

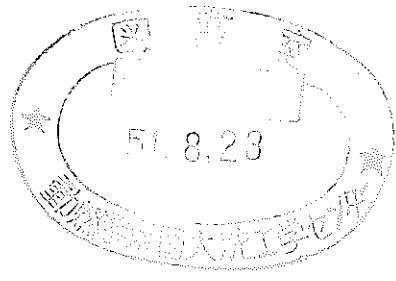
T N241 71-27

開示制限

区分変更	
変更理由	＝
作成年月日	平成13年11月30日

# 高速炉炉心溶融事故後の 圧力挙動解析法に関する研究

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
S	N241 71-27
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	



1971年7月

動力炉・核燃料開発事業団

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、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)

高速炉炉心溶融事故後の圧力挙動解析法に関する研究

東京大学工学部原子力工学研究施設

安 成 弘

東京大学工学部原子力工学科

近 藤 駿 介

今 井 哲

向 井 卓

\* 現在 日本原動発電 K.K.

\*\* 当時卒業研究として従事、現在三菱重工

正誤表

P.1. 7行目 系 → 系      8行目 系 → 系  
 10行目 系 → 系      14行目 系 → 系

P.2. 24行目 系 → 系      26行目  $C_1 \rightarrow C_e$   
 28行目  $X_0 \rightarrow \alpha_0$       29行目  $C_e \rightarrow C_e$

P.3. 図 横軸 右側  $e(T_{fm}) \rightarrow e(T_{fm})$   
 9行目  $U_{O_2} \rightarrow U_{O_2}$       12行目  $e(T_{fm}) \rightarrow e(T_{fm})$

P.4. 11行目  $C_e \rightarrow C_e$       13行目 系 → 系  
 14行目 系 → 系      17行目  $\begin{cases} K \rightarrow \circ K \\ S_c \rightarrow S_c \end{cases}$

P.5. 1行目  $X_f$  修正      6行目  $P_{ev2} \rightarrow P_{ee2}$   
 21行目 系 → 系

P.6. 1行目  $R(T) \rightarrow R(t)$       3行目  $\frac{2}{3} \rightarrow \frac{3}{2}$   
 19行目  $X_2 \rightarrow \sqrt{X_2}$       24行目  $sus \rightarrow ouo$

P.7. 8行目  $i_{ent} \rightarrow i_{ent}$       12行目 時 → 則  
 14行目 系 → 系      15行目 系 → 系  
 17行目 系 → 系      28行目  $(\frac{dR}{dt})_A \rightarrow (\frac{dR}{dt})_A$   
 28行目  $( )_{0.8} \rightarrow ( )_{0.8}$

P.8. 1行目  $T_{ov} \rightarrow T_{av}$       7行目  $\Delta X \rightarrow \Delta \alpha$   
 26行目  $\Delta X \rightarrow \Delta \alpha$

P.9. 1行目  $X, \Delta X \rightarrow \alpha, \Delta \alpha$       2行目  $/ \rightarrow \alpha$   
 7行目  $v_{ep} \rightarrow v_{ap}$       26行目  $X, \Delta X \rightarrow \alpha, \Delta \alpha$

P.10. 3行目 右側の所は「内磨」という文字をいす。

6行目 IMT → IMJ 20行目 deta → data

p.12 14行目 -leak rates → -leak ratio  
25行目 IM → RM

p.14 21行目 溶 → 温

p.15 19行目  $\sqrt[3]{100} \rightarrow \sqrt[3]{100}$

p.17 SH → SM

p.29 12行目 成長に 移は → 成長に 遷移は

猶 3-1リストで — 変更したのは — 上  
の0がゼロである事を意味する。いには、行名は才—  
である。

## 要

## 約

高速炉炉心溶融事故後の圧力挙動を、燃料圧力のみならず周囲冷却材ナトリウムの気化に伴う蒸気爆発の効果も取入れて解析することを試み、ARIAKEコードを開発した。

このコードをもとに主要パラメータの結果に与える影響を求め燃料の粒径、燃料-ナトリウム間の熱伝達率が挙動変化の速さに、容器内自由空間の大きさが圧力ピーク値にそれぞれ大きな影響を与えることを見い出した。

A new meltalown accident analysis code ARIAKE has been developed .  
This code calculates the pressure history in the reactor vessel after reactor core meltdown knowing the released energy, Several parameter survey calculations show that such parameters as fuel particle radius, heat transfer coefficient between fuel and sodiun, and free space volume in the vessel are very effctive to the results,

# 目 次

A .	ARIAKE コード概要	1
B .	計 算 式	2
C .	INPUT DATA リスト	11
D .	ARIAKE コードフローチャート	13
E .	計 算 結 果	14
F .	検 討	27
附 録	コードソースリスト	30

## [A] ARIAKE コード概要

ARIAKEコードは、熔融燃料とNaの反応による圧力およびエネルギー放出過程、特に、炉心から周囲Naへの熱伝達を主眼においたかたちで評価すべく提案された。主なパラメータとしては、熔融炉心の分散状況、mixingによるNaの取入れ割合、初期に炉心に残存していたNaの混合比、軸空間体積があり、それぞれについて興味ある結果が得られた。使われた計算モデルは、最初、逸走事故後に炉心内に残存していたNaと高温の $UO_2$ が、温度、圧力共に一定の均質な混合系を形成していて、その後、その混合系の内圧をdriving forceとしてNa中に膨張してゆき、伝熱されるエネルギーは一部Naの蒸気化に費され、その蒸気化したNaをとりこんで新たに温度、圧力、一定の混合系を形成してゆくという仮定を置いた。膨張過程は、Rayleighの運動方程式を採用し、混合系の温度は、系からの熱損失と膨張による仕事Naのとりこみによる熱量増加等のエネルギーバランスから評価された。 $UO_2$ とNaの圧力に関しては、各々の状態方程式から導かれ、混合系内の圧力評価に関しては、 $UO_2$ の蒸気圧とNaの蒸気圧のどちらが支配的かによって決定された。熱伝達は、混合系と周囲Naの境界層から、Na中への強制対流熱伝達モデルが採用されている。



## [ B ] 計 算 式

### ( B - 1 ) 初期状態の設定

#### ( a ) 混合系の初期温度 $T_m$ および燃料の凝固率 $X_f$

燃料、冷却材の温度が与えられている場合は、各々の初期の内部エネルギーの和から、混合系の温度、混合系内部の燃料の凝固割合を評価する。

時刻  $t$  における混合系の内部エネルギーを  $E_{in}(t)$  とすると、初期の混合系の内部エネルギー  $E_{in}(0)$  は、次のように求められる。燃料の初期温度を  $T_f$ 、燃料の融点を  $T_{fm}$  とすると、 $E_{in}(0)$  は、 $T_f \geq T_{fm}$  の場合と、 $T_f < T_{fm}$  の2つのケースについて表現される。但し、 $T_f = T_{fm}$  の場合は、燃料は完全に溶融しているとする。(即ち、 $X_f = 0, 0$ )

$T_f \geq T_{fm}$  のとき

$$\begin{aligned} E_{in}(0) &= m_0 \cdot C_L \cdot T_c + m_f \cdot C_f \cdot T_f + m_f \cdot h_f \\ &= m_f (\alpha_0 \cdot C_L \cdot T_c + C_f \cdot T_f + h_f) \end{aligned}$$

$T_f < T_{fm}$  のとき

$$E_{in}(0) = m_f (\alpha_0 C_L T_c + C_f T_f)$$

ここで  $m_0$  は初期 Na 量で、これは燃料の mass  $m_f$  と  $N_a$  の初期混合比  $\alpha_0$  から  $m_0 = \alpha_0 m_f$  とあらわせる。 $C_L, C_f$  は、 $N_a, UO_2$  の比熱であり、 $h_f$  は  $UO_2$  の溶融潜熱である。 $N_a$  の初期温度は  $T_c$  としている。

$UO_2$  が  $m_f$ ,  $N_a$  が  $m_0$  含まれる混合系の内部エネルギーと、混合系の温度あるいは状態との対応は次のようになる。混合系の内部では、温度、圧力共に一定の均質の状態を仮定すると、混合系の温度  $T_{mix}$  を与えることによって内部エネルギー  $e(T_{mix})$  は、決定される。但し  $T_{mix} = T_{fm}$  の場合には、燃料の凝固率  $X_f$  が factor として加えられなければならない。しかし、内部エネルギーを与えれば、系の温度  $T_{mix}$  は一義的に決定される。

$N_a$  の沸点を  $T_{cv}$  とすると、 $T_{mix} = T_{cv}$  のとき、内部エネルギーは

$$e(T_{cv}) = m_f (\alpha_0 \cdot C_l + C_f) T_{cv}$$

$N_a$  の臨界温度を  $T_{cc}$ ,  $T_{cc}$  以上での比熱を  $C_g$  とすると

$$\begin{aligned} e(T_{cc}) &= e(T_{cv}) + m_f (X_0 C_g + C_f) \cdot (T_{cc} - T_{cv}) \\ &\quad + m_f \alpha_0 (C_e - C_g) \cdot T_{cc} \cdot (2 - T_{cc}) / 2 (T_{cc} - T_{cv}) \end{aligned}$$

$T_{mix} = T_{fm}$  のときは

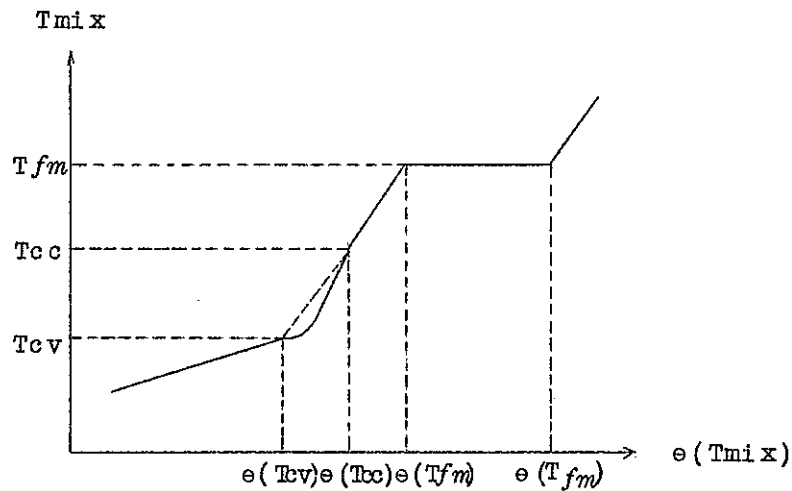
$$e(T_{fm}) = e(T_{cc}) + m_f (\alpha_0 C_g + C_f) \cdot (T_{fm} - T_{cc})$$

この場合、燃料の溶融割合は 0 である。

$T_{mix} = T_{f'm}$  (この場合、燃料はすべて溶融しているとする。)

$$e(T_{f'm}) = e(T_{fm}) + m_f \cdot h_f$$

以上の関係を、 $T_{mix}$  と  $e(T_{mix})$  の関係として定性的に表現すると次のようになる。



このことから、初期内部エネルギー  $E_{in}(0)$  から、混合系の温度  $T_m$ 、 $U_{O_2}$  の凝固率  $X_f$  が同時に求まる。

☆  $E_{in}(0) \geq e(T_{f'm})$  のときは、燃料は完全に溶融しており、温度は  $T_{fm}$  以上である。従って、

$$T_m = \frac{E_{in}(0) - e(T_{fm})}{m_f (\alpha_0 C_g + C_f)} + T_{fm}$$

$$X_f = 0, 0$$

☆  $e(T_{fm}) \leq E_{in}(0) < e(T_{f'm})$  のときは、温度は  $T_{fm}$  であるが  $U_{O_2}$  は一部あるいは全部が凝固している。

$$T_m = T_{fm}$$

$$X_f = \frac{e(T_{f'm}) - E_{in}(0)}{m_f \cdot h_f}$$

☆  $e(T_{cc}) \leq E_{in}(0) < e(T_{fm})$  のときは、 $T_m$  は  $T_{cc}$  以上であり、 $U_{O_2}$  は完全に凝固している。

$$T_m = \frac{E_{in}(0) - e(T_{cc})}{m_f (\alpha_0 C_g + C_f)} + T_{cc}$$

$$X_f = 1.0$$

☆  $e(T_{cv}) \leq E_{in}(0) < e(T_{cc})$  のときは、 $T_{cv} < T_{mix} < T_{cc}$  では  
 $T_{mix}$  と  $e(T_{mix})$  の関係が linear ではなく、

$$A = \frac{1}{2} \alpha_0 (C_L - C_G) / (T_{cc} - T_{cv})$$

$$B = \alpha_0 C_G + C_f + \alpha_0 (C_L - C_G) \cdot T_{cc} / (T_{cc} - T_{cv})$$

$$C = E_{in}(0) / m_f - e(T_{cv}) / m_f + (\alpha_0 C_G + C_f) T_{cv}$$

とおくと

$$T_m = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$X_f = 1.0$$

☆  $E_{in}(0) < e(T_{cv})$  のときは

$$T_m = \frac{E_{in}(0)}{m_f (\alpha_0 C_G + C_f)}$$

$$X_f = 1.0$$

(b) 混合系の圧力  $P_m$  の評価

(i) 混合系内の Na の圧力  $P_c$

Na の蒸気圧として、次のような  $P_{Na}(T)$  を用いると、

$$\log P_{Na}(T) = 4.521 - 5220.0/T$$

Na の温度  $T$  (K) での密度  $\rho_c$  は

$T < T_{cc}$  のときは

$$\rho_{cL1}(T) = 1.018 - 2.34 \times 10^{-4} T$$

$$\text{あるいは } \rho_{cL2}(T) = -1.1 \times 10^{-7} T^2 + 9.3 \times 10^{-5} T + 0.8$$

$T \geq T_{cc}$  では

$$\rho_{cv}(T) = 20 \times \left( \frac{P_{Na}(T)}{T} \right)^3 + 2 \times \left( \frac{P_{Na}(T)}{T} \right)^2 + 0.25 \times \left( \frac{P_{Na}(T)}{T} \right)$$

となる。

混合系内部の Na の圧力は、混合系の全容積  $V_m$  と、凝固している  $UO_2$  の容積によって規定されるだろうから、 $V_m$  と存在する Na 量から決まる密度  $D$  と、混合系の温度  $T_m$  から決まる密度  $D_L$  又は  $D_V$  から、Na の蒸気圧式  $P_{Na}(T_m)$  に補正を施すことによって、Na の  $P_c$  を決定する。

$$D = \frac{\alpha_o m_f}{V_m - X_f \cdot m_f / \rho_f}$$

但し、 $\rho_f$ は $UO_2$ の密度で、 $m_o = \alpha_o m_f$

$T_m \geq T_{cc}$ のときは

$$DV = DL = \rho_{cv} (T_m)$$

$T_m < T_{cc}$ のときは

$$DL = \rho_{cv2} (T_m) \quad \text{とすると、}$$

$D \leq DV$ のときは

$$P_c = P_{Na} (T_m) \times D / DV$$

$D \geq DL$ のときは

$$P_c = P_{Na} (T_m) \times D / DL$$

$DV \leq D \leq DL$ のときは

$$P_c = P_{Na} (T_m) \quad \text{となる。}$$

この蒸気圧の決定では、混合系が必ずしも飽和状態にあるとは限らないという仮定をおいている。即ち、混合系の短時間中でのより正確な描写に近づくことを目的としている。

(ii) 燃料の圧力  $P_f$

燃料の圧力としては、 $UO_2$ の蒸気圧式を用いる。

$$\log P_f = 8.00 - 24000.0 / T_m$$

(iii) 混合系の圧力  $P_m$  の評価

混合系の圧力は、 $Na$ の圧力  $P_c$  が支配的か、燃料の蒸気圧  $P_f$  が支配的かによって決まるとした。例えば、混合系の温度が  $3000^\circ K$  の場合は、 $P_f$  は  $1 \text{ atm}$  であり、 $P_c$  は数百  $\text{atm}$  であるため、混合系の圧力としては  $P_c$  が採用される。即ち

$$P_c \geq P_f \text{ ならば} \quad P_m = P_c$$

$$P_c < P_f \text{ ならば} \quad P_m = P_f \text{ となる。}$$

(B-2) 運動方程式の積分

気泡の成長は、バブルの内圧と、周囲圧力との差を駆動力としておこなわれ、その間、伝熱によって周囲  $Na$  を蒸気化して混合系内にとりこんでいくと考え

る。これはバブルの半径  $R(t)$ 、内圧を  $P_m(t)$ 、周囲圧力を  $P_o$ 、周囲  $Na$  の密度を  $\rho_{Cl_1}(T_c)$  とすると、

$$R(t) \cdot \ddot{R}(t) + \frac{1}{2} \dot{R}(t)^2 = \frac{P_m(t) - P_o}{\rho_{Cl_1}(T_c)} \quad \text{①}$$

$$\text{で表わされる。但し } \dot{R}(t) = \frac{d}{dt} R(t), \quad R(t) = \frac{d^2}{dt^2} R(t)$$

