

JAERI-M
8520

BWRの中小破断事故時の解析コード:JPLEAK

1979年10月

横林 正雄・江連 秀夫・岸 昭正*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

BWRの中小破断事故時の解析コード：JPLEAK

日本原子力研究所東海研究所動力試験炉部

横林 正雄・江連 秀夫・岸 昭正*

(1979年10月1日受理)

本報告書は、BWRの中小破断事故時の解析モデルの組立てと、それをJPDR-IIに適用し、原子炉圧力、炉心シュラウド内水位等のブローダウン現象を正しく評価するために開発されたコードJPLEAKについて述べたものである。

解析モデルの特徴は、1) 原子炉内を初期状態で5領域に分割し、過渡現象の進行に伴い冷却材の状態に応じて9つの解析モデルを考慮している。2) 気泡の離脱速度にはウィルソンの相関を用いており、これによりポイド率を評価し、水位計算を行っていることである。

JPDR-IIへの適用に当たっては、中小破断ではブローダウン現象が比較的長く継続し、運転条件の影響が大きいため安全系統と制御系統の正確な模擬および格納容器内圧の正しい評価に重点がおかれている。

また、大破断事故時の解析への応用として再循環パイプ両端破断のモデルを取り入れることを試みている。なお、このコードは破断以外の極めて大幅な変動を伴う動特性解析にも適している。

JAERI-M 8520

Computer Code JPLEAK for BWR LOCA with Smaller Breaks

Masao YOKOBAYASHI , Hideo EZURE and Akimasa KISHI^{*}

Division of JPDR , Tokai Reserch Establishment , JAERI

(Received October 1, 1979)

This report describes an analytical model of BWR LOCA with smaller breaks and then the digital code JPLEAK for application of the JPDR-II BWR plant. The code evaluates blowdown phenomena in the reactor primary system such as reactor pressure and water level inside the shroud.

In the initial phase, the reactor is divided in five regions. In the course of transient behavior, nine analytical models are available combining phenomena in respective regions. Wilson's correlation is used for bubble rise velocity and the void fraction and water level are calculated accordingly.

In application of the model to the JPDR-II plant, it is important to simulate exactly the safety and control systems and the pressure inside the containment vessel. It is because long-term transient phenomena such as in smaller breaks are influenced by operating conditions and signal actuation of the safety systems.

An attempt is made in the code to model a gillotine break of the recirculation pipe as a large break. The code will also be usable for analysis of very large transient behaviors other than in the above breaks.

Keywords: JPLEAK Code, BWR, LOCA, Smaller Breaks, JPDR-II Reactor,
Blowdown, Transient Analysis, Reactor Pressure, Water Level

* Tohoku Electric Power Co.

目 次

1. 緒 言	1
2. 解析モデル	3
2.1 核熱出力特性	3
2.1.1 中性子動特性	3
2.1.2 崩壊熱	3
2.1.3 燃料温度	4
2.2 熱水力特性	5
2.2.1 各型による熱水力特性	5
2.2.2 セパレータを通過する流量	14
2.2.3 再循環流量	17
2.2.4 ダウンカマ水位の計算	17
2.3 数値解法	17
3. JPDR-IIへの適用	27
3.1 安全システムの模擬	27
3.2 格納容器内圧の計算	28
3.3 炉心平均ボイド率の計算	29
3.4 中小破断時の計算例	30
3.5 感度解析	31
3.6 原子炉圧力と放出流量の関係	32
3.7 大破断解析への応用	33
4. コード使用法	56
5. 検討および結論	62
謝 辞	63
参考文献	63
記号表	64
付 録	67

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Analysis Model	3
2.1 Nuclear - Thermodynamics	3
2.1.1 Neutron Kinetics	3
2.1.2 Decay Heat	3
2.1.3 Fuel Temperature	4
2.2 Thermo - Hydrodynamics	5
2.2.1 Thermo - Hydrodynamics of Each Type Model	5
2.2.2 Flow Through Separator	14
2.2.3 Recirculation Flow Dynamics	17
2.2.4 Calculation of Water Level at Downcomer	17
2.3 Numerical Solution	17
3. Application for JPDR-II	27
3.1 Simulation of Safety System	27
3.2 Calculation of Pressure in Containment Vessel	28
3.3 Calculation of Core Average Void Fraction	29
3.4 Calculation of Smaller Breaks	30
3.5 Sensitivity Analysis	31
3.6 Relation Between Reactor Pressure and Discharged Mass	32
3.7 Application for Large Break Analysis	33
4. Instruction for User	56
5. Discussion and Conclusion	62
Acknowledgment	63
References	63
Nomenclature	64
Appendix	67

