm catch pan 200 mm insulator 8 mm liner and 6.5 m concrete	contact with sodium pool	adiabatic	55
6	Wall between Cavity and PHTS Cell	869	12	50 mm steel 2.2 m concrete and 8 mm liner	convection to Cell 1	convection to Cell 2	70 - 55
7	Cavity Roof	108	9	50 mm steel and 3.1 m concrete	convection to Cell 1	convection to Cell 4	70 - 55
8	R/V and G/V	911	4	300 mm insulator 30 mm SUS	convection to Cell 1	adiabatic	77 - 510
9	PHTS Cell Floor	180	7	8 mm liner 150 mm insulator and 1.5 m concrete	convection to Cell 2	adiabatic	55
10	PHTS Cell Roof	160	9	8 mm liner and 1.5 m concrete	convection to Cell 2	convection to Cell 4	55
11	PHTS Cell Wall	351	8	8 mm liner and 1.5 m concrete	convection to Cell 2	adiabatic	55
12	Pipe and Equipment in PHTS Cell	599	4	175 mm insulator 30 mm SUS	convection to Cell 2	adiabatic	55 - 510

Table 3.2 (Conti)

HS No.	Structure	Area [m <sup>2</sup> ]	Mesh Number	Comprised of	Top Surface Boundary	Last Surface Boundary	Initial [°C] Temperature
13	RCB Floor	1632	7	1.5 m concrete	Convection to Cell 4	adiabatic	40
14	RCB Wall	3000	4	38 mm steel and 100 cm concrete	Convection to Cell 4	adiabatic	40
15	RCB Roof	3800	4	19 mm steel and 45 cm concrete	Convection to Cell 4	adiabatic	40
16	Vent Room Wall	3000	7	1.5 m concrete	Convection to Cell 3	adiabatic	40
17	Vent Room Floor	1000	7	1.5 m concrete	Convection to Cell 3	adiabatic	40

Table 3.3 Conditions of Ventilation and Leak

	Designed Pressure (mAg)	Leak rate (%/day)
Reactor Cavity → Containment Building	100	100*
Primary Heat Transport System Chamber → Containment Building	100	100
Reactor Cavity → Primary Heat Transport System	100	100*
Ventilation Room → Containment Building	Ventilation through an open area (0.01 m <sup>2</sup> )	

\* If pressure of reactor cavity exceeds the designed pressure (2.0 kgw/cm<sup>2</sup>), an open area between two cells (0.01 m<sup>2</sup>) has been arised.

(2) 崩壊熱と解析初期条件

崩壊熱は、ノミナル値を用い、それを最小2乗法でフィッティングしたものを使用する。

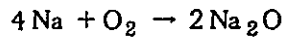
解析初期条件は、炉心崩壊事故後、1,000秒とする。この時間は、炉心崩壊事故のシーケンスにより、異なってくると思われるが、ここでは、1,000秒という値を、非機械論的に設定する。炉室に流入するナトリウムは、一次系全体のインベントリ700トンとする。初期の流入温度は、600℃である。

(3) 化学反応

気相反応として、ナトリウム蒸気と酸素：水蒸気との反応を考える場合、その反応速度として、つぎのように考える。

まず、スプレー火災において、酸素の減少速度は、Fig.3.2のようになる。CEDANで使用している反応速度の定義は、

$$\frac{d(O_2)}{dt} = -k [Na]^4 [O_2]$$



[Na]が一定だとすると

$$M_{O_2} = e^{-kt}$$

k : 反応速度

$M_{O_2}$  : 酸素のモル数

t : 反応時間

よって、Fig.3.2の傾きの値が、そのままkの値となる。

グラフより得られた値は  $1.2 \times 10^{-2}$  である。

一方、典型的なプール火災においては、kの値は  $\sim 2.1 \times 10^{-3}$  程度である。両者をくらんで、本解析では、 $2.1 \times 10^{-2}$  値を採用する。

ナトリウム・コンクリート反応による、コンクリート侵透速度はつぎのようにして決める。FFTFに対するNRCの推奨値は、

$$7 \text{ in/yr} \quad \text{時間} < 0.5 \text{ hr}$$

$$1 \text{ in/yr} \quad \text{時間} > 0.5 \text{ hr}$$

である。(3-2) 一方、CEDANにおけるナトリウム・コンクリート反応は、

$$Y = a_0 t^{a_1}$$

$Y$  ( m/s ) 侵透速度

$a_0, a_1$  パラメータ

で表わしている。

上式において、 $t = 0.01 \text{ hr}$ 、 $t = 15 \text{ hr}$ でNRCの値に一致するようにパラメータ $a_0, a_1$ を決定する。

反応熱、ナトリウム消費量は、それぞれ $4.6 \times 10^9 \text{ J/m}^3$ コンクリート、 $480 \text{ kg Na/m}^3$ コンクリートとする。(3-3)

#### (4) 加熱コンクリートからの水蒸気放出

水蒸気の加熱コンクリートからの放出量は、Mc. Cormackの実験結果モデル化したFig. 3.3の放出パターンを用いる。放出量の最大値は、 $187 \text{ kg/m}^3$ コンクリートである。(3-4)

なお、水蒸気の放出先として、炉容器床コンクリートは直接ナトリウムプールへ、その他のライナー張りのコンクリートからの水蒸気は、空調室にベントされるものとする。

裸のコンクリートからの水蒸気は、そのコンクリートが面している部屋に放出されるものとする。

なお、APPENDIX Bに入力データを示す。

## 3.2 解析結果

各部屋の温度変化を Fig.3.4 に、圧力変化を Fig.3.5, Fig.3.6 に示す。炉容器室のガス重量パーセント変化を Fig.3.7 に示す。格納容器床上でのガス体積パーセント変化を Fig.3.8 に示す。ナトリウムプールの温度変化を Fig.3.9 に示す。構造材の温度変化の例として、炉容器室天井の温度変化を Fig.3.10 に示す。

まず、炉容器を溶融貫通した炉心物質は、一次系のナトリウムとともに炉容器床上に溜まる。ナトリウムプールは、崩壊熱とナトリウム・コンクリート反応及びプール表面での燃焼により上昇する。特にプールの底は、ナトリウム・コンクリート反応による反応熱で急上昇する。( Fig.3.9 )プールの底温度が約 1 時間後に減少しているのは、プール温度がナトリウムの沸点程度になったので、熱伝導度を 10 倍にして、沸騰を模擬したためである。同様の操作を約 5.5 時間後に行なった。プール表面での燃焼は、水蒸気、酸素の量が少なく、又プール表面温度が高いため、約 40 分後に燃焼が止まっている。( Fig.3.7 )その後、主に格納容器からの酸素、水蒸気がある程度溜まれば、ナトリウム蒸気と気相反応を起こす。なお、約 6.5 時間以降、酸素が蓄積されているのは、タイムステップ上、酸素、ナトリウム蒸気反応を無視しているからである。

一方、プール燃焼が止まった後は、ナトリウム蒸気が雰囲気中に増加してきて、他の部屋に流れてゆく。圧力を見てみると、炉室の圧力は主にナトリウム・コンクリート反応による水素の分圧で、急激に上昇し、約 40 分で、炉室の設計圧 ( $2.0 \text{ kgw/cm}^2 \text{ a}$ ) を越える。炉室の圧力が室の設計圧を越えると、格納容器床上、一次主冷却室との間のシールが破損し、両者の間に、約  $0.01 \text{ m}^2$  程度の開口部が生じるものとする。Fig.3.8 からわかるように、主に格納容器床上に水素が放出されることにより、炉室の圧力は急激に減少する。

そして、約 2.5 時間以降、4 つの部屋は、それぞれの間の開口部を通して、ガスが行き来することにより、ほぼ圧力は等しいまま上昇してゆく。その後、約 3.5 時間ごろ、ベント室に、炉室の天井、壁から放出された水蒸気が流れ込みはじめ、ベント室の温度、圧力は次第に上昇してゆく。ベント室に流れ込んだ水蒸気はそこで凝縮して水になるが、部屋の温度が上昇してゆくにつれ、蒸発して水蒸気になり、格納容器床上に出てゆく。約 7 時間後以降、格納容器床上での水蒸気が増加しているのは、そのためである。

( Fig.3.8 )

従って、約3.5時間程度ベント室での水の凝縮により、水蒸気が格納容器床上に放出されるのが遅れる。

最後に、格納容器床上の挙動を見てみよう。このような事故の場合、最終的に評価するのは、どれだけの放射性物質が放出されるかである。従って、格納容器床上の健全性が維持されるかどうか重要になってくる。格納容器床上（以下C/Vと略する）の健全性をおびやかすのは主につぎの3つの要因である。

- ① C/V圧力が設計圧を越えるか
- ② C/V雰囲気温度、あるいはC/V鋼板温度が設計温度を越えるか
- ③ C/V雰囲気中の水素濃度が、空気中での爆発限界を越え、爆発の可能性があるか

以下、今回の解析条件で上の3つの条件がどうなるかを見てみよう。C/Vの圧力変化は、Fig. 3.5又は、Fig. 3.6に示してある。温度変化はFig. 3.4に、ガスの組成はFig. 3.8に示されている。Fig. 3.4からわかるように、C/V雰囲気温度は、少なくとも10時間程度ではほとんど上昇しない。従って、鋼板温度もしかりである。一方、圧力の方はほぼ一定の割合で上昇している。温度がほとんど変化しないことを考えると、この圧力上昇は、他の部屋からのガスの流れ込みによるものと考えられる。そこで、Fig. 3.8を見ると約6時間までは主に水素、それ以降は水蒸気とナトリウム蒸気により圧力が上昇していることがわかる。水蒸気とナトリウム蒸気とが共存していてなぜ化学反応を起こさないかという点、反応速度はナトリウム蒸気濃度の4乗に比例し、ある程度のナトリウム蒸気が溜まらないと反応は進まないからである。