この運動方程式から、バブル半径  $R$  の増分  $\Delta R$  を与えることによって  $\dot{R}$  を求め、この  $\dot{R}$  (バブルの成長速度) から、時間巾  $\Delta t$  を求めることができる。以下にその差分解の導き方を示す。

$$\ddot{R} = \frac{d\dot{R}}{dR} \frac{dR}{dt} = \dot{R} \frac{d\dot{R}}{dR} = \frac{1}{2} \frac{d\dot{R}^2}{dR} \quad \text{②}$$

$$\dot{R}(t)^2 = X_0, \quad \dot{R}(t+\Delta t)^2 = X_1 \text{ とすると、}$$

②から

$$\ddot{R} = \frac{X_1 - X_0}{2\Delta R} \quad \text{③}$$

$$\text{又 } \dot{R}^2 = \frac{X_1 + X_0}{2} \quad \text{④}$$

③, ④を①に代入すると

$$\frac{R}{2\Delta R} (X_1 - X_0) + \frac{3}{4} (X_1 + X_0) = \frac{P_m - P_o}{\rho_{Cl_1}(T_c)}$$

これを解いて、

$$X_1 = \frac{(1/\Delta R - 3/2R) X_0 \rho_{Cl_1}(T_c) R + 2(P_m - P_o)}{(1/\Delta R + 3/2R) \rho_{Cl_1}(T_c) \cdot R} \quad \text{⑤}$$

$\Delta R$  を与えることによって、時間巾  $\Delta t$  は  $X_1$  からつぎのようになる。

$$\dot{R}(t+\Delta t) = \frac{\Delta R}{\Delta t} = \sqrt{X_1} \text{ より}$$

$$\Delta t = \Delta R / X_1$$

尚、ARIAKEコードにおいては、気泡の成長を、複数小バブルの成長として考えており、各々の小バブルの内部では  $Na$  と  $UO_2$  の均質な混合系が成立していて、これらの小バブルと、ある量の  $Na(CX)$  がheteroなバブルを形成し成しているモデルを採用している。この場合、運動方程式は大きなheteroのバブルがその中心圧力を個々のhomogeneousな小バブルの内圧として、成長していくことになる。大バブルの半径  $RL$  とその増分  $\Delta RL$  でRayleighの運動方程式を解き、 $\Delta t$  を得る。heteroなバブルの半径増加による体積変化は個々の小バブルの体積変化として均等に分配されるものとする。このモデルは分散した  $UO_2$  と  $Na$  の小バブルからの熱伝達によって、周囲の  $Na(CX)$  で

表現されるある限定されたNa)の温度が上昇し、結局、大バブル内の加熱されたNaが圧力を有することによって、バブルの運動が規定されるのではないかという事で導入されたのであるが、大バブル内のNaの温度上昇を認めないかたちで計算を行なったため、(Naの温度上昇を認めることで計算をした場合にはNaの温度上昇率が激しく、NaとUO<sub>2</sub>の均質な小バブルを包むかたちでheteroな大バブルが成立しているというモデルの意味がなくなってしまった。)heteroな大バブルを考えた意味がなくなってしまった。従ってheteroなモデルを採用する場合には、multi bubble から、unit bubble に遷移するtransientな過程を用意しなければならない。今回の計算ではこの検討は行えなかった。

### (B-3) エネルギーバランス

次に混合系の内部エネルギーのバランスを考える。混合系の内部エネルギーの変化は、エネルギー保存時から次のように表わされる。

$$dE_{in}(t) = dE_{add}(t) - dW(t) - dE_{loss}(t)$$

ここで、 $dE_{in}$ は内部エネルギー変化、 $dE_{add}$ は糸に加えられるエネルギーの増加、 $dW$ は仕事によって失われるエネルギー、 $dE_{loss}$ は混合糸の表面から失われるエネルギーをあらわしている。これらのエネルギーの変化を計算することによって混合糸の内部エネルギーが決定される。次にそれぞれのエネルギーの評価の仕方を示す。

#### (a) $dE_{loss}$

$dE_{loss}$ は詳しくは、混合系表面からの放射損失と、対流損失が考えられるが、周囲Naの温度が600°K前後であれば、放射損失は、ほとんど無視できるだろう。したがって損失エネルギーは、熱伝達による対流損失を主として考えればよい。 $hc$ を対流熱伝達率とすれば、 $dE_{loss}$ は次のように書ける。

$$dE_{loss} = hc(T_m - T_c) \cdot A_m(t) \cdot \Delta t$$

ここで、 $A_m(t)$ は、バブルの表面積

$\Delta t$ は時間変化巾

$hc$ は炉心物質の膨張形態により異なるが、移動球を想定すると次のように表現される。

$$hc = \frac{K_{Na}}{R} \left\{ 2 + 0.5 \left( \frac{R \left( \frac{dR}{dt} \right)_t \rho_c(T_{av}) \cdot C(T_{av})}{K_{Na}} \right) 0.8 \right\}$$

$K_{Na}$ は、Naの熱伝導度、 $\rho_c(T_{av})$ 、 $C(T_{ov})$ は、バルブ表面温度 $T_{av}$ に対応するNaの密度、比熱を表わしている。バブルの表面温度 $T_{av}$ は混合系の温度 $T_m$ と周囲Na温度 $T_c$ の平均とした。Rはバブルの半径である。

(b) dEadd

dEaddは、周囲Naの蒸気化による混合系への取込みによるエネルギー増加を示している。まず混合系からNaへの伝熱によるNaのとりこみ量 $\Delta m_c$  ( $= \Delta X \cdot m_f$ )を考えよう。この場合、系から伝熱されるエネルギーのうち何割がNaの蒸気化に使われるかという割合を $\beta$ で表現して、 $\beta$ を変化させて、議論を行うことにする。(原研の解析では、5%がNaの蒸気化に使われるとしている。)  $\beta$ を用いると、

$$\Delta m_c = \frac{\beta \cdot dE_{loss}}{C(T_{av}) \cdot (T_m - T_c) + X_c \cdot h_{Na}} \quad \text{となる。}$$

ここで $h_{Na}$ は、Naの気化潜熱であり、混合系の温度 $T_m$ とNaの臨界温度 $T_{cc}$ の関係から次のようになる。

$$T_m \geq T_{cc} \text{ のとき} \quad h_{Na} = 0$$

$$T_m < T_{cc} \text{ のとき} \quad h_{Na} = 940 \left(1 - T_m / T_{cc}\right)^{1.23}$$

又、 $X_c$ は混合系内部のNaの気化割合を、従って、 $1 - X_c$ は、系内のNaの凝縮割合を示している。 $C(T_{av})$ は、混合系表面でのNaの状態に対応する比熱であるが、Naの沸点 $T_{cv}$ と $T_{cc}$ から次のような関係がある。

$$T_{av} \leq T_{cv} \text{ なら} \quad C(T_{av}) = C_l$$

$$T_{cv} < T_{av} \leq T_{cc} \text{ なら} \quad C(T_{av}) = C_g + (C_l - C_g) \frac{T_{cc} - T_{av}}{T_{cc} - T_{cv}}$$

$$T_{av} > T_{cc} \text{ なら} \quad C(T_{av}) = C_g$$

Naの系内にとりこみに消費されるエネルギーは結局、周囲のNa温度 $T_c$ から系内の温度 $T_m$ まで昇げるエネルギーと、そのとりこみNaの一部( $X_c$ )を蒸気化するエネルギーを合わせたものである。Naのとりこみ量 $\Delta m_c$ は、Naの混合比増分としては、又、次のようにも書ける。

$$\Delta X = \frac{\beta \cdot dE_{loss}}{m_f \{ C(T_{av}) \cdot (T_m - T_c) + X_c \cdot h_{Na} \}}$$

dEaddを評価する場合に、更に加える事項は、混合系が膨張する際に、内部のNa蒸気が一部に凝縮するという条件で、これをdEvapとすると、

$$dE_{vap} = m_f(X + \Delta X) \cdot h_{Na}(T_m(t + \Delta t)) \cdot X_c(t + \Delta t) \\ - m_f \times h_{Na}(T_m(t)) \cdot X_c(t) \quad \text{となる。}$$

これは伝熱により混合系のエネルギーが消費されていくのとは別に評価されなくてはならず、結局内部エネルギーの減少として効いて来る。

この  $dE_{vap}$  を  $dE_{add}$  に含めた形で表現するとすれば、 $dE_{add}$  は次のようになる。

$$dE_{add} = \Delta m_c \cdot C_l \cdot T_c - dE_{vap}$$

(c)  $dW$

混合系の膨張によりなされる仕事量  $dW$  は、 $W = \int p dv$  から

$$dW = P m(t) \left\{ \frac{4}{3} \pi (R + \Delta R)^3 - \frac{4}{3} \pi R^3 \right\} \quad \text{となる。}$$

(B-4) 混合系の新しい温度の評価

バブルの時間  $\Delta t$  経過後の温度は、先に求めた内部エネルギーの変化から求めることができる。温度変化  $\Delta T$  は、内部エネルギー減少分  $dE_{in}$  から次のようになる。

$$\Delta T = \frac{dE_{in}}{m_f C_f + (\alpha + \Delta \alpha) m_f \cdot (1 - X_c) \cdot C(T_m) + (\alpha + \Delta \alpha) m_f X_c \cdot C_g}$$

$$T_m(t + \Delta t) = T_m(t) - \Delta T \quad \text{となる。}$$

$\Delta T$  の式で分母は、混合系の全熱容量を表わしている。

この新しい混合系の温度  $T_m(t + \Delta t)$  は、 $T_m(t + \Delta t) \leq T_{fm}$  ならば、 $UO_2$  の凝固率  $X_f$  の変化によって再評価されなければならない。

$\Delta t$  経過後の  $X_f$  は

$$X_f(t + \Delta t) = X_f(t) + \Delta X_f \text{ であり、}$$

ここで  $\Delta X_f$  は

$$\Delta X_f = \frac{(T_{fm} - T_m(t + \Delta t)) \{ m_f C_f + (\alpha + \Delta \alpha) m_f (1 - X_c) \cdot C(T_m) + (\alpha + \Delta \alpha) m_f X_c \cdot C_g \}}{m_f h_f}$$

と書ける。従って再評価された温度  $T'_m(t + \Delta t)$  は

$X_f(t + \Delta t) \geq 1.0$  のときは

$$T'_m(t + \Delta t) = T_{fm} - \frac{\{ X_f(t + \Delta t) - 1 \} \cdot m_f \cdot h_f}{m_f C_f + (X + \Delta X) m_f (1 - X_c) C(T_m) + (\alpha + \Delta \alpha) m_f \cdot X_c \cdot C_g}$$

で  $X_f(t + \Delta t) = 1$  とする。



$\alpha f(t+\Delta t) < 1.0$ のときは、 $T'_m(t+\Delta t) = T f m$ となる。

このように混合系の新しい温度  $T_m(t+\Delta t)$  が決まるから系の圧力  $P_m(t+\Delta t)$  は、先に初期状態を決定したのと同じ方法で求めることができる。

計算は、ここから再び初めにもどり、 $\Delta R$  (又は  $\Delta t$ ) を与えることによって更に新しい状態を評価していく。くり返し計算は、 $T_m$ 、 $P_m$ 、時間  $t$  にある値を与えて、そこにすれば終了させるようにしておく。

[ C ] INPUT DATA リスト

( C-1 ) Option 関係

address	option	
1	IP	Plug Jump と vessel expansion による仕事評価
2	IPI	UO <sup>2</sup> の蒸気圧式
3	IMT	混合比の変化
4	IYA	熱伝導
5	ISKOND	2 領域炉心
6	IPLUG	plug Jump の計算
7	IVESL	Vessel expansion の計算
8	ICONV	熱伝達率
9	IVOL	初期体積の input
10	IEN	エネルギーの input
11	ICH	Na 温度の変化
12	IELOSS	エネルギーロス計算
13	NBO	小バブルの数のオーダー
14	NBC	数 ( 但し NB = NBC × 10 <sup>NBO</sup> )
15	IPRINT	Output の間隔

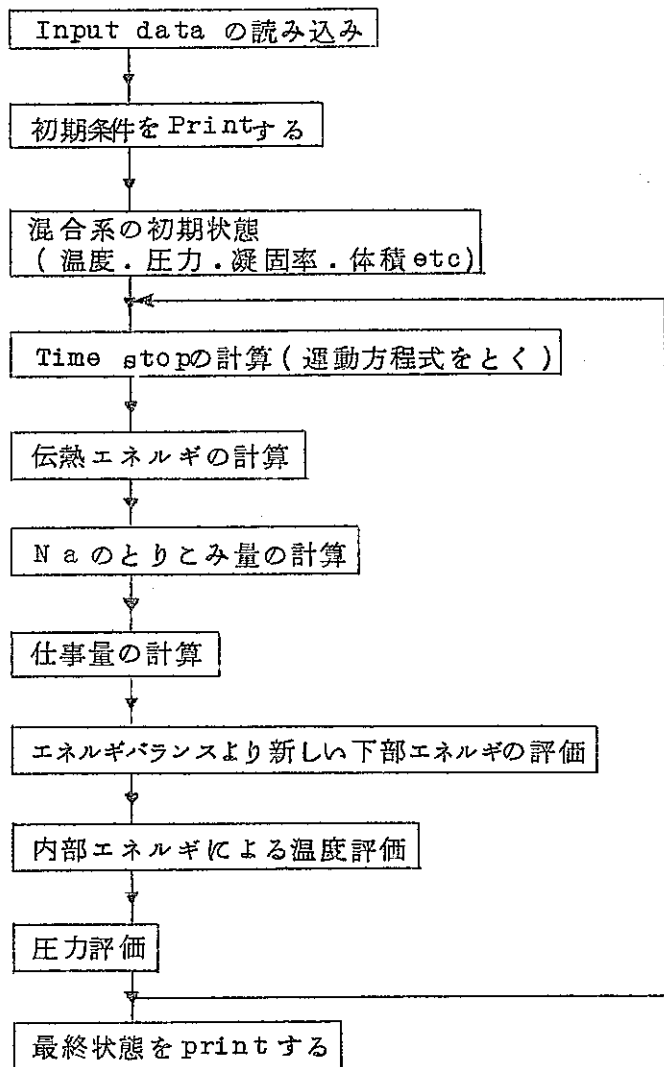
( C-2 ) input data

address	data	内 容	主として用いた値
1	TF	初期燃料温度	5000 °K
2	TC	初期 Na 温度	600 °K
3	TFM	燃料融点	3000 °K
4	HEATL	燃料溶融潜熱	392.3 J/g
5	TNAHM	Na 沸点	1150 °K
6	COHEAT	Na 気化潜熱係数	940.0 J/g
7	TGR	冷却材 (Na) 臨界温度	2780 °K
8			

9	TCFUEL	燃料臨界温度	8000 °K
10	DFUEL	燃料密度	10.0 g/cc
11	AWFUEL	燃料原子量	
12	AWCOOL	冷却材原子量	
13	SF	UO <sup>2</sup> 比熱	0.3 J/g °C
14	SL	Na 比熱	1.2 J/g °C
15	SGP	Na 比熱	0.9 J/g °C
16	VRATIO	UO <sup>2</sup> 体積比	0.4
17	VIN	炉心体積	200 l
18	RFUEL	燃料粒子直径	
19	YAHA	ELOSS 係数	
20	VHALF	速度半減期	
21	SKOND	2 領域の中央燃料割合	
22	YILK	nonleak ratio	0 ~ 1.0
23			
24	SM	初期混合比	0.02
25	SMDEL	混合比積分	"
26	SMSTOP	混合比 search stop	"
27	VOLSTP	自由空間体積	6.0 m <sup>3</sup>
28	PTOI	自由空間压力	1.0 atm
29	PRESTP	压力計算下限	3 atm
30	TSTOP	温度計算下限	1200 °K
31	DRM1	膨張 step	400
32	DRM2	"	200
33	PM	膨張変化境界	1.5
34	VOLUME	初期体積	
35	TTI	周辺 Na 温度	600 °K
36	FFT	time mesh	0.02
37	TTTO	"	0.001

38	FFFO	timemesh	0.00005
39	TTTT	"	0.01
40	FFFF	"	0.0001
45	EFUEL	初期UO <sup>2</sup> エネルギー	
46	TCV	Na 沸点	1150 °K
47	CX	hetero	100ℓ

[D] ARIAKEコード フローチャート



## [ E ] 計 算 結 果

計算の対照としては、実験炉規模を想定した。

}	UO <sub>2</sub> - Na 系	
	炉心体積	200ℓ
	燃料体積	80ℓ
	自由空間体積	6m <sup>3</sup>

計算は主としてパラメーターサーベイのかたちでおこなわれ、主なパラメーターとしては、燃料温度、バブルの数、初期 Na 混合比、Na のとりこみ割合、自由空間体積を用いた。なお UO<sub>2</sub> - Na の混合系により放出されるエネルギーは、すべて inertial な膨脹による仕事とした。