1. 緒 言

軽水沸騰水型原子炉の一次系圧力バウンダリ破損による冷却材ブローダウン現象は破断口の大きさ、特に再循環パイプの両端破断（大破断）と小径口パイプの破断（中小破断）とでは原子炉圧力、水位等の挙動に著しい差異がある。大破断時には、極めて短時間で原子炉圧力と格納容器内圧とがほぼ平衡に達するのに対し、中小破断は現象が比較的ゆるやかで、そのような状態に達するまでに長時間を要する。また熱的には、大破断時には燃料棒内に蓄積されている運転時の出力が放出される以前に燃料が水面から露出するため燃料ペレット、被覆管温度の上昇が大きくなるのに対し、中小破断時には露出するまでに放出され、露出後は崩壊熱のみが問題となる。従ってこれらの現象解析には評価モデルが異ってくる。大破断と中小破断の発生確率からみれば後者は前者の比ではなく極めて重要であり、中小破断事故時のブローダウン現象の特徴を十分に把握しておく必要がある。

Fig. 1.1 に破断事故時の解析、評価の流れにおける中小破断解析コードの位置づけを示す。これから明らかなようにブローダウン解析コードは炉心ヒートアップ解析のための入力値を計算することが主要な目的である。その主なパラメータは原子炉圧力、炉心シュラウド内水位等およびこれらの変動による各種安全システムの作動開始時刻等である。

このような目的に利用できる計算コードとして JPLEAK が開発された。このコードの主な特徴は

1. 核熱出力特性では中性子動特性方程式、崩壊熱では ANS の標準式を用いている。燃料棒は軸方向の出力分布を考慮した一次元で取扱っている。また発熱はすべて燃料棒内としている。
 2. 熱水力的には圧力容器内で初期状態において 5 領域に分割し、過渡現象の進行に伴い各領域の冷却材の状態（飽和、未飽和）に応じて 9 種類の解析モデルを想定している。また圧力は炉内で一様であるとしている。
 3. ボイド率の評価に関しては Wilson の相関⁽⁵⁾による気泡離脱速度を用いている。
 4. 構造材および圧力容器の熱容量も取扱っている。
 5. JPDR (Japan Power Demonstration Reactor) への適用に当っては安全システムの模擬（単一故障機能も含む）・制御系の模擬および格納容器内圧の評価も行っている。
 6. 破断事故以外の極めて大幅な変動を伴う過渡現象の解析にも適している。また大破断解析への応用として再循環パイプ両端破断モデルを取り入れることを試みている。
- なお解析モデルの作成に当っては文献(1)を参照している。

本報告書の構成は第 2 章で解析モデルの核熱水力特性およびその数値解法について、第 3 章では JPDR-II に適用した場合についての計算例、感度解析、大破断解析への応用について、第 4 章ではコード使用法について、第 5 章ではこれらについての検討、結論をのべている。また 3.6 節では破断時の冷却材放出量と原子炉圧力の定量的な関係についても言及している。