Fig. 3.6から、C/V床上の圧力上昇率を読み取ると、約 $0.025 \frac{\text{kgw}/\text{m}^2}{\text{hr}}$ である。C/Vの設計圧を $1.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ とすると、設計圧を越えるのは約20時間後ということになる。

つぎに水素についてであるが、今回の解析条件ではこれが一番厳しい。

水素の空気中での爆発限界についてはいろいろ難しい点があるが、よく知られている4 v/oという目安を考えると、約2.5時間でC/V床上の水素濃度は4 v/oを越えてしまう。但し、C/V床上の温度が40℃と低いので爆発限界が異なる可能性がある。



又、水素は炉容器室床でのナトリウム・コンクリート反応によるものであるが、それが格納容器に出てくる時点で安定に酸素と反応する可能性もある。

要約すると、水素濃度が爆発限界を越えるのは約2.5時間後、C/V圧力が設計圧 $1.5 \text{ kg/cm}^2$ を越えるのは約20時間後、C/V雰囲気、鋼板温度は少なくとも数十時間の間はほとんど上昇しない。

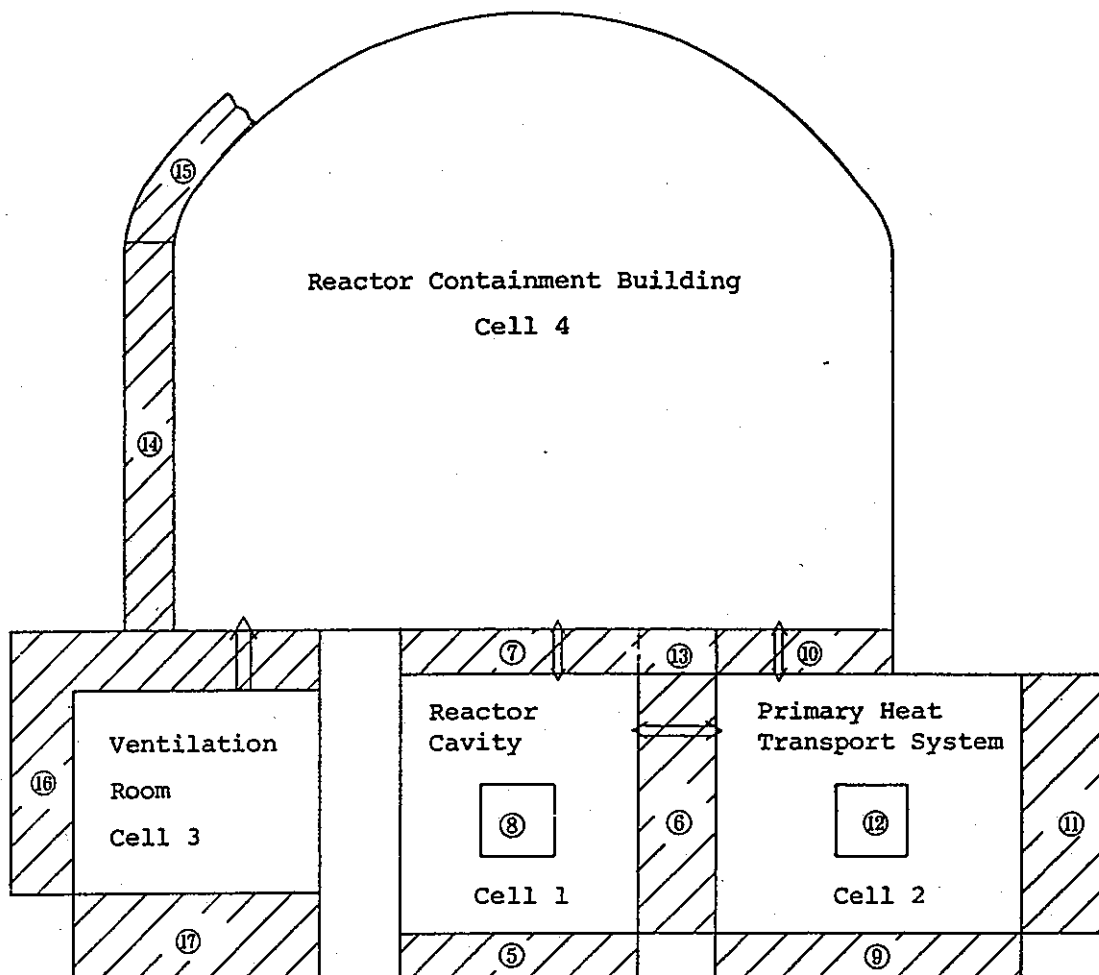


Fig. 3.1 Model for Sample Calculation

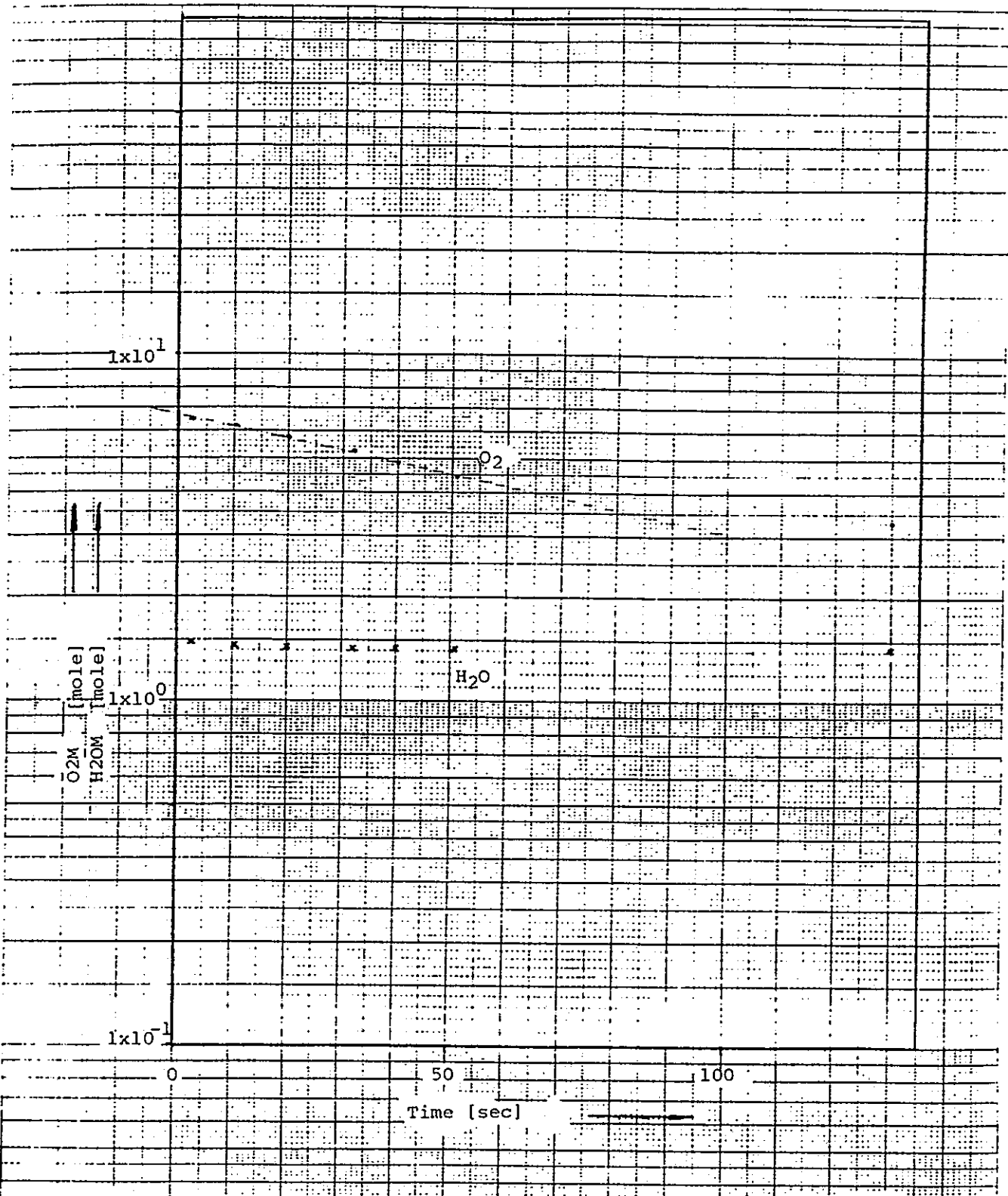


Fig. 3.2 Oxygen and Water Mole Histories Obtained  
by SPARY Code

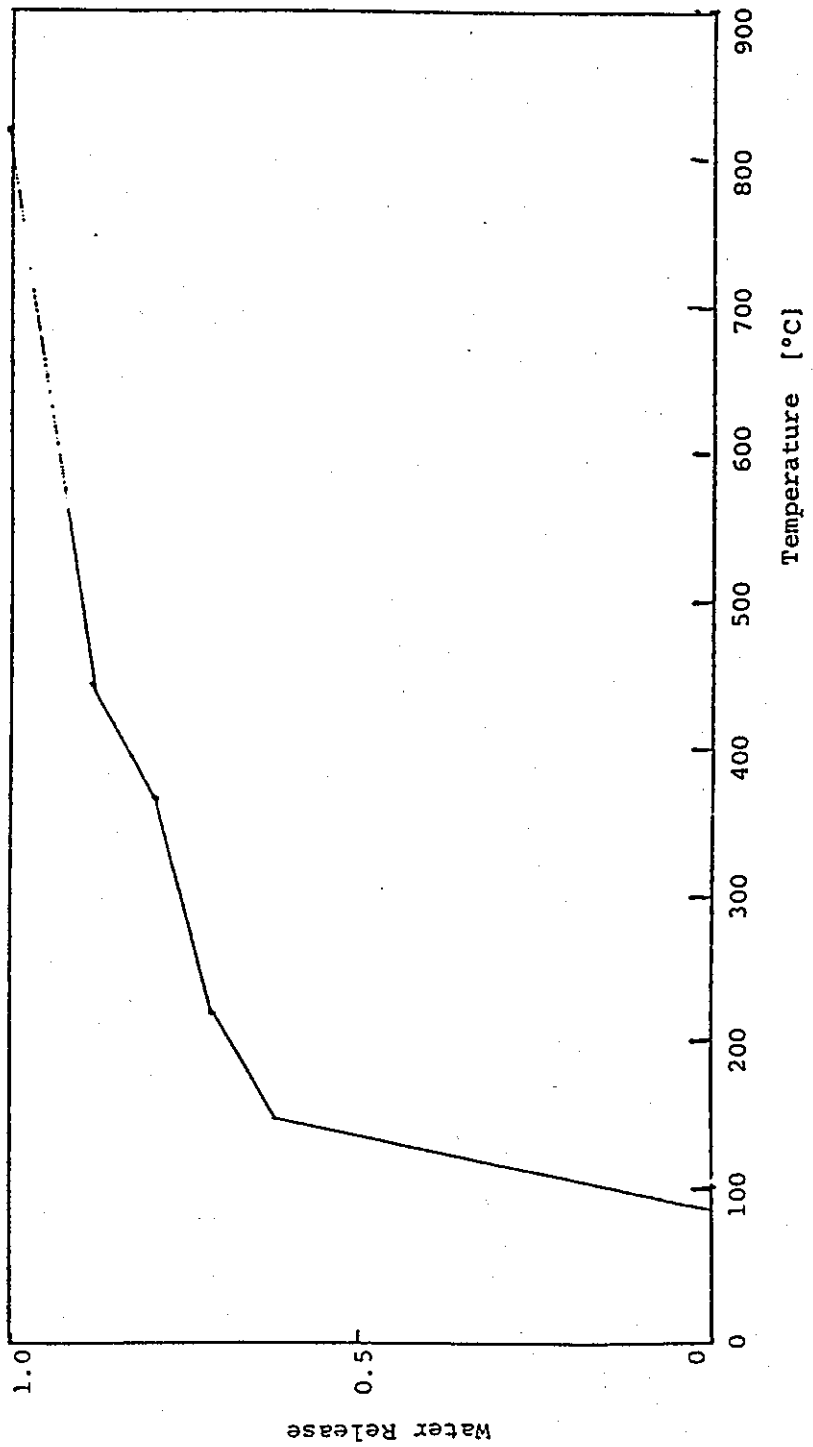


Fig. 3.3 Water Release Pattern from Heated Concrete

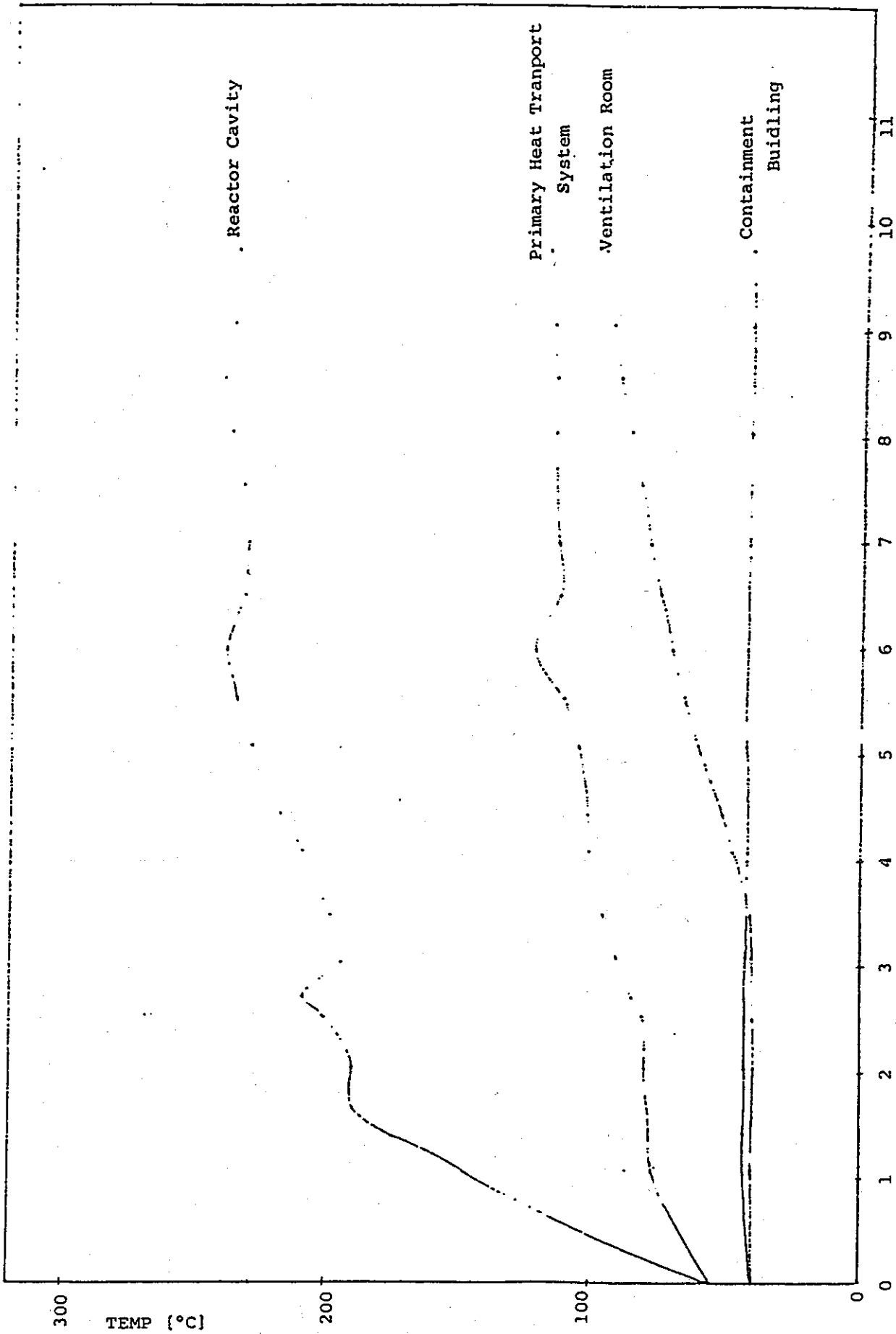


Fig. 3.4 Temperature Histories of Cell Atmosphere TIME [hr]

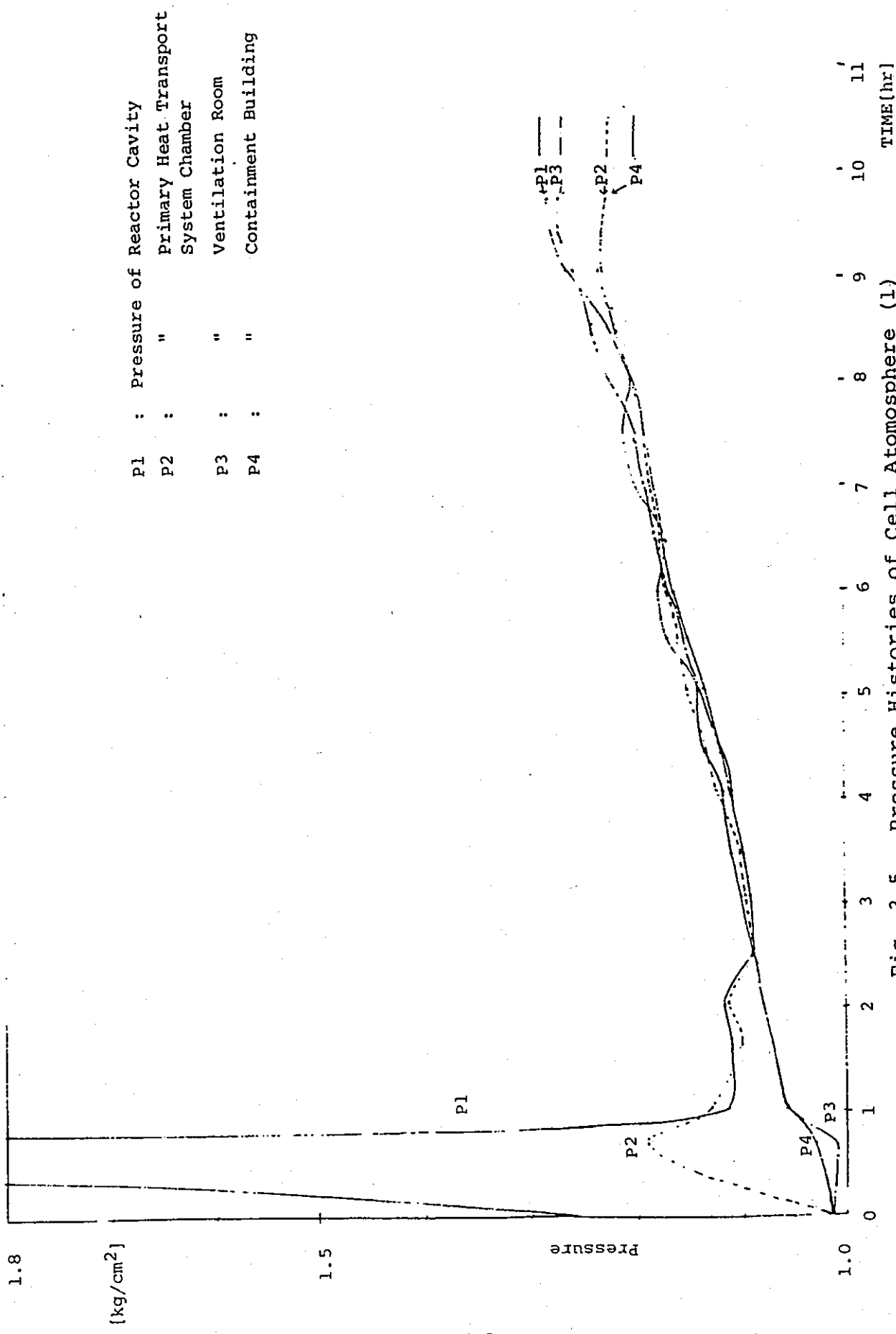


Fig. 3.5 Pressure Histories of Cell Atmosphere (1)