Fig. 2-8 に、典型的な計算 case として、燃料温度が 3000°K、溶融燃料の分散数が 100 コ、初期の Na の混合比が 0.02、自由空間体積が 6 m<sup>3</sup>、Na の蒸気化による混合系間への取込み割合が 0.2 を想定し、圧力、温度、膨脹 etc の history が output されている。但し、この計算では、バブルの膨脹によって、圧力容器のプラグが飛び出したり、vessel が変形しないことを仮定している。圧力は、Na 蒸気を含んで膨脹していく結果、最初は、減衰していくが、バブルの体積が自由空間体積にまで膨脹しきると、今後は、バブルから周囲 Na への熱伝達の結果、Na 蒸気膨脹の効果が大きくなり、secondary な圧力 peak を生じる。温度は、溶融潜熱を消費し切って、燃料がすべて凝固するまで、融点 (3000°K) に保たれているが、それ以後、周囲への伝熱によって内部エネルギーを消費し、放物線的に減衰していく。混合系から Na への伝熱エネルギーは、体積増加による表面積の増加によって始め増えていくが、体積変化がとまると、系の溶度減少によって、減衰していく。バブルの半径、膨脹速度、Na 混合比の history については、Fig 2-8 に見る通りである。

次に、溶融燃料と Na の反応による圧力の発生過程を主として、その計算の結果を見てみよう。Fig 2-9-1、Fig 2-9-2、Fig 2-9-3 には、混合系内への Na のとりこみ割合  $\beta$  をパラメータとした pressure history を示す。Fig 2-9-1 では、燃料の温度を初期に 3000°K としているが、 $t = 0$  msec での初期圧力は、435 気圧で以降 10 msec 位まで、バブルの膨脹と、系からの熱的なエネルギーロスによって、減衰してゆき、その後 15 msec から 25 msec のあたりで、2 次的な圧力 peak を発生している。この傾向は、 $\beta$  が 0 から 1 まで変化しても変わらない。 $\beta$  は、系から Na へ伝熱されるエネルギーのうち、逆に系内に取こまれるエネルギーの割合を与えているから、最初の圧力の minimum は、とりこ

み量  $\beta$  が小さいほど低くなる。  $\beta = 0$  では  $P_{min}$  は 6 atm であるが、  $\beta = 1$  では、 4 5 atm である。又、 secondary な圧力 peak も当然ながら、  $\beta$  によって規定され、  $P_{max}$  は、  $\beta = 1$  では 116 atm、  $\beta = 0$  で 17 atm となる。この  $P_{max}$  の発生時刻が  $\beta$  によって異なるのは、バブルの占める体積が自由空間を占めるまでの時間の差が異なるからである。なお  $\beta = 1$  ということは、必ずしも、系から失われるエネルギーのすべてが、 Na として、系内にとりこかれるということではなくて、内部エネルギーの増加としては、とりこみ Na 量のエンタルピ (周囲 Na 温度 600 °K) 増加分しかないということを忘れてはならない。

Fig 2-9-2、 Fig 2-9-3 では、燃料温度が 5000 °K の場合の圧力発生過程が示されており、前者では、 multibubble ( $N=100$ )、後者では unit bubble ( $N=1$ ) の条件で、  $\beta$  を変化させている。 Fig 2-9-2 については、 Fig 2-9-1 と大体同じような結果であるが、初期圧力が 970 atm で高い圧力を示している。又、最初の圧力減衰現象に関しては、初期圧力が大きいことによつて、減衰速度と、  $P_{min}$  は、 3000 °K の場合にくらべて、前者は、大きく、後者は小さいという結果になっている。 second peak の値は、相対的に、 3000 °K の場合よりも大きく、  $\beta = 1$  の時は 220 atm になる。 second peak の発生時刻は  $\beta$  の変化によつて変わらず 14 msec に一定しているが、膨脹バブルが自由空間を占めるまでの時間が、 3000 °K の場合よりも短いことによつているのであろう。 Fig 2-9-3 では、 secondary peak が 25 msec のところで発生している。これは、 Na を蒸気化して取込む速度に依存していることを示している。即ち、伝熱されるエネルギーは、バブルの表面積と、温度差に依存するが、バブルが unit であるとする、表面積は  $\frac{1}{\sqrt{100}}$  倍となつて、 Na の蒸気化速度は遅くなる。

Fig 2-10-1 は燃料温度 3000 °K、 Fig 2-10-2 は、 5000 °K について、初期の炉心に残存していた Na の混合比を変化させている。 Fig 2-10-1 の場合、初期の Na 混合比が大きければ、初期の圧力は非常に大きく出ている。これは Na の圧力を、  $P_{wa}(F_{in}) \times D/DV$  で評価したことによつている。(ここで  $P_{wa}(T_m)$  は、温度  $T_m$  °K に対応する Na 密度、) Na の圧力は、バブルの温度で決定される蒸気圧  $P_{na}(T_m)$  以上になりうるわけはなく、初期の混合比を 0.1 or 0.4 に設定した場合の計算結果は、真の圧力挙動を示していないものと思われる。一方、初期の混合比が小さい場合は、 Na の蒸気圧に対する補正は意味があり、つまり、混合系が飽和状態になっていないことを想定しており、初期の圧力は小さくでている、(  $SM=0.01$  の場合は、初期圧力 20 atm である。)、又、 secondary peak については、初期の圧力に依存しており、  $SM=0.01$  の場合は、バブルの膨脹速度が

小さいため、secondary peak の発生時刻は、43 msec と、かなり遅くなっている。一方 Fig 2-10-2 の場合は、初期燃料温度が5000°K となっているため、UO<sub>2</sub> の蒸気圧による効果がきいてくるがバブル内の初期の圧力は、事実上、Na の蒸気圧によって測定されており、SM=0.001 の場合のように、Na 蒸気分圧が小さく、初期の混合系の温度が高い場合には、UO<sub>2</sub> の蒸気圧が支配的になっている。燃料温度が5000°K の場合、3000°K の場合のように、初期の混合比が小さい場合に初期圧力が下るといようなことはなく、それは、UO<sub>2</sub> の蒸気圧が効いてくるということであった。secondary peak の発生時刻も、初期の圧力に依存していることがわかった。

Fig 2-11-1. Fig 2-11-2 では、燃料の分散状況に対応する pressure history が示してある。N=1 つまり燃料が全く分散せず、Na と1つの大きな混合系を成立させて、膨脹して行く場合には、Fig 2-9-3 でも見たように、secondary peak の発生時刻は、かなり遅れる。3000°K の場合は、40 msec となる。又、secondary peak の発生時刻が遅くなると同時に、第2次ピークのパルス巾は大きくなる。これは、混合系からの熱損失が相対的に少くなるということを考えれば当然であろう。Fig 2-11-1 の場合 secondary peak は N=10<sup>6</sup> の場合以外はすべて60 atm であり、その発生時刻は6 msec から40 msec に渡る。Fig 2-11-2 の場合は、secondary peak は80 atm で const であり、発生時刻は7 msec から25 msec にわたっている。5000°K の場合、全体的にパルス巾が小さいのは、バブルの内部エネルギーが大きいことによつて、伝熱エネルギーが相対的に大きくなることによつている。

最後に圧力容器付の自由空間体積が圧力挙動に及ぼす影響を Fig 2-12-1 Fig 2-12-2 に示す。自由空間体積が小さければ、バブルの膨脹は比較的短い時間で終わり、その後は、Na の蒸気化による圧力発生 phase に入っていくため secondary peak は大きくなる。つまり、系が、十分に内部エネルギーを持っている段階で、膨脹による仕事エネルギーの放出が終わり、残りのエネルギーは、すべて、Na の蒸気化と系からの熱的な損失に費されるために、圧力パルスは peak 値、パルス巾が大きくなるのであろう。

エネルギー収支

初期内部エネルギー	$10.45 \times 10^6$ joule
変化後内部エネルギー	$2.58 \times 10^6$ joule
仕事	$0.20 \times 10^6$ joule
Na 蒸気化	$0.37 \times 10^6$ joule
伝熱エネルギー	$7.30 \times 10^6$ joule