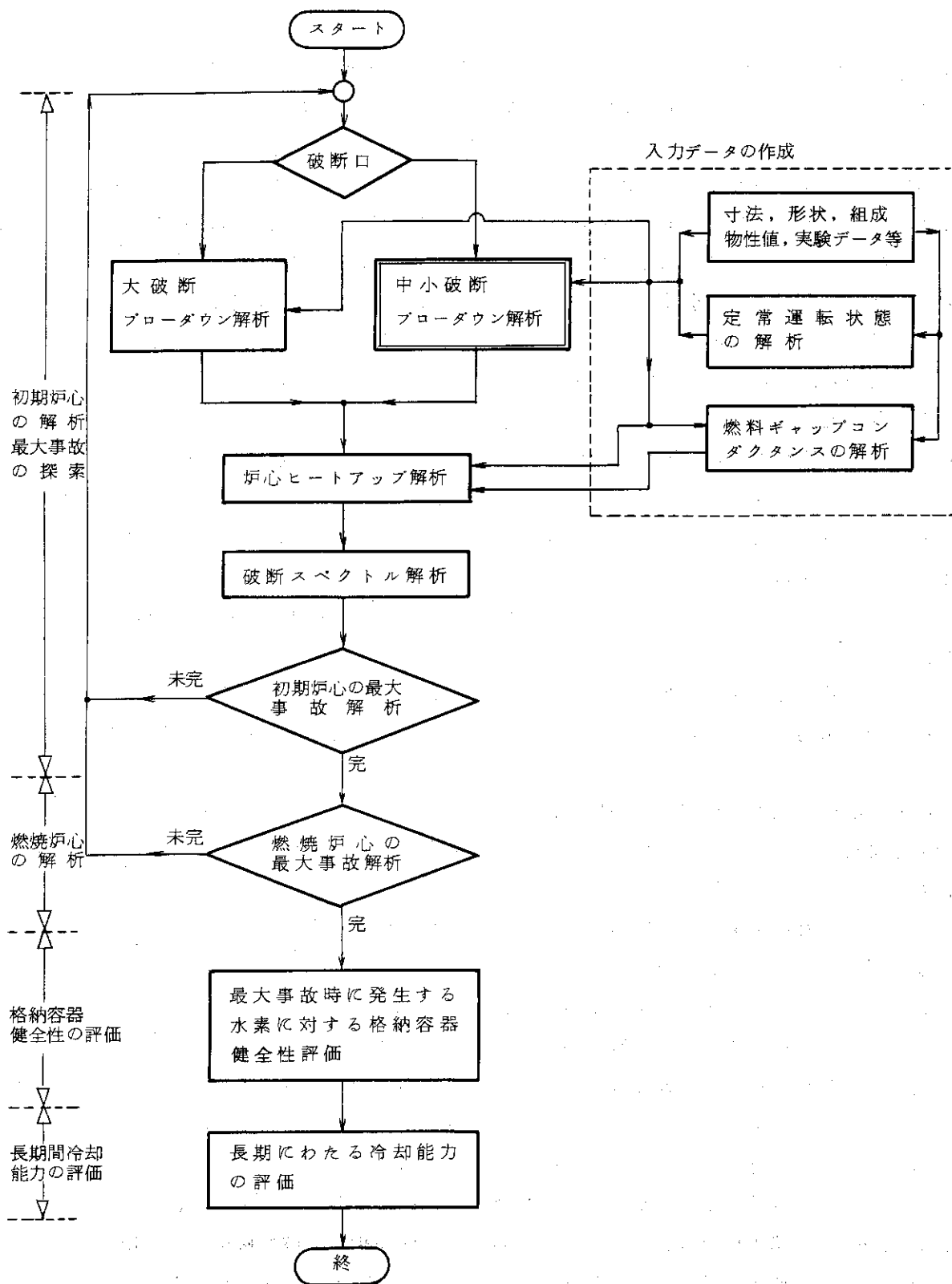


Fig. 1.1 破断解析・評価の流れと中小破断解析コードの位置づけ

2. 解析モデル

2.1 核熱出力特性

2.1.1 中性子動特性

中性子動特性方程式は次式で与えられる。

$$\frac{d}{dt}N = \frac{\rho - \beta}{\ell} N + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i \quad (2.1.1)$$

$$\frac{d}{dt}c_i = \frac{\beta_i}{\ell} N - \lambda_i c_i \quad (i=1, 6) \quad (2.1.2)$$

記号の説明は巻末に付されている。

中小破断時には圧力降下によって発生したボイドによる反応度の効果が大きいいため反応度としてはボイド反応度 ρ_a とスクラムによる制御棒挿入反応度 ρ_{sc} のみを考慮する。

$$\rho = \rho_a + \rho_{sc} \quad (2.1.3)$$

2.1.2 崩壊熱

崩壊熱 (D. H) はANS式により初期出力に対し規格化して

$$D.H = A t_s^{-a} \quad (t_s \text{ は原子炉停止後の時間}) \quad (2.1.4)$$

ここに A, a は t_s をパラメータとして下記のように決定されている。

$1.0 \times 10^{-1} \leq t_s < 1.0 \times 10^1$	$A = 0.0603$	$a = 0.0639$
$1.0 \times 10^1 \leq t_s < 1.5 \times 10^2$	$= 0.0766$	$= 0.1807$
$1.5 \times 10^2 \leq t_s < 4.6 \times 10^6$	$= 0.1301$	$= 0.2834$
$4.6 \times 10^6 \leq t_s < 2.0 \times 10^8$	$= 0.2659$	$= 0.3350$