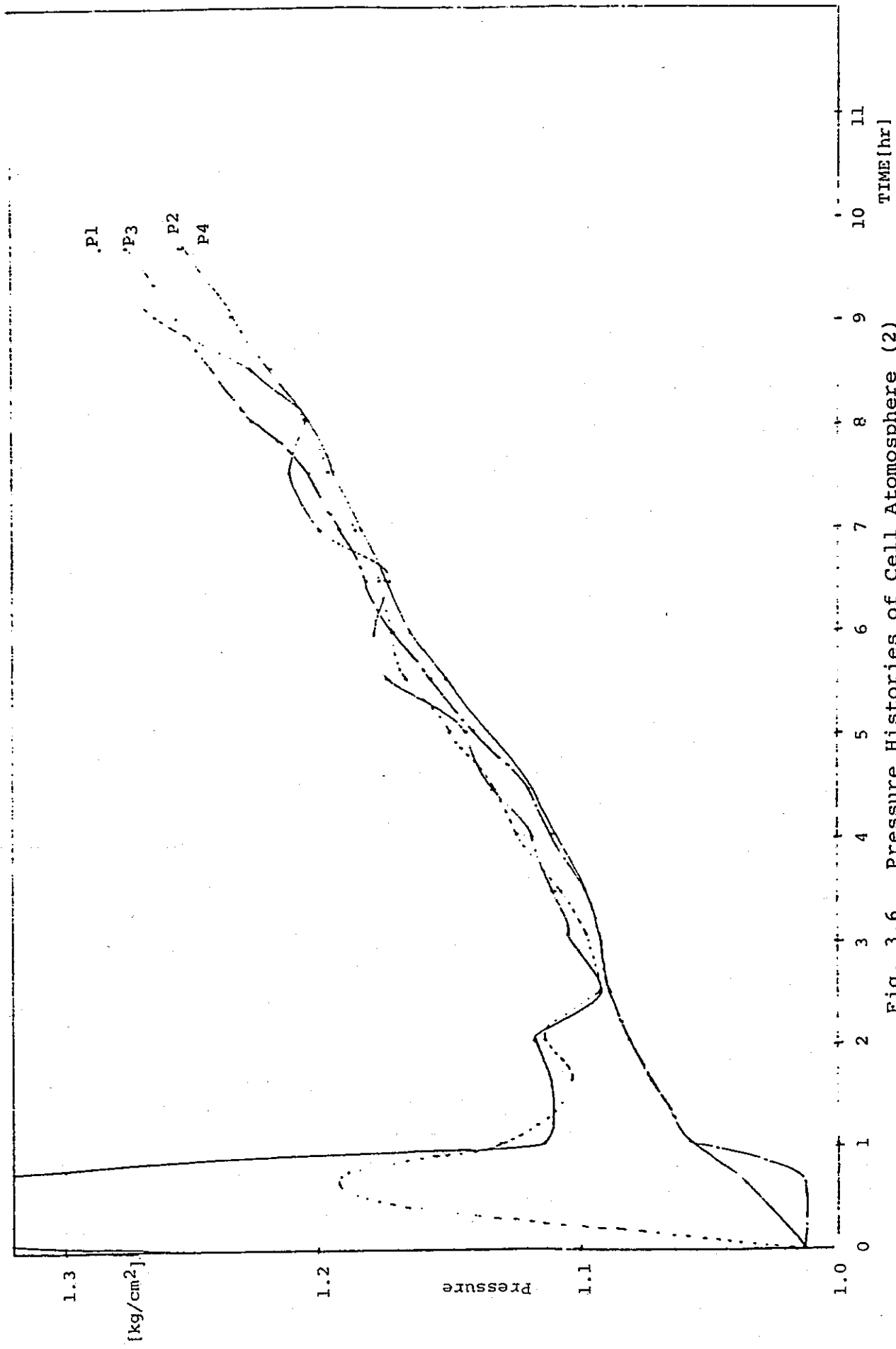


Fig. 3.6 Pressure Histories of Cell Atmosphere (2)