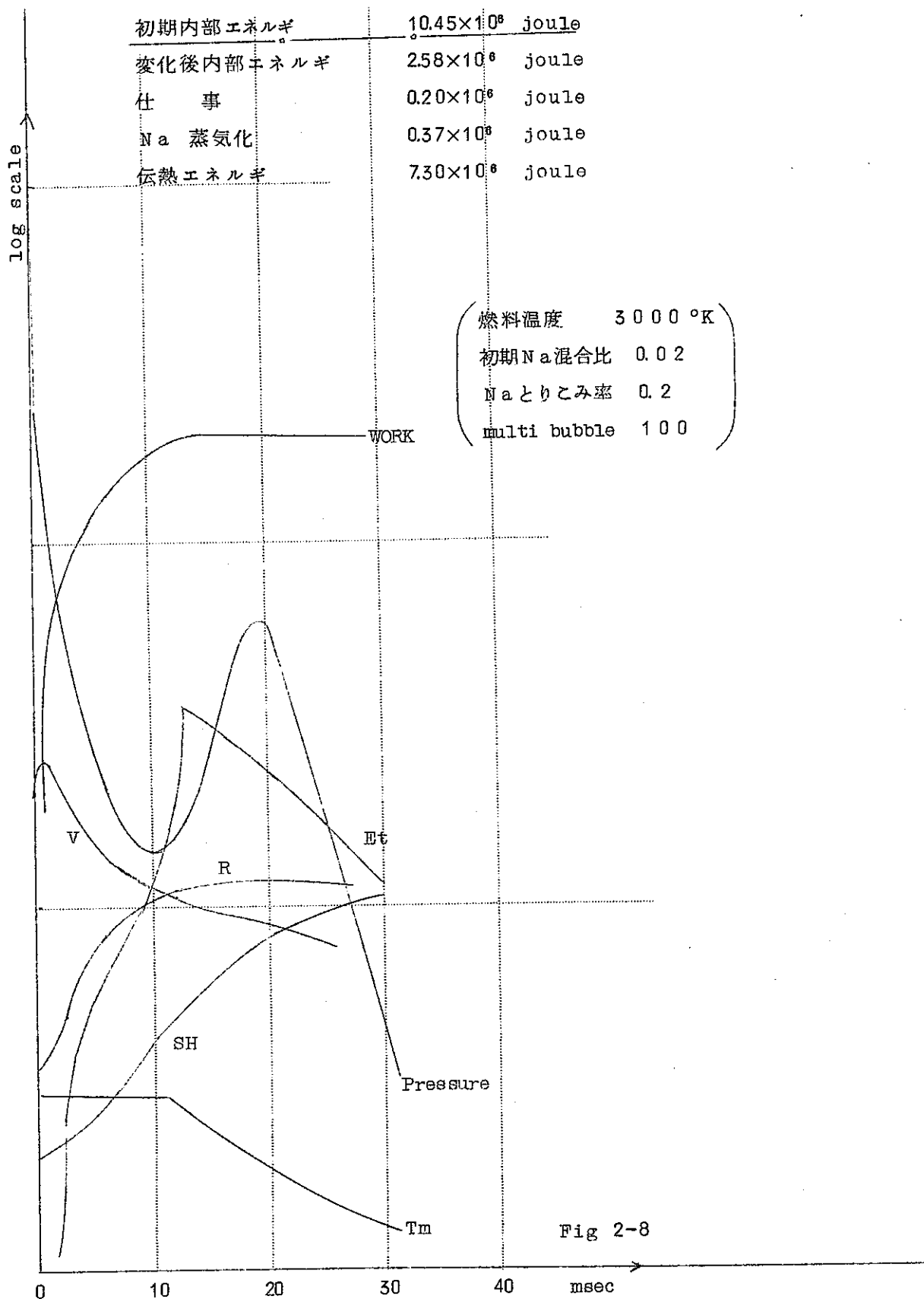


Fig 2-8



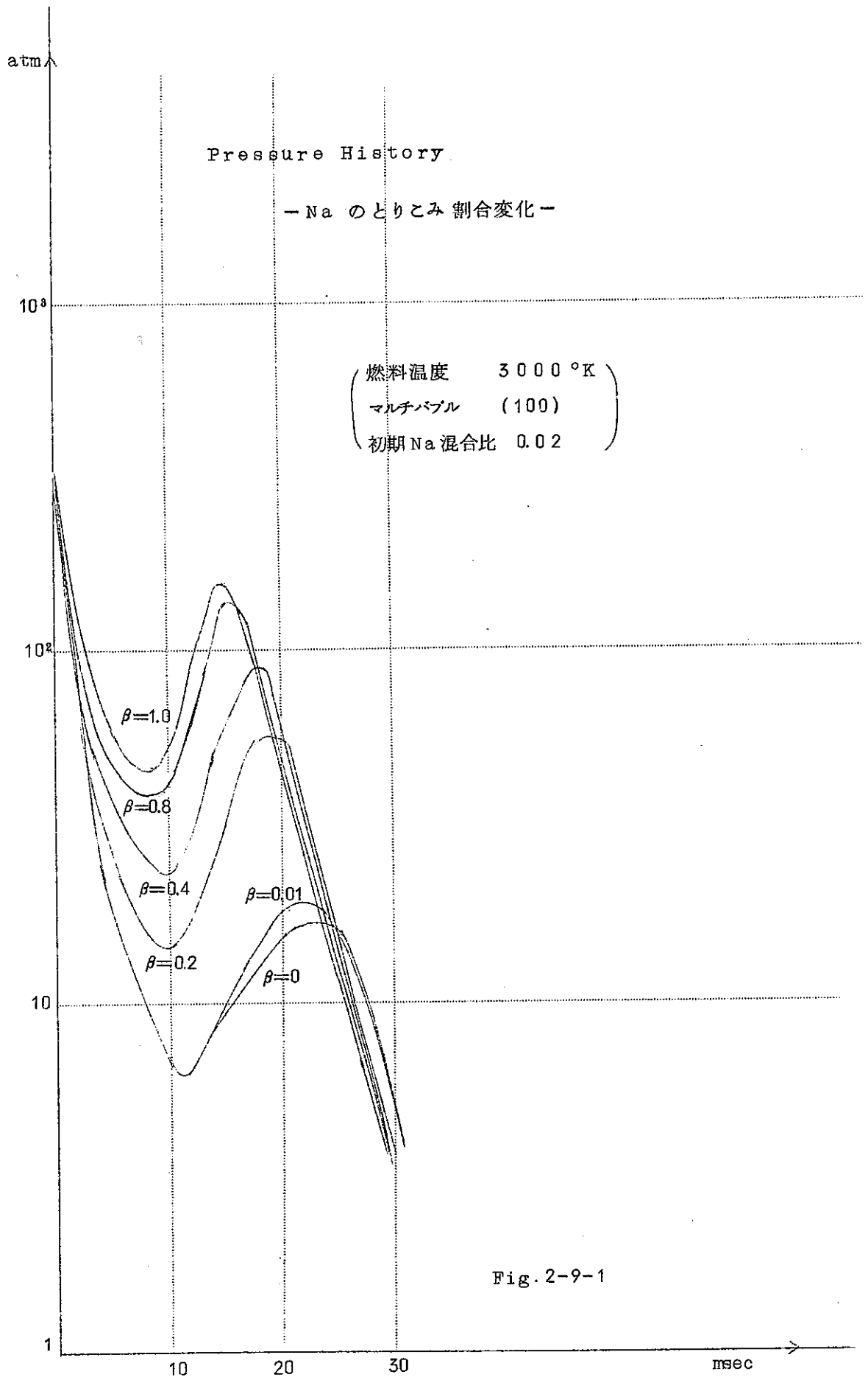
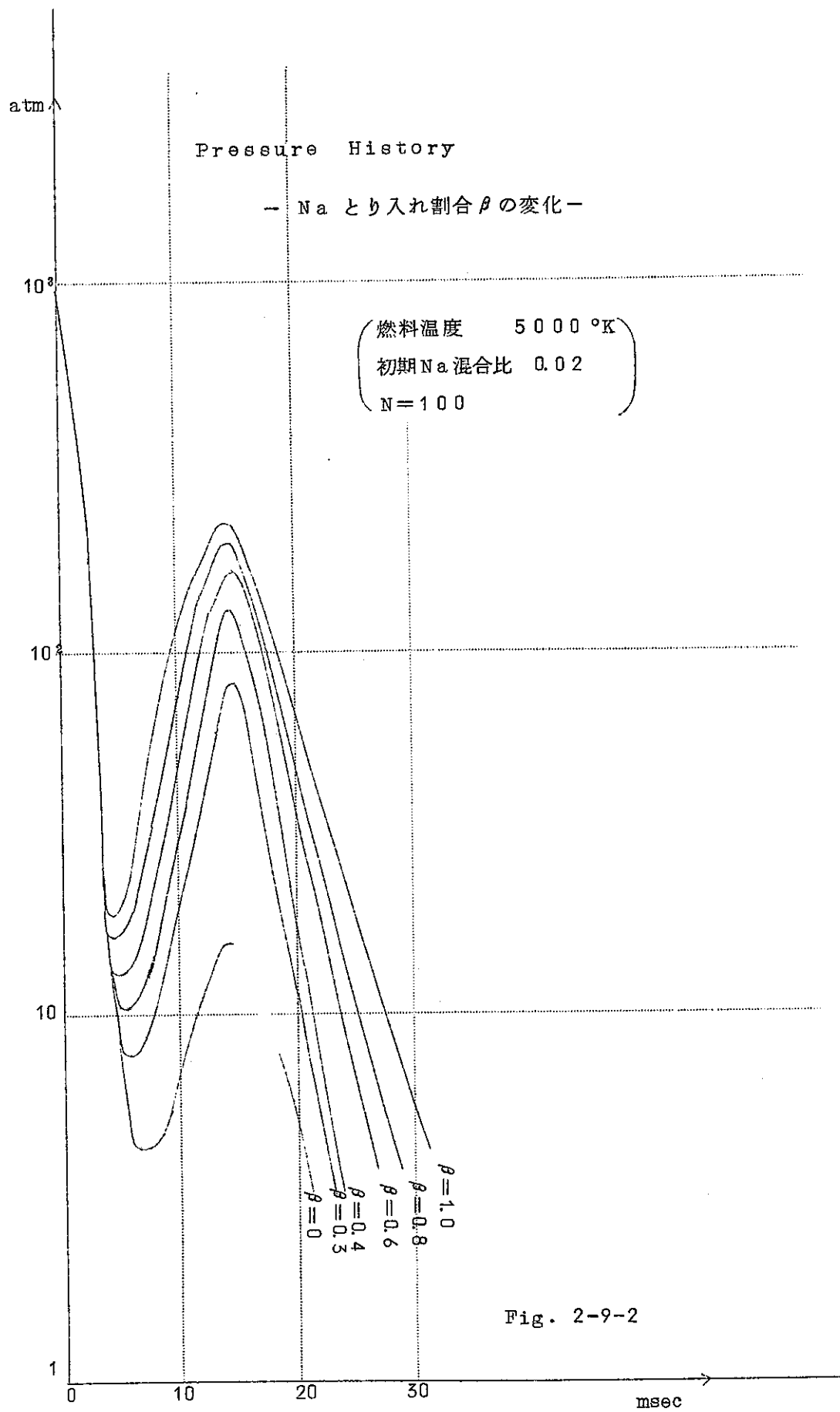
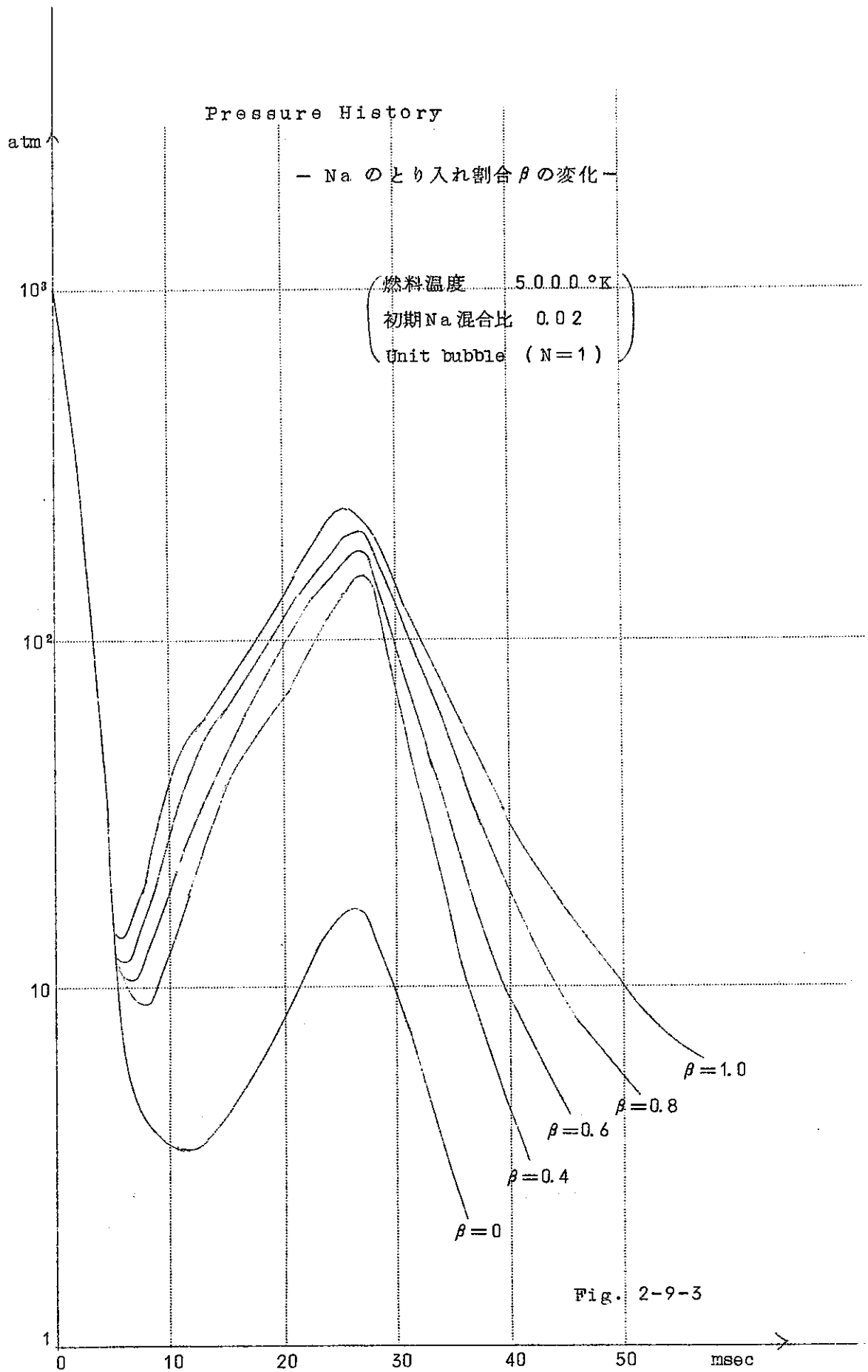


Fig. 2-9-1





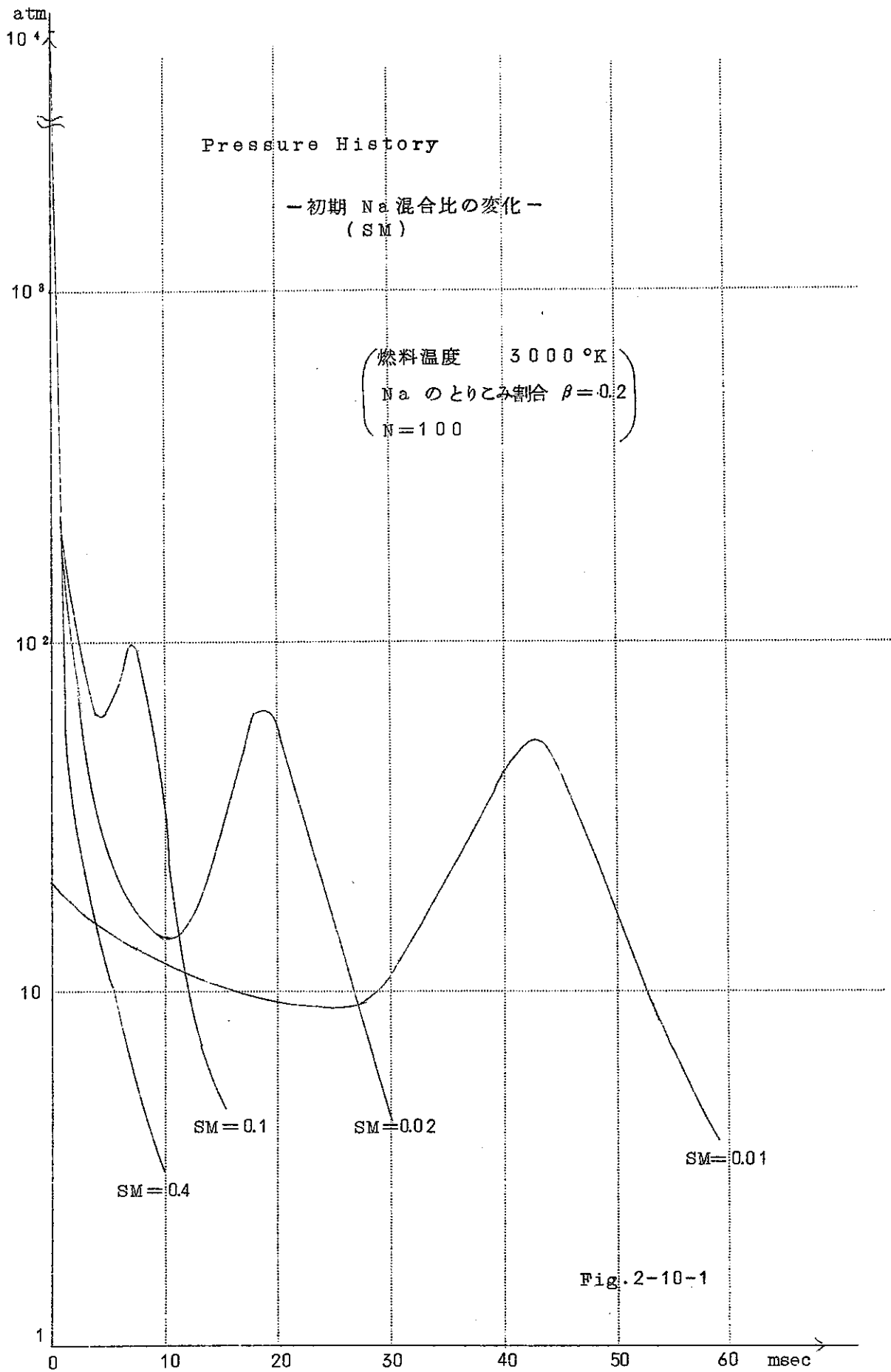


Fig. 2-10-1

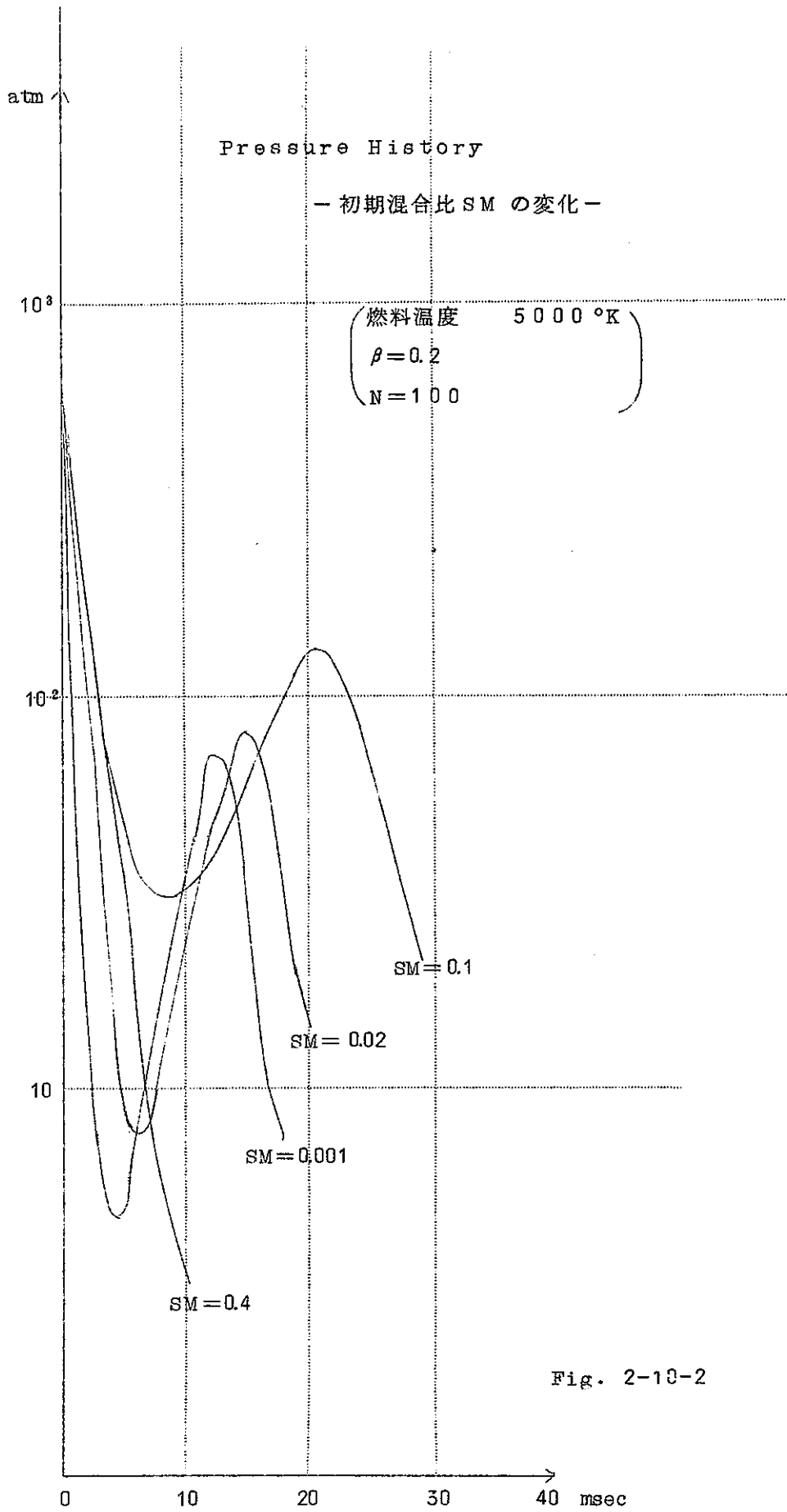
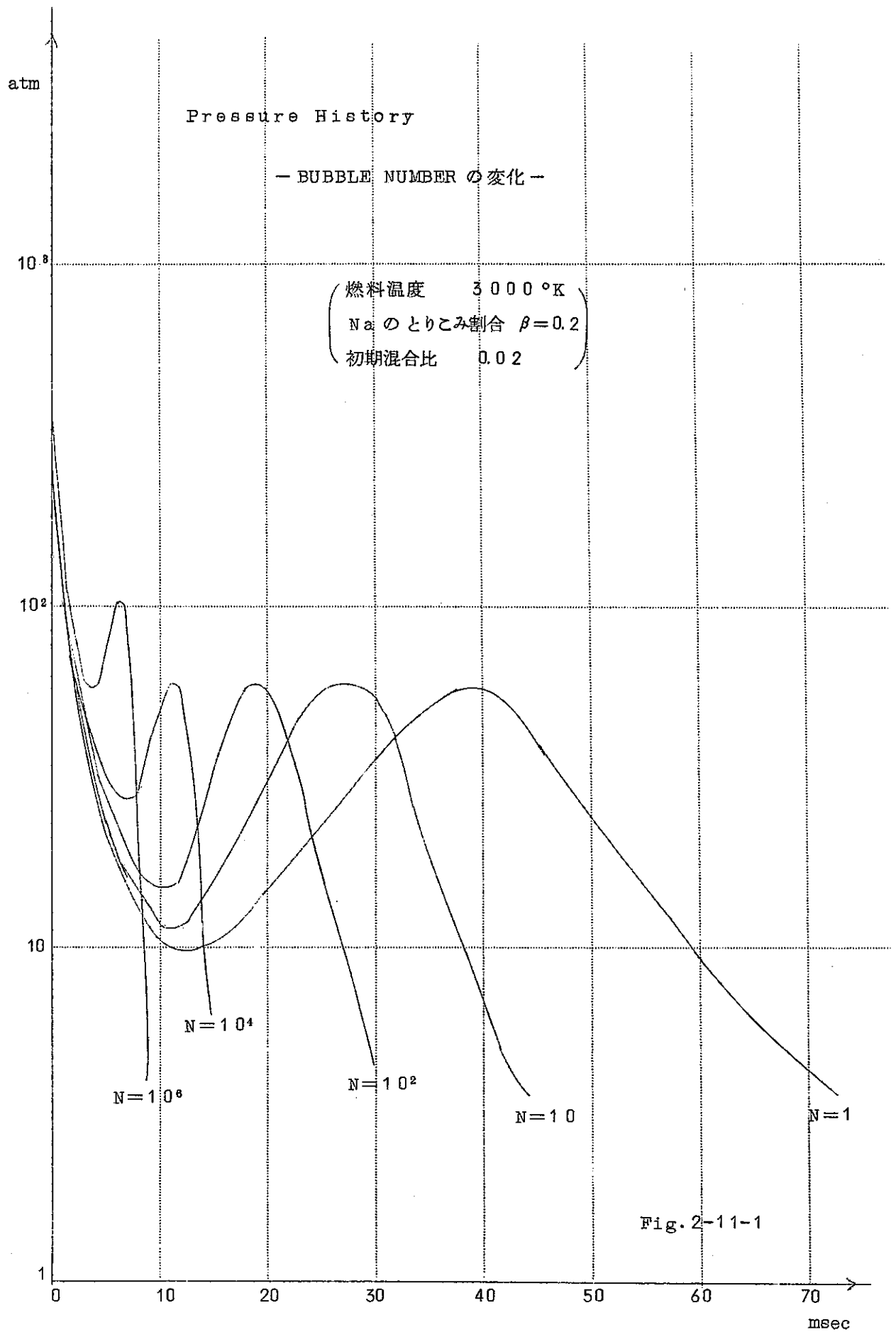
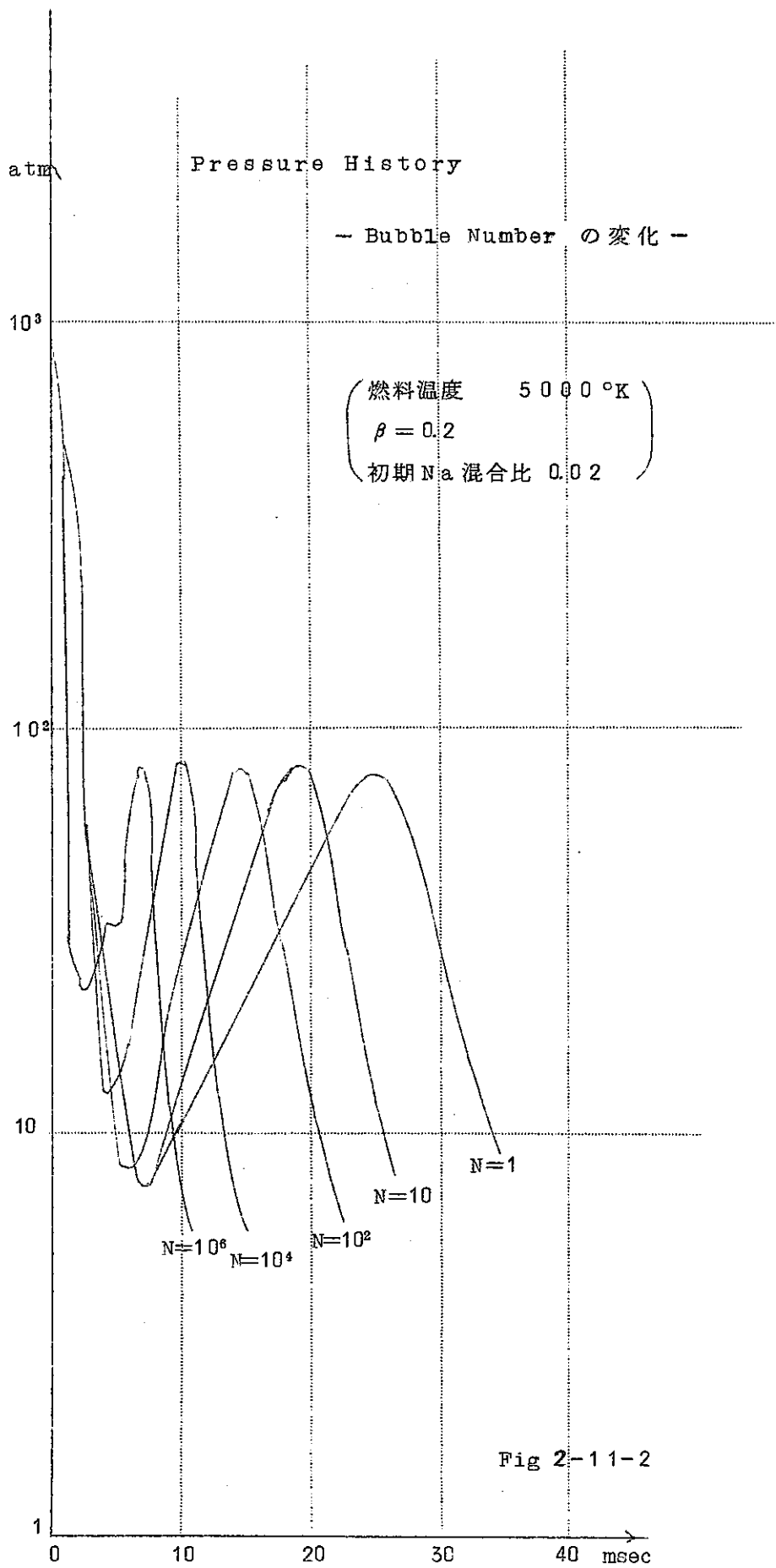
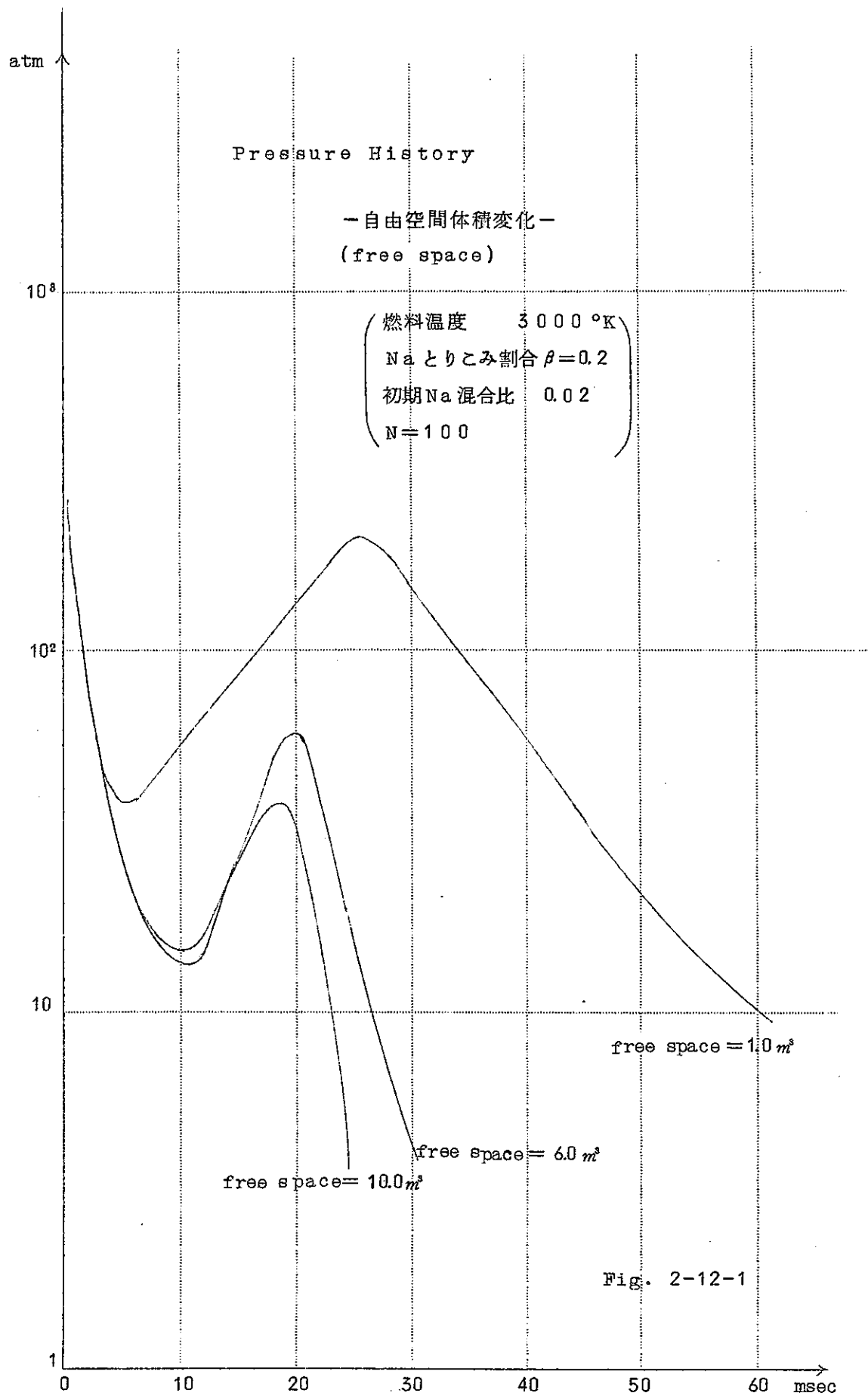


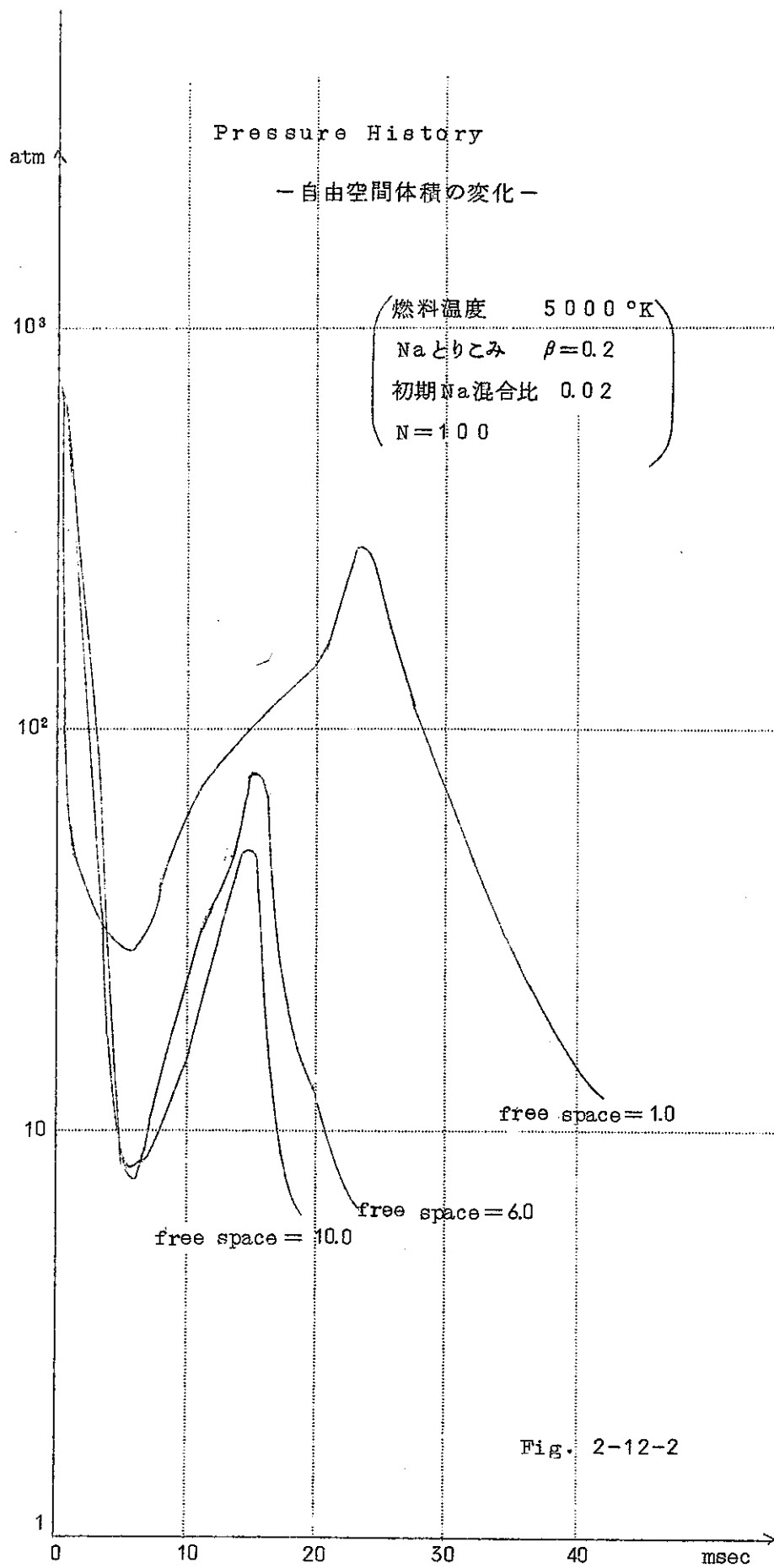
Fig. 2-10-2











## [ F ] 検 討

ARIAKEコードを用いて、炉心溶融事故後の、溶融燃料とNaのinteractionをパラメータサーベイしたが、以下にその結論を示す。

- ① Naのとりこみ割合、初期Na混合比、バブルの分散状況容器の自由空間体積をパラメータとして計算を行い、それぞれの圧力挙動に関して、有意な結果が得られた。
- ② Naのとりこみ割合に関しては、混合系内へ全くNaをとりこまないmodelと、取込みを想定したモデルでは、第2次圧力ピーク値にオーダーの違いが出る。
- ③ 炉心溶融事故後、炉心内にNaが残存している効果は、3000°Kのような比較的低温の場合に影響し、初期のNa混合比が小さければsecondary peakの発生時刻は遅く、初期混合比が大きければsecondary peakは短時間で起こる。
- ④ 溶融燃料の挙動が、unit bubbleであるか、multi bubbleであるかで、圧力のhistoryは変化し、unit bubbleの場合は、長時間に渡る圧力パルスを与える。
- ⑤ 容器内の自由空間の体積は、secondary peakの値とパルス巾に影響を与え、自由空間体積が大きい程、このsecondary pressure pulseの規模は小さくなる。

以上のまとめをTable 2-5に示す。

ARIAKEコードの特徴の1つは、溶融燃料をNaの反応における伝熱メカニズムへのアプローチということであった。熱伝達率の想定に関しては、強制対流モデルをとり入れ、更に炉心のfragmentationによる影響を考慮した。又、炉心の膨脹に伴い、周囲Naが蒸気化されて、混合系の内部に取り入れられることによる効果を加味している。もう1つの特徴は、初期にNaが炉心内に存在する効果を取り入れていることであり、この効果は、燃料の初期温度が低い場合には顕著に効いてくることがわかった。更にもう1つの特徴は、燃料とNaの混合系の状態設定に関することで、バブル内部の圧力を飽和状態としてではなく、蒸気圧と密度と関係から、非飽和状態を考慮したということである。これは、燃料とNaの反応の真のhistoryにアプローチする一歩であると考えられる。

しかし、このARIAKEコードによって得られた計算結果は、まだまだ真の現象把握には至っていないであろう。考えなければならぬのは、まず炉心の膨脹に関する初期状態である。ARIAKEでは、初期に存在していたNaと溶融UO<sub>2</sub>の混合系の内部圧力を駆動力として膨脹がinitiateされたが、例えば、燃料温度が3000°Kで、初期のNa混合比が0とすれば、initial pointでのdriving forceはないことになってしまう。出力暴走後の炉心の状態を設定するのは、なかなか困難ではあるけれども、逸走時に発生していたUO<sub>2</sub>

計算結果のまとめ

Table 2-5

パラメータ			初期圧力 (atm)	2次ピーク圧力 (atm)	時刻 (msec)
Na とりこみ割合	3000 °K	$\beta=0$	435	17	22
		$\beta=1$	435	160	15
	5000 °K	$\beta=0$	970	16	14
		$\beta=1$	970	220	14
初期Na 混合比	3000 °K	SM=0.01	210	54	43
		SM=0.02	435	64	19
	5000 °K	SM=0.02	970	80	15
		SM=0.1	840	130	21
バブルの 数	3000 °K	N=1	435	58	40
		N=10 <sup>4</sup>	435	58	11
	5000 °K	N=1	970	80	25
		N=10 <sup>8</sup>	970	80	7
自由空間 体積	3000 °K	1 m <sup>3</sup>	435	260	26
		6 m <sup>3</sup>	435	60	20
	5000 °K	1 m <sup>3</sup>	970	290	24
		6 m <sup>3</sup>	970	82	15

蒸気が炉心に残っていて、そうしたUO<sub>2</sub>蒸気、Na蒸気をinitialな駆動力として膨脹が開始すると考えられるであろう。又、ARIAKEでは、初期の炉心の温度状態を均一として考えたが、内部に高圧のUO<sub>2</sub>蒸気が存在し、外部が凝縮した殻を形成しているといったmodelも考えられる。こうした初期状態の設定は、出力逸走によるエネルギー計算と関連したかたちで考慮されなければならないであろう。

pressure historyは、ARIAKEでは、すべてinertielなmodelで計算されたが、acousticなエネルギーの放出過程の検討も必要であろう。炉心のexplosionは、chemicalなexplosionとは違って、衝撃波として放出されるエネルギーの割合は小さいだろうけれども、Naの蒸気発生などの後期のphaseに与える影響を考えると、やはり、放出過程へのアプローチも必要であろう。そういった意味では、このARIAKEコードは、初期の圧力挙動よりも、Na蒸気膨脹による後の圧力挙動にspotをあてたものといえよう。