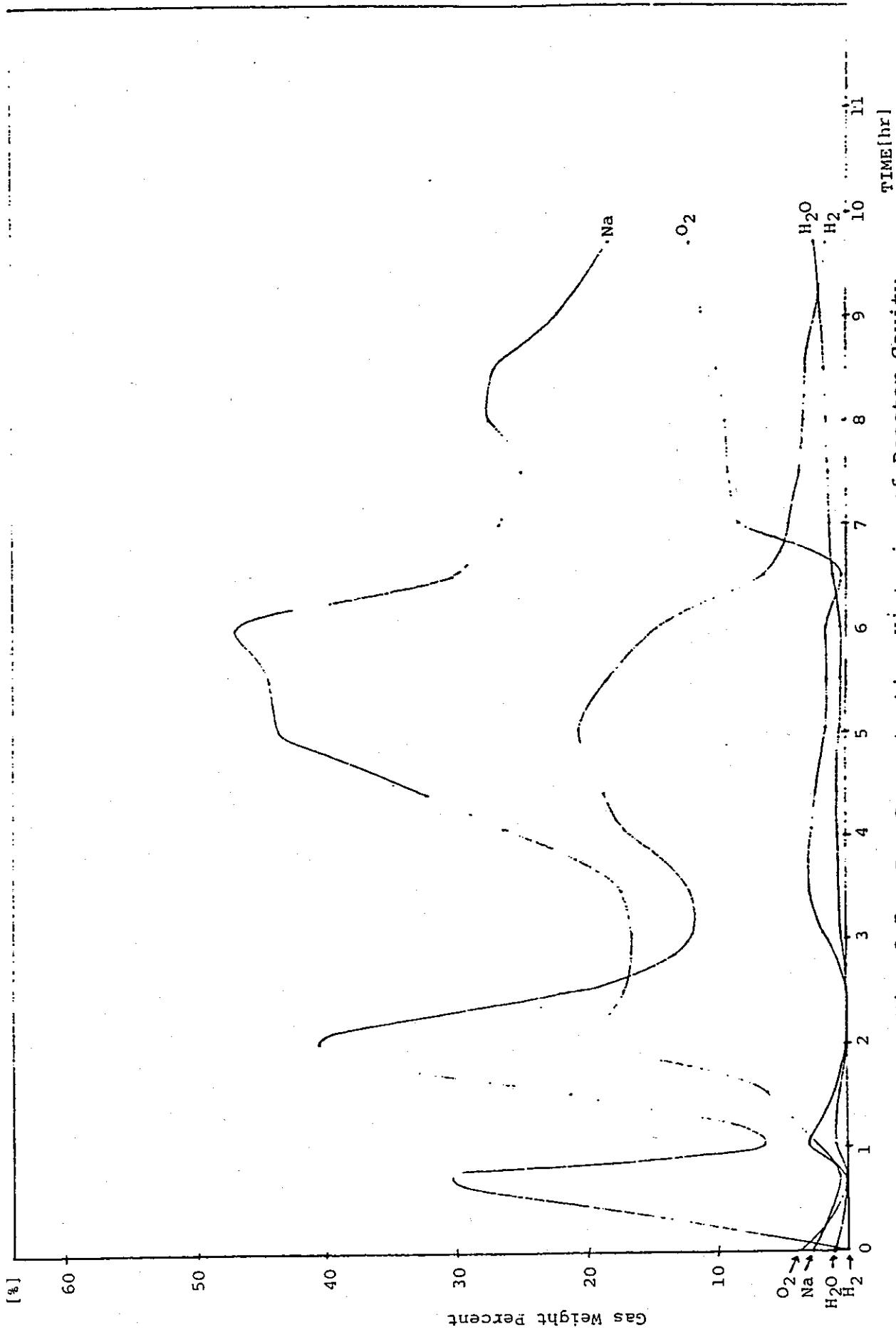


Fig. 3.7 Gas Concentration Histories of Reactor Cavity



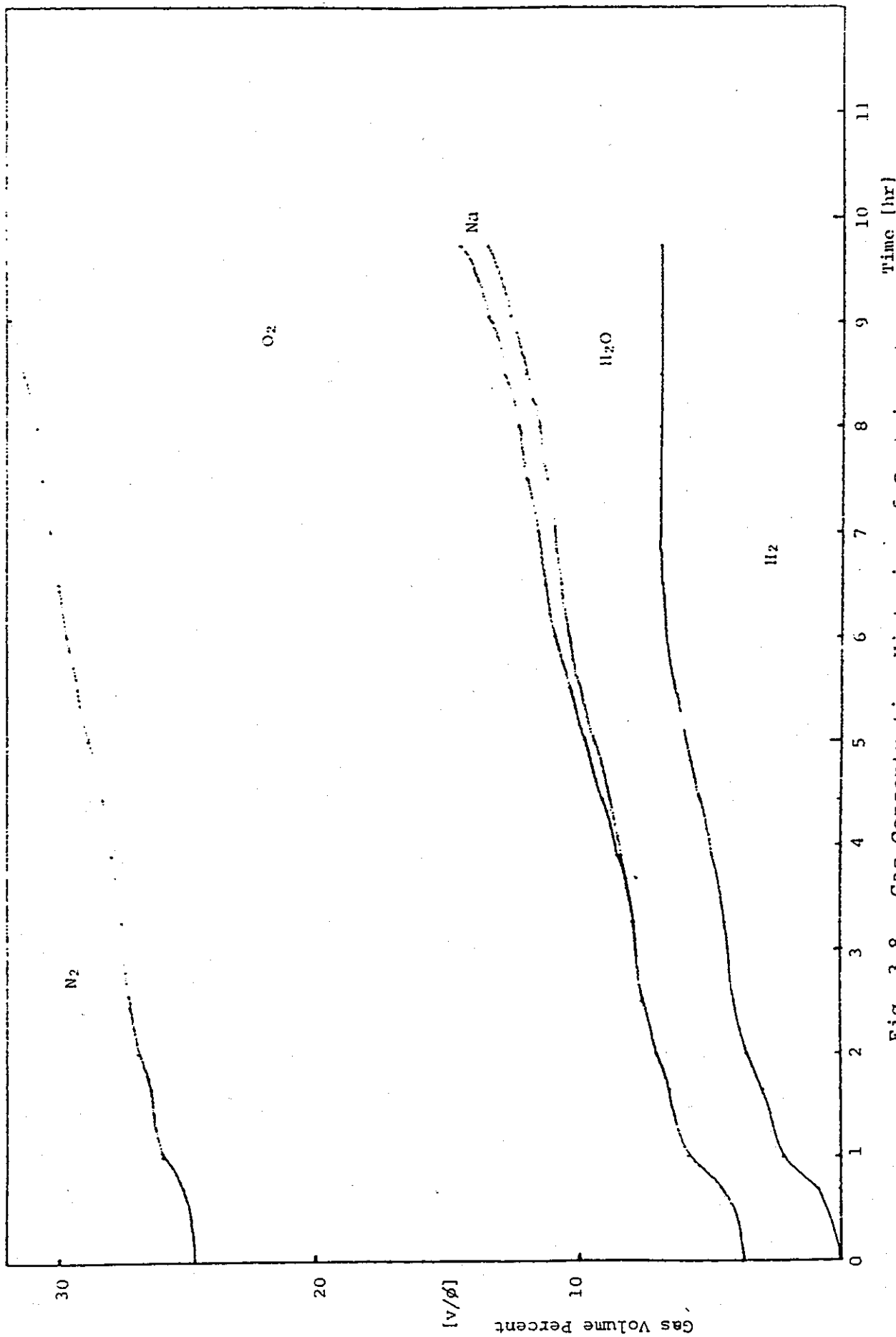


Fig. 3.8 Gas Concentration Histories of Containment Building

[DEG-C]