次に、炉心膨脹形態についての検討であるが、unitなバブルの成長を考えた場合は別に

しても、multi bubble を想定した場合の計算モデルは果して正しかったのかどうか。行った計算では、multi bubble の想定は、伝熱面積の拡大という点にだけ効いてきたが、この多数の小気泡の成長を考えると、他の意味でも重要であると考えられる。計算式の説明の項でも述べたように、多数の小バブルを含有する。hetero なバブルの想定がそれであった。この場合バブルの成長は、 $UO_2$  と Na の均質な小バブルから、大バブル内の Na への伝熱の結果、hetero な大バブル自身が内圧を有するようになり、その内圧によっておこる。小バブルの成長は、この大きなバブルの成長によって規定されるであろう。問題点は、小バブルを包んだ Na が、エネルギーの供給を受けて、膨脹を開始できるだけの内圧を持つようになる initial point の設定であり、更には、こうした膨脹モデルがいつまで持続するかということである。後者の点に関して云えば、大きなバブル内部の Na が多量のエネルギーを供給されて蒸気化することによって multi bubble 成長が、ある点で、unit bubble の成長に移ってしまう可能性がある。完全に1つのバブルに統合してしまうということはなくとも、バブルの中心部ではそうした反応が部分的に起こるとすることも考えられる。いずれにしても燃料の fragmentation も含めた、バブルの成長のメカニズムについては、今後も詳しい検討がなされなければならないであろう。

附 录

ARIAKE Code Fortran Source List

```

PROGRAM MAIN(INPUT,OUTPUT,TAPE5=INPUT,TAPE6=OUTPUT)
COMMON /CALC2/T,R,V,VOL,XS,TMETC
COMMON /COND/PRE,PREA,VOL1,VOL2,DTA
COMMON /CONST/SL,SF,SGP,HEATL,TCR,TFM ,TC,TF
*,TCV
COMMON /CALC/TM,EOLD,X1, SM ,PREM,RRR,VOLM
COMMON /CVOL/ FUELS, DFUEL ,PTOI,FACTOR
COMMON /DRM/DRM1,DRM2,RM
COMMON /ENERGY/ EIT ,EFUEL,IEN
COMMON/ENERG2/DSMSUM,EADDED,ENSUM,VAPSUM,ELOSUM, ELT,WORK,WV,WP
*, EDESUN
COMMON /FUKA/ RFUEL, TTI
COMMON /HETERO/ NB,CX
COMMON /IMAIT/ TRSTOP
COMMON /INPUT/ Z(50), TCFUEL,TNAHM,COHEAT,AWCOOL,AWFUEL,VIN,VRATIO
COMMON /IPPPP/IPRE,VNA
COMMON /OPTION/ IPI,IMJ,IYA,YAHA,SKOND,ISKOND,IDEENDO
*,FFT ,ICH,IWRITE
COMMON /OPT1/VHALF, YILK,VOLUME ,SMDEL ,VOLSIN ,IVOL
*,ICONV ,IELOS
COMMON /PJVEL/EP(2,20),EPIH(2,20), SIG(2,20),SIGIN(2,20),
* G(20), EPS(20), VSEGO(20), RO(20),VSEGN(20),DRSUM(20)
COMMON /PJVE2/W3,W4,APLUG,WTPLUG,RVESL,THICK,DELZ,HIGHT,BB,GG,POKG
*,FACTR, NLAST
COMMON/PJVE3/ IPLUG,IVESL ,IP
COMMON /SOO/ DNA
COMMON /STPCON/ TSTOP,PRESTP ,SMSSTOP,VOLSTP,RSTOP,RSTOKU
COMMON /TIME/ TTTO,FFFO,TTTT,FFFF
COMMON/VO/ VOLINM
DATA PHI/3.1416/
1112 FORMAT(1H1,16A5,I20//)
TPRE=1
H=1.0
RPIN=0.3
XN=1
AA=1.0/3.0
PHI43=PHI*4.0*AA
PHI43I=3.0/(4.0*PHI)
IPI=IPI+1
NCASE=0
1 NCASE=NCASE+1
ISM=1
READ(5,1111) (Z(N),N=1,16)
1111 FORMAT(16A5)
CALL DATIN(ISM)
IF(IP.EQ.0) GO TO 3102
CALL PREPJV
3102 CONTINUE
VOLSTP=VOLSIN
WRITE(6,1112) (Z(N),N=1,16) , NCASE
CALL PRINT1
VCORE=VIN*1.0EO3
VOLINM=VCORE*VRATIO
FMS=VOLINM*DFUEL
FESD=FMS*(1.0-SKOND)*FLOAT(ISKOND)
FUELS=FMS-FESD
FH=FESD*DFUEL/(RPIN*PRIN*PHI)

```

```

AREA= PHI*RPIN*(TH+RPIN*KN) *2.0
DNX=1.
FACTOR=FUELMS**AA
PTOT=PTOI*1.013FO6
9999 CONTINUE
CALL DATTN(ISM)
IF(IP.EQ.0) GO TO 1675
DO 1674 NI=1,NLAST
EPS(NI)=0.0
VSEGO(NI)=0.0
RO(NI)=RVESL
SIG(1,NI)=0.0
DRSUM(NI)=0.0
VSEGN(NI)=0.0
1674 CONTINUE
1675 CONTINUE
ANB=NB
AN=ANB
FUELMS=FUELMS/ANB
DFINV=1.0/DFUEL
TCOOL=TC
I=0
J=0
IAM=1
II=0
R2O=0.0
SML=SM
SOLH=0.0
EN=0.0
WORK=0.0
XS1=0.0
X1=0.0
XS=0.0
FTIME=0.001*FTF
B=COHEAT
DNA=S DEN(TC,1)
IF(TC.GT.1000.0) DL=S DEN(TC,2)
VNA=SM/DNA*FUELMS
TMETO=TF
TMEIN=TF
CALL MIXTEM
E1=EOLD*(1.0+SM)
VFUEL=VCORE*VRATIO
VOLM=VNA+VFUEL
IF(IVOL.EQ.1) VOLM=VOLM
*      +CX
VOLSTP=VOLSTP*1.0E+06+VOLM
RSTOP=(VOLSTP*PHI43I)**AA
RSTOKU=RSTOP
CXM=CX*DNA
R=(PHI43I*(VOLM-CX)/AN)**AA
VOL=PHI43*R*R
VNA=VOL-FUELMS*X1*DFINV
CALL PRINT2
R2=V*V
RLARGE=RRR
R1=RRR*RM

```

```

DR1=RRR/DRM1
DR2=RRR/DRM2
I=1
T=0.
TEM=TM
HIGHT=0.0
ELT=0.0
ELOS=0.0
ENL=0.0
DSMSUM=0.0
VAPSUM=0.0
EADDED=0.0
EDESUM=0.0
ELOSUM=0.0
ENSUM=0.0
EN=0.0
DEVAP=0.0
SMNEW=SM
V2=0.0
DTA=0.0
EDENT=0.0
IPRE=1
IZAWA=0
EMET=0.0
X1=0.0
WP=0.0
WV=0.0
WPLUG=0.0
WVESL=0.0
IRSTOP=1
NI=0
VELARG=SORT(R2)
CXD=CX*PHI43I
  VHINV=1.0/VHALF
  FMSINV=1.0/FUELMS
V=0.0
6 CONTINUE
  XFLO=0.0
  DX=0.0
  X2=0.0
  IF(X1.GE.1.0) X2=1.0
  DSM1=0.0
  EDE4DO=0.0
  J=J+1
  WORK=WORK+ENL
  TM=TEM
C OUTPUT
  ELT=EOLD*FUELMS
  IF(J.NE.I) GO TO 60
  WRITE(6,2010) T,R,PREA,V,VOL,TM,WORK,EDENT,XS,X1
  * ,D,DL,DV
  EF=ENL*FMSINV
  WRITE(6,2802) SH,SMNEW,DSM,EL,EOLD,EN,EF,DEVAP,RLARGE,VELARG
  * ,TTI
2010 FORMAT(1H ,1P8E11.3,OP2F5.2,3(LX,F6.3) )
2802 FORMAT(1H ,1P10E11.3 )
  I=I+IPRINT

```



```

60 CONTINUE
  EDENF=0.0
  EN1=0.0
  EN=0.0
  VOLL=VOL
  XSL=XS
  TOKU=TEM
  SOLH1=SOLH
  LAST=1
  IF(TEM.LE.TSTOP) GO TO 1998
  LAST=2
  IF(PREA.LE.PRESTP.AND.TEM.LT.TFM) GO TO 1998
  IF(RLARGE-RL)3,3,4
3 DR=DR1
  GO TO 5
4 DR=DR2
5 CONTINUE
  IF(CX.LE.0.0)
  *PSTOP=(SM-SM1)*FUELS/(4.0*PHI*R*R*DNA)+RSTOKU
  IF(IRSTOP.EQ.1) GO TO 4444
  V=V2*EXP((DTA2-T)*VHINV)
  IF(T.GT.TTTO) DTA=FTIME
  IF(T.LE.TTTO) DTA=DTA*1.05
  GO TO 4445
4444 CONTINUE
  DTA=TAU(RLARGE,PRE,PTOI,DR,R2O,R2,DNA,VELARG,RSTOP)
  PN=(RLAPGE*RLARGE*PLARGE-CXD)/ANB
  RNEW=RN**AA
  DR=RNEW-R
  V=DR/DTA
  R=RNEW
  V2=V
  DTA2=DTA+T
  ETIME=DTA*2.0
4445 CONTINUE
  IF(IDENDO.NE.1) GO TO 550
  RAD=R-0.5*DR
  TFILM=(TTI+TEM)*0.5
  SLF=SLFN(TFILM,TCR)
  HCON=DENDO(TFILM,SLF,V,RAD,ICONV,ACONV,TEM,J,II)
  EDENDO=DTA*HCON*4.0*PHI*RAD*RAD*(TEM-TTI)
  EDENF=EDEDENDO*1.0
550 CONTINUE
  VOL=(R*R*R)*PHI43
  VOL2=VOL
  IF(IRSTOP.EQ.0.AND.IP.NE.0)
  *          CALL PJVE(NI,WPLUG,WVESL,T,WP,WV          ,VPNEW
  *)
C TEMPERATURE,PRESSURE AND WORK CALCULATION
21 CONTINUE
  DSM=0.0
  SOLH=LATEHT(B,TEM,TCR)
  SOLH2=SOLH
510 CONTINUE
  PT=PREA/TEM
  DV=SDEM(PT,3)
  DL=DV

```

```

IF(TEM.LE.TCR) DL=SDEN(TEM,2)
TAV=(TEM+TCOOL)*0.5
SLF=SLFN(TAV,TCR)
IF(IELOS.EQ.Q) GO TO 511
ELOS=ELOSSH(SM,RFUEL,TEM,TCOOL,DTA,V)*YAHA
DSM=ELOS/(SLF*(TEM-TTI)+XS*SOLH)*SKOND
511 CONTINUE
IF(ICONV.NE.Q)DSM=EDEND/(SLF*(TEM-TTI)+XS*SOLH)*EMSINV *YILK
IF(DSM.GT.Q.Q) GO TO 512
IF(YILK.EQ.Q.Q) GO TO 512
WRITE(6,8530) J,DSM,DSM1,SM,ELOS,EDEND
512 CONTINUE
IF(ICH.EQ.Q) GO TO 543
CXM=CXM-DSM*FUELMS*ANB
DT=EDEF*(1.Q-YILK)*ANB/(CXM*SLFN(TTI,TCR))
TTI=TTI+DT
CXDL=CXM/SDEN(TTI,1)
DELC=CXDL-CXD/PHI43I
DDD=ABS(DELC/CXD)
IF(DDD.GT.Q.QOOL) WRITE(6,544)DDD,CXD,CXDL,TTI,DR,CXM
CXD=CXDL*PHI43I
543 CONTINUE
TCOOL=TTI
IF(IMJ.FO.1) DSM=0.0
IF(ICONV.EQ.Q) DSM=0.0
CXM=CXM-DSM*FUELMS*ANB
CXDL=CXM/SDEN(TTI,1)
CXD=CXDL*PHI43I
IF(CX.EQ.Q.Q) CXD=0.0
IF(CXD.LT.Q.Q) CXD=0.0
8530 FORMAT(1H, I3,5E12.4,4OH*J*DSM*DSM1*SM*ELOS*EDEND*
*
544 FORMAT(1H,15HCXD CHECK 1P6E12.4)
DSM1=DSM
SMNEW=SM+DSM
SMNINV=1.0/(1.0+SMNEW)
EN1=PRE*(VOL2-VOL1)*1.0E-07
DNAV=SDEN(TEM,1)
DREV=DSM*FUELMS/(DNAV*4.0*PHI*R*R)
R=R+DREV
RLARGE=(R*R*R*ANB+CXD)**AA
VOL2=PHI43*R*R*R
VOL=VOL2
VNA=VOL2-X1*FUELMS*DFINV
D=0.0
IF(VNA.GT.Q.Q) D=SMNEW*FUELMS/VNA
IF(D.GT.1.0) WRITE(6,7653)D,SMNEW,SM,FUELMS,VNA,VOL2,R,DREV
7653 FORMAT(1H,1P8E15.7)
CALL XSCAL(XS,XS2,D,DV,DL)
SLF=SLFN(TEM,TCR)
CPNOR=((SLF+(SGP-SLF)*XS2)*SMNEW+SF)*SMNINV
IF(ISKOND.EQ.Q) GO TO 301
CALL TFR(FESD,H,AREA,XM1,TMETN,EMET,DTA,XFLO)
301 CONTINUE
C ENERGY BALANCE
EL=EOLD*(1.0+SM)+DSM*SL*TCOOL
*+EMET*FMSINV

```

```

DEVAP=SOLH2*(SM+DSM)*XS2-SOLH1*SM*XS1
EN=ELOS+DEVAP+(EN1+EDENDO+WPLUG+WVESL)*FMSINV
ENEW=(E1-EN)*SMNINV
DELT=(EOLD-ENEW)/CPNOR
T2=TOKU-DELT
IF(ENEW.LE.0.0) WRITE(6,9300) J,T,ENEW,EOLD,E1,ELOS,DEVAP,EN1,
*EDENDO,WPLUG,WVESL
9300 FORMAT(1H ,2I6, 9E12.4)
LAST=3
IF(ENEW.LE.0.0) GO TO 1998
IF(T2.GE.TFM GO TO 702
IF(IZAWA.EQ.1) GO TO 702
HTNOR=HEATL*SMNINV
DX=(TEM-T2)*CPNOR/HTNOR
X2=X1+DX
IF(X2.LT.1.0) GO TO 703
IZAWA=1
DELT2=(X2-1.0)*HTNOR
T2=TFM-DELT2
X2=1.0
GO TO 702
703 CONTINUE
T2=TFM
702 CONTINUE
IF(T2.GE.TOKU) T2=TOKU
TFM=T2
X1=X2
EOLD=ENEW
600 CONTINUE
691 CONTINUE
SM=SMNEW
500 CONTINUE
T=T+DTA
VFUEL=VOL2*(1.0-X1)+X1*FUELMS*DFINV
PREA=SPRE(TEM)
PT=PREA/TEM
DV=SDEN(DT,3)
DL=DV
IF(TEM.LE.TCR) DL=SDEN(TEM,2)
IF(IPRE.GE.1.AND.X1.LT.1.0) GO TO 591
IF(D.LT.DV) PREA=PREA*D/DV
IF(D.GT.DL) PREA=PREA*D/DL
GO TO 592
591 CONTINUE
IF(IPI.NE.3) GO TO 1591
E=TEM*SF*(1.0-X1)*HEATL
EX=E/4+.2E+03*AWFUEL
1591 CONTINUE
CALL PRESO(X1,TEM,EX,SM,PREA,D,DV,DL,VOLM,FUELMS,J,IAM)
592 CONTINUE
PRE=PREA*0.1013E+07
CALL PEAK(J,T,TEM,PREA,D,DV,DL)
DSM=DSM1
EDESUM=EDESUM+EDENDO
ELOSUM=ELOSUM+ELOS
ENSUM=ENSUM+EN
VAPSUM=VAPSUM+DEVAP

```

```

DSMSUM=DSMSUM+DSM
FADDED=EADDED+DSM*TC*SL
622 CONTINUE
IF(T.GT.TFTO) FTIME=FFFO
IF(T.GT.TTTT) FTIME=FFFF
LAST=4
IF(T.GT.O.O6) FTIME=0.5E-03
IF(T.GT.O.O10) FTIME=1.OE-03
IF(T.LT.1.O) GO TO 6
LAST=5
1998 CONTINUE
WRITE(6,7777) LAST
7777 FORMAT(1H ,30H*CALCULATION STOP AT
* 1OX,6OH 1*TEM, 2*PREA, 3*ENEW, 4*
* ) 5*TIME
CALL PRINT3(J,I)
WRITE(6,8530) J,DSM,DSM1,SM,ELOS,EDENDO
WRITE(6,2802) SM,SMNEW,DSM,EL,EOLD,EN,EF,DEVAP,WPLUG,WVESL
*,RLARGE,VELARG ,TTI
IF(IPLUG.EQ.O.AND.IVFSL.EQ.O) GO TO 4999
WRITE(6,2674) T,PREA, WP, WV , HIGHT ,VPNEW
DO 108 NI=1,HLAST
WRITE(6,2675) NI,RO(NI),EPS(NI),VSEGN(NI) ,DRSUM(NI)
108 CONTINUE
4999 CONTINUE
2674 FORMAT(1H ,24HT*PREA*WP*WV*HIGHT*VPNEW/1H ,6(1PE12.5,5X)///1H
*,15HNI*RO*EPS*VSEGN ,7H*DRSUM
)
2675 FORMAT(1H ,I3,5X,4(1PE15.8,5X))
IF(ENEW.LE.O.O) WRITE(6,2675) J,TOKU,T2,CPHOR
SM=SML
IF(SM.GE.SMSTOP) GO TO 999
SM=SMDEL +SM
GO TO 9999
999 CONTINUE
IF(DNX) 10,10, 1
10 CONTINUE
STOP
END

```

I3,

```

SUBROUTINE TFR( FESD,H,AREA,XML,TMETN,EMET,DTA,XFLO)
COMMON /CALC/TM,EOLD,X1,SM,PREM,RRR,VOLM
COMMON /CALC2/T,R,V,VOL,XS,TIMEO
COMMON /CONST/SL,SF,SGP,HEATL,TCR,TFM,TC,TF,TCV
TWO REGION FOR FUEL
A=DTA/(SF*FESD)
TMETN=TIMEO-H*A*(TIMEO-TM)*AREA
EMET=SF*FESD*(TIMEO-TMETN)
IF(TIMEO.GT.TFM.AND.TMETN.GE.TFM) GO TO 300
IF(XML.EQ.1.0.AND.TMETN.LT.TFM) GO TO 300
XFLO=SF*(TFM-TMETN)/HEATL
XML=XML+XFLO
IF(XML.LE.1.0) GO TO 300
TMETN=TFM-(XML-1.0)*HEATL/SF
XML=1.0
300 CONTINUE
TIMEO=TMETN
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE XSCAL(XS,XS2,D,DV,DL)
IF(DL.GT.DV.AND.XS.LE.1.0) GO TO 530
XS=1.0
IF(D.GE.DL)XS=0.0
GO TO 540
530 CONTINUE
XS=(DL-D)/(DL-DV)
540 CONTINUE
IF(XS.GE.1.0) XS=1.0
IF(XS.LE.0.0) XS=0.0
XS2=XS
RETURN
END

```

```

FUNCTION SLFN(T,C)
COMMON /CONST/SL,SF,SGP,HEATL,TCR,TFM,TC,TF,TCV
A=(TCR-T)/(TCR-TCV)
B=AMAX1(A,0.0)
SLFN=SGP+(SL-SGP)*AMINI(1.0,B)
C=TCR
RETURN
END

```

```

FUNCTION ELOSSH(AMIX,RFUEL,TEMPMX,TEMPPW,DTAL,VEL)
ENERGY LOSS DUE TO HEAT TRZNSFER TO SURROUNDING SODIUM
HEAT FLUX FROM PARTICLE TO SODIUM QPSC
QPSC=0.675*(VEL*0.7*0.15*0.9/RFUEL*0.5)**0.5*(TEMPMX-TEMPPW)
FKOS=0.05/(1.33*3.14*RFUEL**3)
HALF OF FUEL COMMIT.
DTAU=DTAL
ELOSSH=QPSC*FKOS*DTAU*4.0*3.1416*RFUEL**2
RETURN
END

```

```

FUNCTION SPRE(TM)
TTC=2.303*(4.521-5220.0/TM)
SPRE=EXP(TTC)
RETURN
END

```

```

FUNCTION LATENT (B,TEM,TCR)
IF(TEM.GE.TCR) GO TO 10
AT=ABS(1.0-TEM/TCR)
SOLH=B*AT**1.23
LATENT=SOLH
RETURN
10 CONTINUE
LATENT=0.0
RETURN
END

```

```

FUNCTION SDEM(TEM,K)
COMMON /CONST/SL,SF,SGP,HEATL,TCR,TFM ,TC,TF
*,TCV
DATA A,B,C/-0.11E-06,0.093E-03,0.800/
SODIUM DENSITY CALCULATION
C K=1 LIQUID*1 K=2 LIQUID2 K=3 VAPOUR
IF(TEM.GT.TCR) GO TO 3
GO TO (1,2,3),K
1 CONTINUE
SDEM=1.018-2.34E-04*TEM
GO TO 10
2 SDEM=(A*TEM+B)*TEM+C
GO TO 10
3 SDEM=((20.0*TEM+2.0)*TEM+0.25)*TEM
10 CONTINUE
RETURN
END

```

```

SURROUTINE PREPJV
COMMON /PJVEL/EP(2,20) ,EPIN(2,20) , SIG(2,20) , SIGIN(2,20) ,
* G(20) , EPS(20) , VSEGO(20) , RO(20) , VSEGN(20) , DRSUM(20)
COMMON /PJVF2/W3,W4,APLUG,WTPLUG,RVESL,THICK,DELZ,HIGHT,BB,GG,POKG
*,FACTR, NLAST
COMMON/PJVE3/ IPLUG,IVESL ,IP
DATA PHI/ 3.1416/
ZVESL=1600.0
RVESL=400.0
POKG=1.033
GG=0.98
W4=0.0
TST=0.0
THICK=1.0
PZ=253.0
W3=8.44E+03
CM2KG=0.07031
1001 FORMAT (6E12.5)
NLAST=20
READ(5,1001) (SIGIN(2,NI) ,NI=1,NLAST)
READ(5,1001) (EPIN(1,NI) ,NI=1,NLAST)
READ(5,1001) (EPIN(2,NI) ,NI=1,NLAST)
READ(5,1001) (G(NI) ,NI=1,NLAST)
20 CONTINUE
APLUG=RVESL*RVESL*PHI
DELZ=ZVESL/FLOAT(NLAST)
RST=RVESL
BB=RVESL
WTPLUG=RVESL*RVESL*PHI* 250.0*7.0E-3
WTPLUG=WTPLUG*5.0
FACTR=1.0+(EST*RVESL)/(THICK*RST)
DO 102 NI=1,NLAST
SIG(2,NI)=SIGIN(2,NI)*CM2KG
EP(1,NI)=EPIN(1,NI)*CM2KG
EP(2,NI)=EPIN(2,NI)*CM2KG
102 CONTINUE
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE PJVE(IN,WPLUG,WVESL,T,WP,WV ,VPNEW
*)
COMMON /COND/PRE,PREA,VOL1,VOL2,DTA
COMMON /SOD/ DHA
COMMON /PJVEL/EP(2,20),EPIN(2,20), SIG(2,20), SIGIN(2,20),
* G(20), EPS(20), VSEGO(20), RO(20),VSEGN(20),DRSUM(20)
COMMON /PJVE2/W3,W4,APLUG,WTPLUG,RVESL,THICK,DELZ,HIGHT,BB,GG,POKG
*,FACTR, NLAST
COMMON/PJVE3/ IPLUG,IVESL ,IP
DIMENSION DR(20)
IK=2
WVESL=0.0
IN=IN+1
IF(IN.NE.1) GO TO 102
DO 101 NI=1,NLAST
DR(NI)=0.0
101 CONTINUE
T=0
102 CONTINUE
WPLUG=0.0
VOLCHA=0.0
IK=1
PHI=3.14159
IF(IPLUG.EQ.0) GO TO 1
PLUG JUMP
IF(IN-1) 103,103,104
103 CONTINUE
DELV=VOL2-VOL1
VELZ=DELV/(RVESL*RVFSL*PHI*DTA )
VPOLD=VELZ*DHA/7.0
104 CONTINUE
TOTWT=WTPLUG+APLUG*HIGHT*DHA
PKG=PRFA*1.033
VPNEW=(( (PKG-POKG)*APLUG-TOTWT)/TOTWT)*GG*DTA +VPOLD
DELH=(VPOLD+VPNEW)*0.5*DTA
WPLUG=PRE*APLUG*DELH*1.0E-07
WP=WP+WPLUG
HIGHT=HIGHT+DELH
VPOLD=VPNEW
1 CONTINUE
VESSEL EXPANSION
IF(IVESL.EQ.0) GO TO 2
DO 674 NI=1,NLAST
DELR=0.0
IF(IN-1) 11,11,112
112 IF(VSEGO(NI))146,146,11
11 IF(EPS(NI)-G(NI)) 12,13,13
12 L=1
GO TO 14
13 L=2
14 AK=DEL7*PHI*GG/(W3+W4)
P=PKG
PBR=P*(BB+PRSUM(NI))
SE=(SIG(L,NI)-EP(L,NI))*RVESL
ER=EP(L,NI)*RO(NI)
FRSE=FACTR*THICK/RVESL*(SE+ER)
ADD=AK*DTA*DTA*FACTR*EP(L,NI)*THICK/(2.0*RVESL)+1.0

```

Joules



```

      DELR=AK*DTA*DTA*(PBR-FTRSE+VSEGO(NI)*DTA)/ADD
      VSEGN(NI)=DELP/DTA
      IF(DEL $R$ ) 146,146,147
146  CONTINUE
      TF(NI.EQ.10)
      *WRITE(6,1146) DELR,AK,FTRSE,SE,ER,ADD      ,VSEGO(NI),VSEGN(NI),DTA
1146  FORMAT(1H ,9E12.4)
2146  DELR=0.0
      VSEGN(NI)=0.0
      GO TO 15
147  IF(VSEGN(NI)-VSEGO(NI))15,16,16
15   W4=0.0
      IF(NI-10) 16,151,16
151  IF(MJ) 152,152,16
152  VEL=VSEGO(10)
      MJ=1
16   CONTINUE
      DRSUM(NI)=DRSUM(NI)+DEL $R$ 
      DR(NI)=DEL $R$ 
      DVOL=(DEL $R$ *DEL $R$ +(2.0*RO(NI)*DEL $R$ ))*DEL $Z$ *PHI
      RO(NI)=RVESL+DRSUM(NI)
      VSEGO(NI)=VSEGN(NI)
      VOLCHA=VOLCHA+DVOL
163  EPS(NI)=(DPSUM(NI)-DEL $R$ *0.5)/RVESL
674  CONTINUE
      WVESL=PRE*VOLCHA*1.0E-07
      WV=WV+WVESL
C    P.J. AND V.E. OUTPUT
      IF(IN.EQ.1) GO TO 109
109 CONTINUE
      WRITE(6,2674) T,PREA, WP, WV, HIGHT, VPNEW,DTA
      NI=10
      IF(NI.EQ.10)
      *WRITE(6,2675) NI,RO(NI),EPS(NI),VSEGN(NI)      ,DR(NI),DRSUM(NI)
      I=I+IK
107 CONTINUE
2674  FORMAT(1H ,24HT*PREA*WP*WV*HIGHT*VPNEW/1H ,7(1PE12.5,5X) /1H
      * ,15HNI*RO*EPS*VSEGN      20H*DR*DRSUM
      )
2675  FORMAT(1H ,13,5X,5(1PE14.7,5X))
      PKG=VEL
      2 CONTINUE
      RETURN
      END

```

KARI

```

SUBROUTINE DATH(ISM)
DIMENSION AL(50),L(20),ALL(5),LL(5)
COMMON /CALC/EM,BOLD,XL,SM,PREM,RRR,VOLM
COMMON /CALC2/T,R,V,VOL,XS,THETO
COMMON /CONST/SL,SF,SGP,HEATL,TCR,TFM,TC,TF
*,TCV
COMMON /CVOL/ FUELS,DFUEL,PROI,FACTOR
COMMON /DRM/DRM1,DRM2,RM
COMMON /ENERGY/ ET,EFUEL,IEE
COMMON /FUKA/ RFUEL,TTI
COMMON /INCUT/ Z(50),TCFUEL,THAHM,COHEAT,AWCOOL,AWFUEL,VIN,VRATIO
COMMON/PJVF3/ IPLUG,IVBSL,IP
COMMON /OPTION/ IPI,IMJ,IYA,YAHA,SKOND,ISKOND,IDEUDO
*,FFT,ICH,IPRINT
COMMON /OPTL/VHALF,YILK,VOLUME,SMDEL,VOLSIN,IVOL
*,ICOHV,IFLOS
COMMON /PJVEL/EP(2,20),EPIN(2,20),SIG(2,20),SIGIN(2,20),
* G(20),EPS(20),VSEGO(20),RO(20),VSEGN(20),DRSUM(20)
COMMON /STRCON/ TSTOP,PRESTP,SMSTOP,VOLSTP,RSTOP,RSTOKU
COMMON /TIME/ TFFO,TFFO,TFTT,TTTT
COMMON /HETERO/ NB,CX
TF(1SL.E2.0) GO TO 42
5 CONTINUE
READ(5,1010) NOD,JUD,NOAD,(LL(N),N=1,5)
1010 FORMAT(2I1,I10,5I12)
IF(NOD) 20,20,10
10 IF(NOAD) 20,20,15
15 DO 16 N=1,NOD
NH=N+NOAD-1
L(NH)=LL(N)
16 CONTINUE
IF(JUD-1) 5,20,20
20 CONTINUE
READ(5,1020)NOD,JUD,NOAD,(ALL(N),N=1,5)
1020 FORMAT(2I1,I10,5F12.0)
IF(NOD) 40,40,30
30 IF(NOAD) 40,40,35
35 DO 36 N=1,NOD
NH=N+NOAD-1
AL(NH)=ALL(N)
36 CONTINUE
IF(JUD-1) 20,40,40
40 CONTINUE
IF=AL(1)
TC=AL(2)
TFM=AL(3)
HEATL=AL(4)
THAHM=AL(5)
COHEAT=AL(6)
TCFUEL=AL(9)
DFUEL=AL(10)
AWFUEL=AL(11)
AWCOOL=AL(12)
SF=AL(13)
SL=AL(14)
SGP=AL(15)
VRATIO=AL(16)