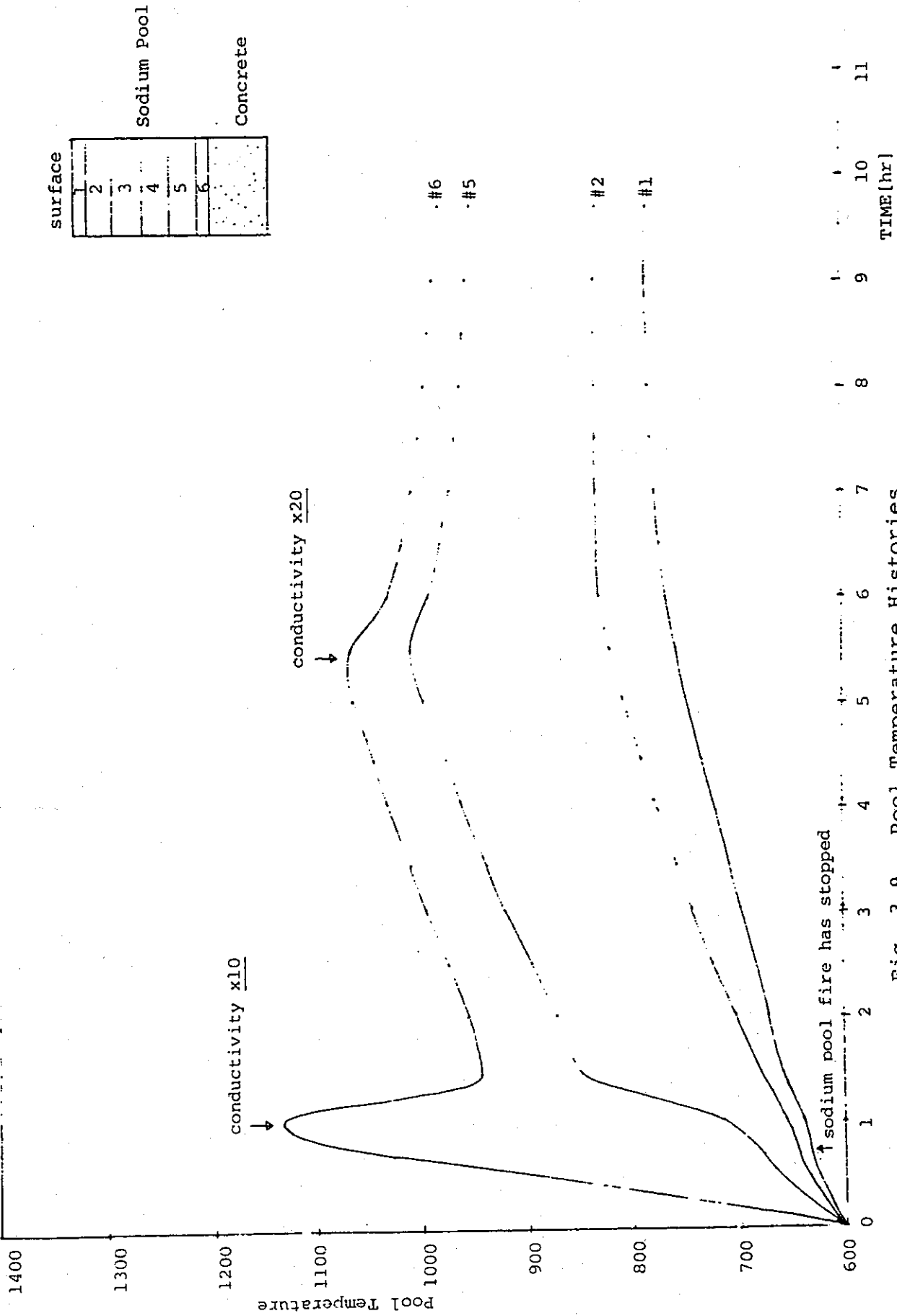


Fig. 3.9 Pool Temperature Histories

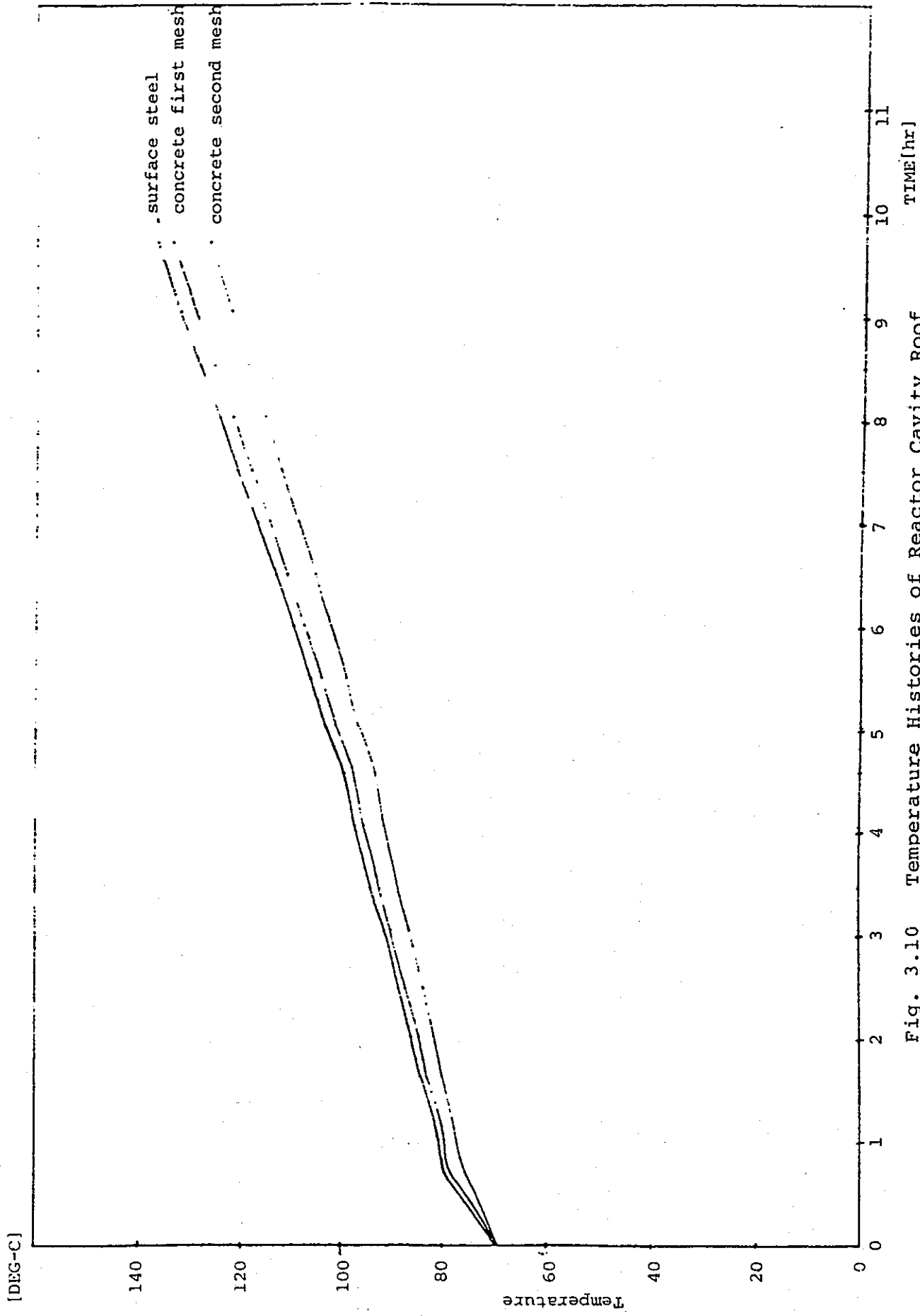


Fig. 3.10 Temperature Histories of Reactor Cavity Roof

## 結 言

今回、原型炉を対象に、仮想炉心崩壊事故後、溶融燃料による、炉容器、ガードベッセル溶融貫通が起こった場合の格納容器内各部屋の温度、圧力等の変化を解析した。解析に先立って、モデルの改修、コードの使い易さを増すための改修を行なった。又、凝縮モデル、燃焼モデルについて、SOFIRE M Iとの比較計算を含め検討を加えた。その結果、凝縮モデルはおおむね妥当な結果を得たが、燃焼モデルについては、湿分との反応の取り扱いについて、SOFIREとCEDANとでは異っているため、少し差異が認められたが、そのほかの点では、CEDANとSOFIREとはよく一致した。

改修したCEDANを使用して、炉心溶融事故後、格納容器の応答を解析した。このような、仮想的な事故の場合、最終的な評価は、格納容器外へ、どの程度、放射性物質が放出されるかを見種もることづある。その点に関し、格納容器の健全性は重要なポイントである。格納容器が健全であるか否かは、温度、圧力、水素濃度の3つから判断される。

今回の解析範囲内では、温度はほとんど上昇しなかったが、圧力は約20時間後にC/V設計圧(1.5 kg/cm<sup>2</sup>a)を越え、水素濃度は、約2~3時間後に、空気中での爆発限界といわれている4.0体積パーセントを越える結果となった。

しかし、今回の解析には、数多くの不確定要因が含まれており、今後、数多くのパラメータ・サーベイが必要であろう。

つぎに、このような事故は、非常に長期にわたって解析されなければならない、計算時間が少しでも早いコードが望ましい。現在のCEDANは、本解析(4セル17構造材)の範囲では現象を1時間計算するのにFACOM-M190で約200秒かかった。この速度が妥当なものか否かは難しいところであるが、現在のCEDANのように、ただ1つのタイムきざみ巾で計算を行なうのでは、ムダが多いと考えられる。すなわち、非常に早い現象(例えば、気相ガス反応、開口部を通してのガスの流れ)から、非常にゆっくりとした現象(構造材の温度上昇)まで、いろいろな現象が同時に進行するので、それぞれの現象時間に最適な時間きざみ巾で計算を行なうのがより合理的であるのは明らかであろう。

## 謝 辞

本研究の第3章の計算を行なうに際し、動力炉、核燃料開発事業団、大洗工学センター蒸気発生器開発部高速炉安全性試験室の吉川栄和氏、野中信之氏及びPAPASグループの諸氏に有益な御助言、御便宜を賜りましたことに対して、ここに深く感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- (1-1) L.C. Richardson, et al, "CONTEMPT A Computer Program for Predicting the Containment Pressure-Temperature Response to A Loss of Coolant Accident", IDO-17220, AEC Research and Development Report, June 1967
- (1-2) R.O. Wooton, H.I. Avci, "MARCH (Meltdown Accident Response Characteristics) Code Description and User's Manual", NUREG/CR-1711 BMI-2064, Sep. 1980
- (1-3) R.D. Peak, "User's Guide to CACECO Containment Analysis Code", HEDL-TC-859
- (1-4) R.D. Gasser, "CONAN: An LMFBR Containment Response Computer Code", NUREG/CR-1355, BNL-NUREG-51151, Nov. 1979
- (1-5) J. Fermandjian, "Calculation of the Response and of the Temperatures in a Containment during a Sodium Pool Fire with Sodium-Concrete Interaction (NABE Containment Analysis Code)", PNC-FRANCO-DEBENE Specialist Meeting on "Radiological Consequences of Postulated LMFBR Accident, Jan. 19-21, 1981, Tokyo
- (1-6) Sparrow, E.M., "Condensation Heat Transfer in the Presence of Non-Condensables, Interfacial Resistance, Superheating, Variable Properties and Diffusion", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 9 1125-1144 (1966)
- (1-7) 森 康夫, 土方邦夫, 「不凝縮気体を含む蒸気の垂直平板まわりの凝縮の理論的研究」  
日本機械学会論文集(第2部)38巻306号(昭47-2)

- (1-8) JANAF. "Thermo-chemical Tables", second edition
- (1-9) A. Padilla Jr. "High-Temperature Thermodynamic Properties of Sodium", ANL-8095
- (1-10) G.H. Golden and J.V. Tokar, "Thermophysical Properties of Sodium", ANL-7323
- (2-1) 森井他「ナトリウムとコンクリート反応解析コードの開発(II)」  
PNC SJ206 80-08 1980年3月
- (3-1) E.L. Gluekler, et al, "Transient Containment Response and Inherent Retention Capability".  
Nuclear Engineering and Design, 42 (1977)
- (3-2) "Safety Evaluation Report for FFTF" Appendix C,  
NUREG-0358, Aug. 1978
- (3-3) R.D. Peak et al, "Response of Liquid Metal Fast Breeder Reactor Containment to a Hypothetical Core Meltdown Accident", Nuclear Eng. & Desig. 42 (1977)
- (3-4) S.F. Bankert et al, "FFTF Reactor Cavity Water Release for Vent Evaluation", HEDL-TI-75236 (1977)

APPENDIX A

プロッターテープ作成補助コード  
CEDAN・PLOTの説明



# 1. CEDAN, PLOTのプログラム構成の説明

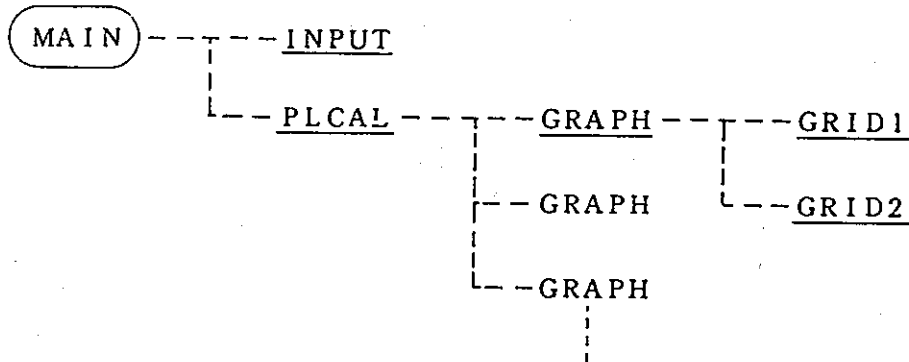
## 1-1. 作成するグラフ

- ① セルの温度 (最大4つまで)
- ② セルの圧力 ( " )
- ③ ガス質量比 (8種類まで, 任意のガスを指定できる)
- ④ プール質量 (最大4つまで)
- ⑤ 構造材温度 (24個まで, 任意のメッシュの温度を指定できる)

CEDAN, PLOTでは, 上記の5種類のグラフを作成する。これらは, CEDAN  
実行時に記憶したデータを, UNIT番号4に, フォーマットなしで書き出す。

又, 上のデータはそのまま計算終了時に, サマリー・アウトプットとして, サブ・  
ルーチンPRINTSで書き出す。

## 1-2. 構成とサブ・ルーチンの内容



<サブ・ルーチン>

- \* INPUT --- データの入力 | テープ入力 (UNIT4に書き出したデータ)
- | カード入力 ( 2-1参照 )

を行なう。

- \* PLCAL --- 主要プログラム
- \* GRAPH --- グラフを描く。
- \* GRID1 --- 対数Y軸のとき, グラフに格子を描く。
- \* GRID2 --- グラフに格子を描く。

2 人 力

2-1 カード入力形式

変 数 名	PORMAT	意 味 ・ 用 法	
I 1 I 2	I 4 I 4	I DATAの配列番号 I 1~I 2	
N	I 1	通常=0, 最終カードのみ=1とする。	2枚1組とし, I 2=34まで
	7X		
IDATA(I 1) } IDATA(I 2)	8 I 8	整数入力値 ( <u>2-2参照</u> )	
I 1 I 2	I 6 I 6	R DATAの配列番号 I 1~I 2	
N	I 1	通常=0, 最終カードのみ=1とする。	2枚1組とし, I 2=19まで
	I 1X		
R DATA(I 1) } R DATA(I 2)	5 F I 2.0	実数入力値 ( <u>2-3参照</u> )	
INT XLG YLG	I 8 F I 2.0 F I 2.0	グラフに PLOTしたデータのいくつおきに記号を書くかを指定 X軸の長さ [mm] Y軸の長さ [mm]	