```

VIN=AL(17)  
 RFUEL=AL(18)  
 YAHA=AL(19)  
 VHALF=AL(20)  
 SKOND=AL(21)  
 YILK=AL(22)  
 V=AL(23)  
 SMDEL=AL(25)  
 SMSTOP=AL(26)  
 PRESTP=AL(29)  
 TSTOP=AL(30)  
 DEM1=AL(31)  
 DRM2=AL(32)  
 RM=AL(33)  
 VOLUME=AL(34)  
 TTI=AL(35)  
 FFF=AL(36)  
 TFFO=AL(37)  
 FFFO=AL(38)  
 TFFF=AL(39)  
 FFFF=AL(40)  
 EFUEL=AL(45)  
 TCV=AL(46)  
 CX=AL(47)\*1.OE+O3  
 IP=L(1)  
 IPI=L(2)  
 IMJ=L(3)  
 IYA=L(4)  
 ISKOND=L(5)  
 IPLUG=L(6)  
 IVESL=L(7)  
 ICONV=L(8)  
 IVOL=L(9)  
 IEN=L(10)  
 ICH=L(11)  
 IELOS=L(12)  
 NPO=L(13)  
 NBC=L(14)  
 IPRINT=L(15)  
 NB=NBC\*10\*\*NBO  
 SM=AL(24)  
 42 CONTINUE  
 TCR=AL(7)  
 PTOI=AL(28)  
 VOLSTP=AL(27)  
 ISM=0  
 RETURN  
 END

```

SUBROUTINE MIXTEM
COMMON /CONST/SL,SF,SGP,HEATL,TCR,TFM ,TC,TF
*,TCV
COMMON /CVOL/ FUELMS,DFUEL ,PTOI,FACTOR
COMMON /ENERGY/ ETT ,EFUEL, IEN
COMMON /CALC/TM,EOLD,X1 ,SM ,PREM,RRR,VOLM
C CALCULATION OF INITIAL MIXING TEMPERATURE
E1=SM*SL*TO+SF*TF+HEATL
IF(TF.LT.TFM) E1=SM*SL*TC+SF*TF
IF(IEN.EQ.1) E1=EFUEL+SM*SL*TC
EOLD=E1/(1.0+SM)
ETT=E1*FUELMS
E=E1
CPO=SGP*SM+SF
ELL=TCV*(SL*SM+SF)
E12=E11+CPO*(TCR-TCV)+(SL-SGP)*SM*TCR*(1.0-0.5*TCR)/(TCR-TCV)
E13=E12+CPO*(TFM-TCR)
E14=E13+HEATL
IF(E.LE.E14) GO TO 7771
TM=(E-E14)/CPO+TFM
X1=0.
GO TO 8000
7771 IF(E.LT.E13) GO TO 7772
TM=TFM
X1=(E14-E)/HEATL
GO TO 8000
7772 IF(E.LT.E12) GO TO 7773
TM=(E-E12)/CPO+TCR
X1=1.0
GO TO 8000
7773 IF(E.LT.E11) GO TO 7774
ETR=E-E11+TCV*CPO
ATC=(SL-SGP)*0.5*SM/(TCR-TCV)
BTC=CPO+(SL-SGP)*TCP/(TCR-TCV)*SM
TM=(BTC-SQRT(BTC*BTC-1.0*ATC*ETR))/(2.0*ATC)
X1=1.0
GO TO 8000
7774 TM=E/(SL*SM+SF)
X1=1.0
8000 CONTINUE
IF(TM.LT.TFM) X1=1.0
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE PRINT1
C PRINT OUT PROPERTY DATA
COMMON /INOUT/ Z(50), TCFUEL, TNAHM, COHEAT, AWCool, AWFUEL, VIN, VRATIO
COMMON /STPCON/ TSTOP, PRESTP, SMSTOP, VOLSTP, RSTOP, RSTOKU
COMMON /CVOL/ FUELMS, DFUEL, PTOI, FACTOR
COMMON /CALC/TM, EOLD, X1, SM, PREM, RRR, VOLM
COMMON /CONST/SL, SF, SGP, HEATL, TCR, TFM, TC, TF
*, TCV
C FOLLOWING DATA ARE PREINPUT DATA AND CONSTANTS
WRITE(6,7010) Z(1), Z(2), Z(10), TC, TF, TCR, TCFUEL, TNAHM, TFM, COHEAT,
*HEATL, SL, SF, SGP, AWCool, AWFUEL
7010 FORMAT(1H0, 30X, 9H*COOLANT*, 20X, 6H*FUEL*
*/1H, 30H**MATERIAL** 2A5, 20X, A5,
*/1H, 30H*INITIAL TEMPERATURE 2(F9.2, 18X)
*/1H, 30H*CRITICAL TEMPERATURE* 2(F9.2, 18X), 10X, 4H(K)
*/1H, 30H*MELTING TEMPERATURE 2(F9.2, 18X)
*/1H, 30HLATENT HEAT 2(F9.2, 18X), 5X, 4HJ/GF
*/1H, 30H*SPECIFIC HEAT* 2(F9.4, 18X), 5X, 4HJ/GF
*/1H, 30H*SPECIFIC HEAT (CONST. PES. F9.4, 45X, 5X, 4HJ/GF
*/1H, 30H*ATOMIC WEIGHT* 2(F9.2, 18X) ///)
IF(PRESTP.LE.PTOI) PRESTP=PTOI
7015 FORMAT(1H0, 20H**CORE CONDITION**
*/1H, 10X, 20H*CORE VOLUME (L) E15.6
*/1H, 10X, 20H*VOLUME RATIO F9.5
*/1H, 10X, 20H*FUEL DENSITY (G/CC) F9.5 ///)
WRITE(6,7015) VIN, VRATIO, DFUEL
WRITE(6,7020) TSTOP, PRESTP, PTOI, SMSTOP
7020 FORMAT(1H0, 10X, 80H**CALCULATION IS FINISHED WHEN FOLLOWING QUANTIT
*ITIES ARE EXCEEDED **
*/1H, 15X, 18H*TEMPERATURE (K) F9.2
*/1H, 15X, 18H*PRESSURE (ATM) E15.6, 5X, 2HOR, 5X, E15.6
*/1H, 15X, 18H*MIXING RATIO F9.4 ///)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE PRINT2
COMMON /STPCON/ TSTOP,PRESTP ,SMSTOP,VOLSTP,RSTOP,RSTOKU
COMMON /CVOL/ FUELMS,DFUEL ,PTOI,FACTOR
COMMON /CALC/IM,EOLD,X1 ,SM ,PREM,RRR,VOLM
COMMON /CALC2/T,R,V,VOL,XS,IMETO
COMMON /CONST/SL,SF,SGP,HEATL,TCR,TFM ,TC,TF
*,TCV
COMMON /COND/PRE,PREA,VOL1,VOL2,DTA
COMMON /INOUT/ Z(50),TCFUEL,INAHM,COHEAT,AWCOOL,AWFUEL,VIN,VRATIO
COMMON/PJVF3/ IPLUG,IVESL ,IP
COMMON /OPTION/ IPI,IMJ,IYA,YAHA,SKOND,ISKOND,IDENDO
*, FFT ,ICH,IPRJNT
COMMON /ENERGY/ EIT ,EFUEL,IEN
COMMON /HETERC/ NB,CX
COMMON /OPT1/VHALF, YILK,VOLUME ,SMDEL ,VOLSIN,IVOL,ICONV
*,IELOS
COMMON /IPPPPP/TPRE,VNA
DATA PHI/3.1416/
AA=1.0/3.0
WRITE(6,8999) SM ,NB,CX ,ICH,IPRINT
8999 FORMAT(1H1, 13HMIXING RATIO= ,F5.3
*/1H ,25HNUMBER OF BUBBLES = I8
*/1H ,25HINITIAL SODIUM VOLUME = 1PEL2.4,4H(CC)
*/1H ,14H*C TTI CHANGE* , I3, 12H(O*NO,1*YES)
*/1H ,16H*PRINT INTERVAL=,I3)
WRITE(6,8997) IPI,IMJ,IYA,YAHA
*,IPLUG,IVESL ,ICONV
IDENDO=0
IF(IYA.EQ.1) IDENDO=1
8997 FORMAT(1H , 30H**INPUT CONDITION**
*/1H ,5X,4HIMI=,I2,40HUO2-VAPOUR PRESSURE
*/1H ,5X,4HIMJ=,I2, 2X,40H(MIXING RATIO CHANGE*YES=0*NO=1*)
*/1H , 10X,4HIIYA=,I2,10X,40H(HEAT CONDUCTION**YES=1**NO=0**)
*
*/1H ,5X,19HELOSS COEFFICIENT= F10.5
*/1H , 5X,6HIPLUG=,I2,25H(PLUG JUMP**YES=1*NO=0**) /
*1H ,5X,6HIVESL=,I2,35H(VESSEL EXPANSION**YES=1*NO=0**)
*/ 1H ,30H**NUSSELT NUMBER,CALCULATION** ,I3
*//)
WRITE(6,7040) SKOND
7040 FORMAT(1H ,5X,7HSKOND= ,F6.3 //)
WRITE(6,7049) TF,TC
7049 FORMAT(1H ,30H*INITIAL TEMPERATURE*
*5HFUEL= F6.1, 5X,7HSODIUM= ,F6.1 / )
WRITE(6,7050)
7050 FORMAT(1H0,13X, 50HVOLSTP**FUELMS****FACTOR*****RSIP*
*
WRITE(6,9099) VOLSTP,FUELMS,FACTOR ,RSTOKU
9099 FORMAT(1H ,4(2X,E15.6)/)
WRITE(6,9100)
WRITE(6,9101)
9100 FORMAT(1H ,20H*STARTING POINT****/)
9101 FORMAT(1H ,10X, 11HTEMPERATURE,10X,8HPRESSURE,10X,6HVOLUME, 8X,
*11HINITIAL RAD )

```

```

9102 FORMAT(1H ,10X,F12.3,3(4X,E15.6) )
PREM=SPRE(TM)
PREA=PREM
D=0.0
IF(VNA.GT.0.0) D=SM*FUELMS/VNA
IF(IPI.NE.3) GO TO 100
EX=TM*SF+(1.0-X1)*HEATL
EX=EX/4.2E+03*AWFUEL
100 CONTINUE
TEM=TM
PT=PREA/TEM
DV=SDEN(PT,3)
DL=DV
IF(TEM.LT.TCR) DL=SDEN(TEM,2)
CALL PRESC(X1,TEM,EX,SH,PREA,D,DV,DL,VOLM,FUELMS,J,IAM)
PREM=PREA
PRE=PREA*1.013E06
RRR=(VOLM*0.75/PHI)**AA
WRITE(6,9102) TM,PREM,VOLM, RRR
WRITE(6,6166)YILK
6166 FORMAT(1H ,10H**ILK= ,F8.3,15H NONLEAK RATIO )
WRITE(6,2910) V ,VHALF
2910 FORMAT(1H ,20H *INITIAL VELOCITY* ,1PE12.4 ,20X
* ,30H*VELOCITY DECAY CONSTANT* ,1PE12.4 )
WRITE(6,2804)
2804 FORMAT(1H ,50H*TR*PREA*V*VOL*TM*WORK*EDENF*XS*X1*D*DL*DV
*/1H ,50HSM*SMNEW*DSM*E1*EN*EF*DEVAP*RLARGE*VELARG*TTI )
WRITE(6,7030)
7030 FORMAT(1H ,50H*SEC*CM*ATM*CM/SEC*CC*J/G-FUEL*
* ///)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE PRINT3(J,I)
COMMON /CVOL/ FUELMS,DFUEL ,PTOI,FACTOR
COMMON /COND/PRE,PREA,VOL1,VOL2,DTA
COMMON /STFCON/ TSTOP,PRESTP ,SMSTOP,VOLSTP,RSTOP,RSTOKU
COMMON /CALC/TM,EOLD,X1 ,SM ,PREM,RRR,VOLM
COMMON /CALC2/T,R,V,VOL,XS,TMETO
COMMON /ENERGY/ ENT ,PFUEL ,IEN
COMMON/ENERG2/DSMSUM,EADDED,ENSUM,VAPSUM,ELOSUM, ELT,WORK,WV,WP
*,
EDESUM
COMMON/VO/ VOLINM
DATA PHI/3.1416/
DSMSUM=DSMSUM*FUELMS
EADDED=PADDED*FUELMS
ENSUM=ENSUM*FUELMS
ENT=ENSUM
VARSUM=VAPSUM*FUELMS
VNA=VOL2-X1*FUELMS*DFINV
ELOSHT=ELOSUM*FUELMS
WRITE(6,5051) T,R,BREA,V,VOL,TM ,ELT,ENT
WRITE(6,5052) ELOSHT,WORK,EDESUM,VNA,XS,X1
5051 FORMAT(1H0,///1H ,3OH**THE FINAL STATE **
*/1H ,1OX,3OHTIME(SEC) E12.4 ,
*2OX,2OH RADIUS (CM) E12.4
*/1H ,1OX,2OHPRESSURE (ATM) E12.4 ,
*2OX,2OH VELOCITY (CM/SEC) E12.4 ,
*/1H ,1OX,2OHVOLUME(CC) E12.4 ,
*2OX,2OH TEMPERATURE (K) E12.4
*/1H ,1OX,2OHINTERNAL ENERGY(J) E12.4 ,
*2OX,2OH ENERGY CHANGE (J) E12.4 )
5052 FORMAT(1H+,
*/1H ,1OX,2OHLLEAK ENERGY (J) E12.4 ,
*2OX,2OH WORK (J) E12.4
*/1H ,1OX,2OHHEAT CONDUCTION E12.4,
*
1OX,2OHSODIUM NET VOLUME E12.4
*/1H ,1OX,2OHSODIUM VAPOUR E10.6 ,
*2OX,2OH CHECK E12.4 //)
WRITE(6,5050) DSMSUM, EADDED,ENSUM ,VAPSUM ,EIT
5050 FORMAT(1H , 5X,7HDSMSUM= ,E12.4,5X
*7HEADSD= E12.4,5X,6HENSUM= E12.4 ,5X,7HVAPSUM= E12.4
*/1H ,3OHINITIAL INTERNAL ENERGY 1OX,E12.4
*/)
WRITE(6,2010) T,R,PREA,V,VOL,TM,TMETO,WORK,XS,X1
VCLS=4.0*PHI*RSTOP*RSTOP*RSTOP/3.0
WRITE(6,5055) RSTOP,VOLS
5055 FORMAT(1H ,5X,5HRSTOP ,2X,F12.4,1OX,5HVOLS ,2X,E12.4 )
7000 FORMAT(1H ,2I20 )
WRITE(6,7000) J,I
2010 FORMAT(1H ,8(1PE11.3), 2F5.2 )
RETURN
END

```



```

FUNCTION DENDO(TFILM,SLF,V,RAD,ICONV,ACONV,TEM,I,II)
COMMON /CONST/SL,SF,SGP,HEATL,TCR,TFM ,TC,TF
*,TCV
SOK=0.488
IF(ICONV) 20,1,2
1 DENDO=SOK/RAD
GO TO 3
2 CONTINUE
DFNA=SDEM(TFILM,2)
IF(TFILM.LE.TCR) GO TO 10
PT=SPRE(TFILM)/TFILM
DFNA=SDEM(PT,3)
10 CONTINUE
AK=SOK
PRREY=RAD*V*DFNA*SLF/AK
PCONV=FLOAT(ICONV)*0.1
ANU=2.0+0.5*(PRREY**BCONV)
IF(I.EO.10P.I.EO.II) WRITE(6,111)I,ANU
111 FORMAT(1H ,I10,E12.4,10X,7H*I*ANU )
DENDO=0.5*ANU*AK/RAD
3 CONTINUE
IF(I.GT.II) II=II+50
20 CONTINUE
FILM BOILING COEFFICIENT
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE PRESC(X,TEM,EX,SH,PREA,D,DV,DL,VOL,FUELMS,I,IAM)
COMMON /INCUT/ Z(50),TCFUEL,TNAHM,COHEAT,AWCOOL,AWFUEL,VIN,VRATIO
COMMON /OPTION/ TPI,IMJ,IYA,YAHA,SKOND,ISKOND,IDEUDO
*,FFT      ,ICH,IPRINT
X1=X
PNA=SPRE(TEM)
IF(D.LE.DV) PNA=PNA*D/DV
IF(D.GT.DL) PNA=PNA*D/DL
IF(X.GE.1.0) GO TO 20
GO TO (111,112,113),IPI
111 CONTINUE
PUO2=EXP(2.303*(-24000.0/TEM+8.00))
GO TO 114
112 CONTINUE
PUO2=EXP(2.303*(-24000.0/TEM+7.00))
GO TO 114
113 CONTINUE
UMOL=FUELMS*(1.0-X1)/AWFUEL
VC=UMOL*88.64
VR=(VOL-X1*FUELMS*0.1)/VC
IF(VR-0.499) 30,31,31
30 CONTINUE
Y=(1400.0*VR-1390.0)*VR+332.0
GO TO 32
31 CONTINUE
Y=8.33*(VR-1.6)
32 CONTINUE
PUO2=(EX-150.0)*128.0/(VR*VR)+Y*1666.6
114 CONTINUE
OKU=AWCOOL*(1.0-X)+AWFUEL*SM
OKUINV=1.0/OKU
FMOL=AWCOOL*(1.0-X)*OKUINV
CMOL=AWFUEL*SM*OKUINV
PREA=AMAX1(PNA,PUO2)
GO TO 50
20 CONTINUE
PREA=PNA
50 CONTINUE
IF(IAM.NE.I ) GO TO 1111
WRITE(6,600) TEM,EX,PNA,PUO2,PREA,X,FMOL,CMOL
IAM=IAM+10
1111 CONTINUE
IF(I.EQ.15) IAM=20
IF(I.LE.10)WRITE(6,600) TEM,EX,PNA,PUO2,PREA,X,FMOL,CMOL
600 FORMAT(1H ,1P8E11.3,32HTEM*EX*PNA*PUO2*PREA*X*FMOL*CMOL
*)
IF(PUO2.LE.0.0) PREA=PNA
RETURN
END

```

```

FUNCTION TAU( RO,P,PO,DR,R2O,R2,RHOL,VEL,RSTOP)
COMMON /IMAIT/ IRSTOP
IF(RO+DR.LE.RSTOP) GO TO 2
DR=RSTOP-RO
IPSTOP=0
2 CONTINUE
RNEW=RO
DRINV=1.0/DR
RINV=1.5/RNEW
A=DRINV+RINV
B=DRINV-RINV
R2O=R2
RHN=RHOL*RNEW
R2=(B*R2O*RHN+2.0*(P-PO))/(A*RHN)
RO=RO+DR
IF(R2.GT.0.) GO TO 1
WRITE(6,1001) RO,P,PO,R2O,R2
1001 FORMAT(1H0, 51HVELOCITY**2 IS NEGATIVE UNDER RO,P,PO,R2O,R2
*EQUAL, 5E13.4 )
TAU=0.
RETURN
1 VEL=SQRT(R2)
TAU=DR/VEL
IF(RO.LT.RSTOP)RETURN
DR=RSTOP-RNEW
RO=RSTOP
TAU=DR/VEL
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE PEAK(J,T,TEM,PREA,D,DV,DL)
J1=J-1
J2=J-2
PINV=(PREA2-PREAL)*(PREAL-PREA)
IF(J.GT.3.AND.RINV.LT.0.0) WRITE(6,2800) J2,TVO,TEMVO,PREA2,D2,DVVO,
*0,DLVO,J1,TO,TEMO,PREAL,D1,DVO,DLO,J,T,TEM,PREA,D,DV,DL
2800 FORMAT(1H ,80H*PRESSURE INVERSION**(J*T*TEM*PREA*D*DV*DL*)
*/3(1H ,I4, 6E12.4/) )
DLVO=DLO
DLO=DL
D2=D1
D1=D
DVVO=DVO
DVO=DV
TVO=TO
TO=T
TEMVO=TEMO
TEMO=TEM
PREA2=PREAL
PREAL=PREA
RETURN
END

```