2-2 整数入力値 -- IDATA(I)の内容

I	変 数	意 味 ・ 用 法								
1 } 4	KTEMP(I) } KTEMP(4)	<p>〈セル温度〉</p> <p>=1としたものを全て1枚のグラフに書く (書かないものは=0)</p>								
5 } 8	KPRES(I) } KPRES(4)	<p>〈セル圧力〉</p> <p>=1としたものを全て1枚のグラフに書く</p>								
9 } 12	IPCON1(I) } IPCON1(4)	<p>〈ガス質量比〉</p> <p>1~8までのガス番号で, どれをグラフに書くかを指定する。 (1枚に4種類までのガスが書け, 2枚までのグラフが書ける。)</p>								
13 } 16	IPCON2(I) } IPCON2(4)	<p>[例]</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td>1. H<sub>2</sub>O (1)</td> <td>5. Na (2)</td> </tr> <tr> <td>2. Na (1)</td> <td>6. O<sub>2</sub> (2)</td> </tr> <tr> <td>3. O<sub>2</sub> (1)</td> <td>7. H<sub>2</sub> (2)</td> </tr> <tr> <td>4. H<sub>2</sub> (1)</td> <td>8. H<sub>2</sub>O (3)</td> </tr> </table>	1. H <sub>2</sub> O (1)	5. Na (2)	2. Na (1)	6. O <sub>2</sub> (2)	3. O <sub>2</sub> (1)	7. H <sub>2</sub> (2)	4. H <sub>2</sub> (1)	8. H <sub>2</sub> O (3)
1. H <sub>2</sub> O (1)	5. Na (2)									
2. Na (1)	6. O <sub>2</sub> (2)									
3. O <sub>2</sub> (1)	7. H <sub>2</sub> (2)									
4. H <sub>2</sub> (1)	8. H <sub>2</sub> O (3)									

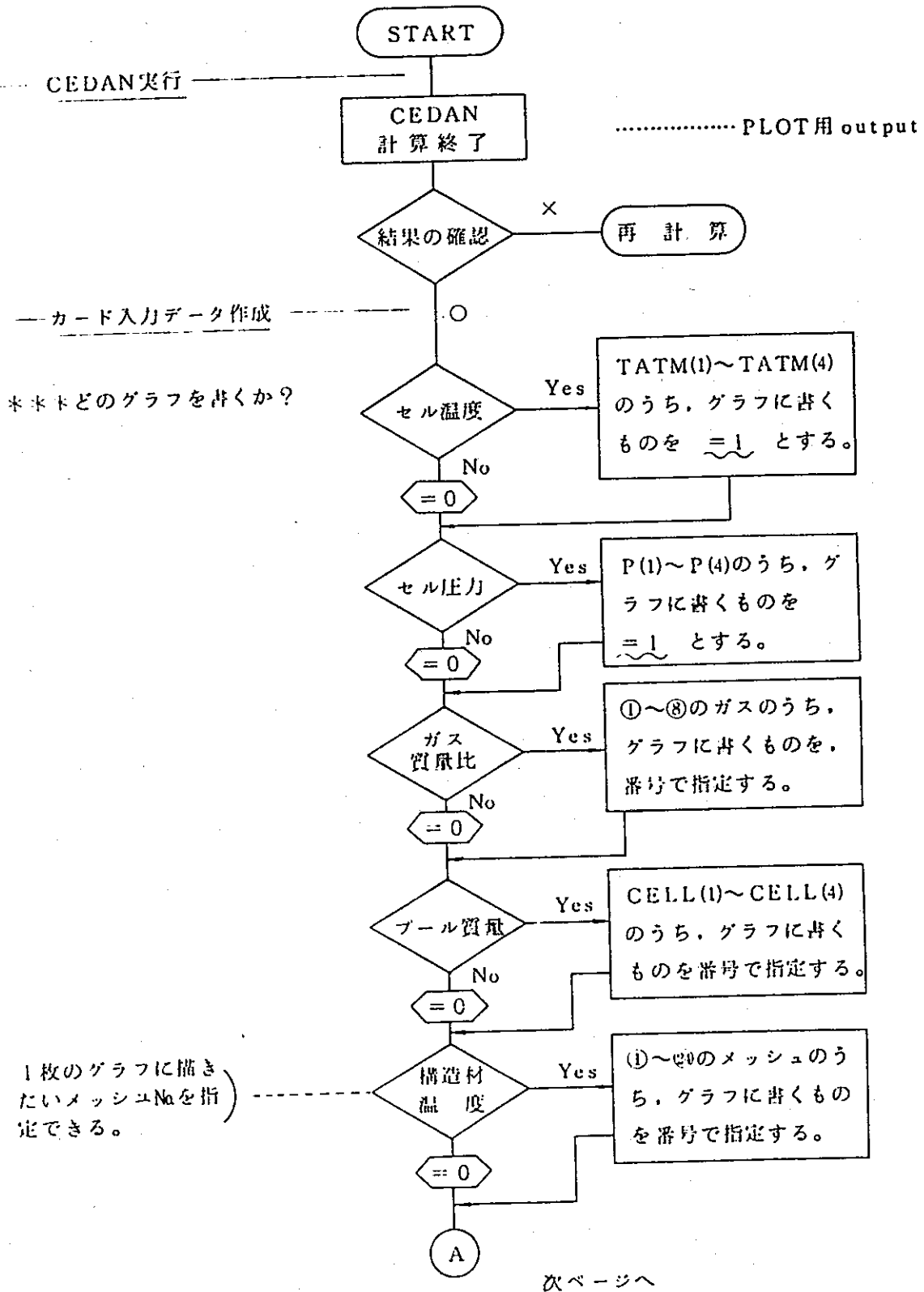
I	変数	意味・用法
17 }	IPPOOL(1)	<p style="text-align: center;">〈プール質量〉</p> セルNoを1～4迄の番号で指定する。
20	IPPOOL(4)	
21 }	IPSTR1(1)	<p style="text-align: center;">〈構造材温度〉</p> どれをグラフに書くかを1～24の構造材番号で指定する。 (1枚に4つまでの構造材が書け、3枚までのグラフが書ける。)
24	IPSTR1(4)	
25 }	IPSTR2(1)	
28	IPSTR2(4)	
29 }	IPSTR3(1)	
32	IPSTR3(4)	
33	IPAGEC	ガス質量比を何枚のグラフに書くか。(0～2)
34	IPAGES	構造材温度を何枚のグラフに書くか。(0～3)

2-3 実数入力値-RDATA(I)の内容

I	変数	意味・用法	単位
1	TEMMAX	セル最高温度	[°C]
2	TEMMIN	最低温度	
3	TEMDEL	増分(1mmあたり)	
4	PREMAX	セル最高圧力	[kg/cm <sup>2</sup> ]
5	PREMIN	最低圧力	
6	PREDEL	増分(1mmあたり)	
7	CONMAX	最高ガス質量比	[%]
8	CONMIN	最低ガス質量比	
9	CONDEL	増分(1mmあたり)	
10	POLMAX	最高プール質量	[kg]
11	POLMIN	最低プール質量	
12	POLDEL	増分(1mmあたり)	
13	TSTMAX	構造材最高温度	[°C]
14	TSTMIN	最低温度	
15	TSTDEL	増分(1mmあたり)	
16	DTIME	時間刻み Δt (1mmあたり)	[min]
17	XTL	X軸方向タイトル書き出し座標	[mm]
18	YTL	Y	
19	CTL	タイトル文字の大きさ	

3. 例題計算とグラフ

3-1 プロットテープ作成までの手順



A

\*\*\*グラフの作成用

- 軸の長さ
  - 上限, 下限
  - 時間刻み
- 等指定

サマリー-OUTPUT  
より, 各グラフの  
1. 最大値  
2. 最小値  
3. 1mm 当り増量  
を求める。

タイトル書出し座標,  
文字の大きさ等を指定

— データ作成完了 —

\*\*\*プロット・テープ作成

CEDAN.PLOT  
実行

END

APPENDIX B

〔 第3章の長時間ランの  
インプットデータ 〕







DATA LIST

	1	2	3	4	5	6	7	8
131								
132								
133								
134								
135								
136								
137	869.	869.	869.	869.	869.	869.	865.	
138	869.	869.	869.	869.	869.	869.	865.	
139	0.05	0.01	0.02	0.04	0.08	0.15	0.16	
140	0.32	0.94	0.32	C.16	C.15	C.15	0.008	
141								
142								
143	1	2	2	2	2	2	2	2
144	2	1	1	3	4	2	1	
145	9	1	1	3	4	2	1	
146								
147	108.	108.	108.	108.	108.	108.	108.	
148	108.	108.	108.	108.	108.	108.	108.	
149	0.05	0.01	0.02	C.04	C.08	C.08	C.16	
150	0.32	C.64	1.83					
151								
152								
153	1	2	2	2	2	2	2	2
154	4	1	4	2	2	2	2	2
155								
156	911.	511.	911.	511.	511.	511.		
157	0.01	0.05	0.24	C.02	C.02	C.02		
158								
159	4	4	5					
160	7	1	1	3		2		
161								
162	180.	180.	180.	180.	180.	180.	180.	
163	180.	180.	180.	180.	180.	180.	180.	
164	0.008	C.02	0.05	C.08	C.08	0.2	0.5	
165	0.8							
166								
167	1	4	4	2	2	2	1	
168	9	1	1	3	4	2	1	
169								
170	160.	160.	160.	160.	160.	160.	160.	
171	160.	160.	160.	160.	160.	160.	160.	
172	0.008	0.01	0.02	C.04	C.08	C.08	C.16	
173	0.3	0.6	0.31					
174								
175								
176								
177	1	2	2	2	2	2	2	2
178	8	1	4	1	3	2	2	2
179								
180	351.	351.	351.	351.	351.	351.	351.	

Fig. B.1  
Continued



DATA LIST

	1	2	3	4	5	6	7	8
201		2	2	2	2	2		
202	18.0 -03	23.0 -03	22.0 -03	44.0 -03	2.0 -03	28.0 -02		
203	62.0 -03	78.0 -02	24.0 -03	12.0 -03				
204	534.0	880.0	127.0	253.0	82.8	104.0		
205	5.2572 -03	5.2572 -03	1.1867 -03	5.2572 -03	5.2572 -03	5.2572 -03		
206	6.8949 -05	6.8949 -05	7.8851 -05	6.8949 -05	6.8949 -05	6.8949 -05		
207	5.5013 -06	5.5013 -06	6.0348 -06	5.5013 -06	5.5013 -06	5.5013 -06		
208	4.1049 -08	4.1049 -08	4.7961 -08	4.1049 -08	4.1049 -08	4.1049 -08		
209		963.91	816.28	611.32	1.407E+04	563.91		
210		841.51	398.26	21.058				
211		0.22447	0.37253	0.91341	0.76062	0.22447		
212		1.0295	2.2421	4.4858	2.6937			
213		-2.6028 -05	-2.6028 -05	-1.0195 -04	-2.8557 -04	6.0730 -04		
214		-3.2837 -04	-1.4835 -02	-2.6768 -03	-9.1020 -04			
215		667.19	667.19	559.08	468.41	5552.9		
216		0.22415	0.22415	0.26615	0.82500	0.22415		
217		-2.5805 -05	-2.5805 -05	-9.5244 -05	-2.4772 -04	6.2041 -04		
218		1.0E+03	1.0E+03	1.0E+03	1.0E+03	1.0E+03		
219								
220								
221								
222								
223		6	6	6	6	6		
224		0.1	0.15	0.15	0.15	0.15		0.2
225	4187.0							
226	4187.							
227	983.2							
228	0.654							
229	1306.3							
230	1306.3							
231	832.0							
232	67.34							
233	1500.							
234	0.01	0.001	500.	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1
235	0.001	2.0	1.0 -10	0.05	0.01	0.01	0.01	C.C1
236	0.05	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	C.C1
237	500.	0.05	0.1	1.2	0.7	1.0E-C4		
238	8.3434	5.676 -08	9.8	1.0				
239	1.179E-04	-0.243	480.					
240		1.0E+10	1.0E+10	1.0E+10				
241								
242								
243								
244								
245	1.22 +06	3.638 +05	8.133 +05	9.462E +06				
246				4.4E+09				
247		1.0 +02						
248								
249								
250	1.0 +03	1.0 +03	1.0 +03	1.0 +02				

Fig. B.1

Continued

DATA LIST

	1	2	3	4	5	6	7	8
251	1.0 +03	1.0 +02	1.0 +03	1.0 +02				
252								
253								
254								
255								
256	0.1							
257	3.6 +05							
258	6	0.054	0.018					
259	7	0.009	0.003					
260	8	0.027	0.009					
261								
262	0.01	0.01	0.1	1.0				
263								
264								
265								
266								
267								
268								
269								
270								
271								
272	328.15	328.15	313.15	312.15	312.15	312.15		
273	2							
274								
275	1	900.	0.01					
276								
277	343.15	343.15	343.15	328.15	328.15	328.15		
278								
279								
280								
281	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15		
282								
283								
284	313.15	213.15						
285								
286								
287								
288								
289	7.0E+05							
290	9.67	24.78	22.12	0.0	0.0	0.0	882.7	
291	77.3	0.0	257.	0.0	0.0	0.0	7150.	
292	149.6	0.0	1485.	0.0	0.0	0.0	4856.	
293	1798.	0.0	1.785E+04	0.0	0.0	0.0	5.555E+04	
294	873.15	873.15	873.15	873.15	873.15	873.15	873.15	
295								
296	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	
297								
298	318.15	318.15	318.15	318.15	318.15	318.15	318.15	
299								
300								

Fig. B.1

Continued

DATA LIST

	1	2	3	4	5	6	7	8
301	318.15	318.15	318.15	318.15	318.15	318.15	318.15	318.15
302	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15
303	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15
304	343.15	342.75	342.65	342.4	341.97	341.15	341.15	341.15
305	319.75	325.65	331.35	329.7	328.65	328.15	328.15	328.15
306	343.15	342.78	342.70	342.55	342.25	341.65	341.65	341.65
307	340.45	336.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15
308	343.15	389.15	563.15	782.15	782.15	782.15	782.15	782.15
309	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15
310	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15
311	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15
312	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15
313	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15
314	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15	328.15
315	328.15	455.15	613.15	782.15	782.15	782.15	782.15	782.15
316	313.15	312.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15
317	313.15	312.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15
318	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15
319	313.15	312.15	312.15	312.15	312.15	312.15	312.15	312.15
320	313.15	312.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15
321	313.15	312.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15
322	313.15	312.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15
323	313.15	312.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15
324	313.15	312.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15	313.15
325	1.015	1.012E+05	C.23	C.23	C.23	C.23	C.23	C.23

EVJ ..... 1 ..... 2 ..... 3 ..... 4 ..... 5 ..... 6 ..... 7 ..... 8

Fig. B.1  
Continued

Code Abstract of CEDAN

## CEDAN

(ACRONYM : Containment Evaluation and Dynamics Analysis Code)

Reporting Date 1981.2

### 1. Purpose

Analysis of pressure-temperature histories in the primary and secondary containment building for a variety of accidents in an LMFBR facility.

### 2. Status

- (1) Development : Developed by Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc. (MAPI) under Contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC).
- (2) Availability : Operational on IBM 370/168 ; documentation and user's manual in Japanese are prepared.
- (3) Utilization : Test runs have been made.

### 3. Physical Problems Solved

- (1) Calculates the pressure and temperature responses as a function of time for 1 to 4 interconnected containment spaces (cells).
- (2) Calculates cell responses from mass and energy balances.

#### 4. Physical Models and Assumptions

##### (1) Geometry

An arbitrary space in the primary and secondary facilities is defined as the cell. The cell represents such as the reactor cavity and the primary heat transport system room.

The code user defines one or more heat structures that represent connecting walls or a connecting floor-roof combination.

##### (2) Cell Analysis

Each cell has an atmosphere and may have a sodium pool or a water pool. The roof, walls, floor, and equipment are represented by heat structures.

The atmosphere is assumed to be well-mixed and characterized by a uniform composition, temperature, and pressure. The atmosphere can have up to 10 species such as sodium vapor, water vapor, oxygen, and nitrogen. In an equilibrium state, the pool is well-mixed and characterized by a uniform temperature which is equal to the atmosphere temperature.

Otherwise, the pool is regarded as the heat structure, and the vaporized mass from the pool is calculated by the empirical equation of the natural convection.

The atmosphere pressure is the sum of the partial pressures of the component gases.



### (3) Heat Structures

Each heat structure is described by the one-dimensional transient heat conduction equation in planar geometry. The code user can use up to 25 heat structures. Each heat structure can have up to 25 temperature nodes. The materials have temperature-dependent thermal conductivity and volumetric heat capacity.

The boundary condition of both surfaces as follows:

- i) Heat is transferred by radiation from other heat structure.
- ii) Adiabatic condition
- iii) Contacts with the air. The coefficients for heat transfer are input data.
- iv) Heat is transferred by natural convection from the cell atmosphere.

### (4) Leakage and Vent Flows

Vent flow rate is based upon both pressure and temperature difference. The former is modeled by the nozzle flow of the compressible gas flow, and the latter is calculated by an empirical equation of natural convection flow.

Leak rate is proportional to the square root of the pressure difference.

(5) Sodium Pool Fire

Sodium pool fire is modeled to describe the temperature of the burning zone, neglecting its thickness and the accumulation of energy and mass. The unknowns (the mole fluxes into and/or out of the burning zone, hydrogen mole fraction at the burning zone, the distance from the pool surface to the burning zone and the temperature of the burning zone) are represented by the algebraic equations.

(6) Condensation on the Wall Surface

Condensation of vapor on the wall surface is modeled according to Nusselt's film condensation theory. The effect by the non condensable gases on the condensation rate is able to estimated mechanistically.

5. Physical Limitations

- (1) One to 4 interconnected cells. Atmosphere of each cell is characterized by a single temperature.
- (2) The number of the structures is up to 25, having up 25 temperature nodes. The geometry of each structure is only a plane.

6. Special Numerical Techniques Used

The differential equations are solved by the Crank-Nicholson scheme. The algebraic equations in sodium fire calculation are solved by the Newton-Repahson Scheme.

7. Programming Language

IBM FORTRAN IV

8. Machine and Peripheral Requirement

IBM 370/168

9. Program Size

source program : 9700 cards

load module : 600 K-Bytes

10. Restart and Debugging Capability

Debugging capability      restart capability

11. Overlay Structure

Not used

13. Special Library Subprograms Used

Not used

14. Auxiliary Programs

Plotter Program CEDAN-PLOT

15. Execution Time

In case of sample case (4 cells and 14 heat structures)  
about 200 sec cpu time / 1 hour simulation

16. Availabe Materials

User's manual (in Japanese), source program, sample input and corresponding output.

17. Conversion to Other Machine

Easy

18. Interface/Overlap

CEDAN is used independently . . . :

19. Reference

- (1) SJ206 80-08, "Development of a Computer Code for Analyzing Sodium-Concrete Chemical Reaction (III)," T. Morii, et al., March, 1980 (in Japanese)

20. Authors and Affiliation :

Tadashi Morii, Yasuo Hasegawa, Nobuo Imashiro, Takashi Sawada, Tatsujiro Naganuma, Advanced Reactors Engineering Department, Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc., 297, 1-chome, Kitabukuro-machi, Ohmiya City, Saitama Prefecture, 330 Japan.

21. Dissemination

Restricted distribution

22. Project Control

K. Kawashima, PNC, Tokyo, Japan