この関係を次式で近似する。

$$N_D = \left(\frac{A_1}{1 + \tau_1 s} + \frac{A_2}{1 + \tau_2 s} + \frac{A_3}{1 + \tau_3 s} \right) A_0 \quad (2.1.5)$$

$$A_0 = 0.065$$

$$A_1 = 0.204 \quad \tau_1 = 15$$

$$A_2 = 0.216 \quad \tau_2 = 40$$

$$A_3 = 0.580 \quad \tau_3 = 1100$$

s はラプラス演算子

定常時の燃料棒における崩壊熱による発熱量を N_{D0} とすれば全発熱量 Q_f は

$$Q_f = a \{ (1 - N_{D0}) N + N_D N_0 \} \quad (2.1.6)$$

となる。 N_0 は N の初期値, a は定数である。

2.1.3 燃料温度

燃料ペレットを半径方向に i_{MAX} 等分し、ギャップの熱容量を無視し、被覆管を半径方向に一領域とすれば熱バランス式は次のようになる。

$$V_{fi} C_{pfi} \rho_{fi} \frac{\partial T_{fi}}{\partial t} = A_{fi-1 \cdot i} H_{fi-1 \cdot i} (T_{fi-1} - T_{fi}) - A_{fi \cdot i+1} H_{fi \cdot i+1} (T_{fi} - T_{fi+1}) + Q_{fi} \quad (2.1.7)$$

$$V_c C_{pc} \rho_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = A_{fc} H_{fc} (T_{fiMAX} - T_c) - A_{cw} H_{cw} (T_c - T_w) \quad (2.1.8)$$

軸方向には j_{MAX} 等分し、軸方向の熱伝導を無視すればこれらの式を各ノードにくり返して用いることができる。

燃料ペレット内の熱伝達係数は分割した隣接領域の体積を重みとして熱伝導度 k_f を平均し、

$$H_{fi-1 \cdot i} = \frac{V_{fi-1} k_f (T_{fi-1}) + V_{fi} k_f (T_{fi})}{\Delta r_f (V_{fi-1} + V_{fi})} \quad (2.1.9)$$

燃料から被覆管への熱伝達係数は次式から求める。

$$\frac{1}{H_{fc}} = \frac{\Delta r_f}{2 k_f (T_{fiMAX})} + \frac{1}{H_g} + \frac{\Delta r_c}{2 k_c (T_c)} \quad (2.1.10)$$

H_g はヘリウムギャップの熱伝達係数であり、 UO_2 ペレットとジルカロイ-2被覆管⁽³⁾の熱伝導度は次式を用いる。

$$k_f = \frac{3290}{T+402} + 4.12 \times 10^{-11} (T+273.15)^3 \quad (\text{Kcal/m hr } ^\circ\text{C})$$

$$k_c = 0.010962T + 1.05462 \quad (\quad " \quad)$$

燃料と被覆管の比熱⁽³⁾にはそれぞれ次式を用いる。

$$C_{pf} = 0.8123 \times 10^{-8} T^2 - 0.9556 \times 10^{-6} T + 0.0657 \quad (\text{Kcal/kg } ^\circ\text{C})$$

$$C_{pc} = 0.25 \times 10^{-3} T + 0.07 \quad (\quad " \quad)$$

線膨張率⁽⁴⁾はおのおの次の値を用いる。

$$UO_2 \text{ ペレット} \cdots \cdots 1.052 \times 10^{-5} \quad (1/^\circ\text{C})$$

$$\text{ジルカロイ-2} \cdots \cdots 3.162 \times 10^{-9} T + 5.62 \times 10^{-6} \quad (\quad " \quad)$$

燃料表面熱伝達係数 H_w は Jens-Lottes の核沸騰強制対流熱伝達の式⁽⁴⁾を用いて変形すれば次式となる。

$$H_w = \frac{1}{0.82} q^{\frac{3}{4}} \exp(p/63) \quad (2.1.11)$$

表面熱流束 q は被覆管表面温度と平均温度との定常状態における関係式を用いて表わすと。

$$q = (T_c - T_w) H_{cw} \quad (2.1.12)$$

$$\frac{1}{H_{cw}} = \left(\frac{1}{r_{c0} H_w} + \frac{1}{k_c (T_c)} \ln \frac{r_{c0}}{r_c} \right) r_{c0} \quad (2.1.13)$$

H_{cw} は被覆管から冷却材への実効的な熱伝達係数であり、 r_{c0} は被覆管外側半径、 r_c は被覆管中心までの半径である。なお燃料が露出した場合は熱伝達はないものとして計算している。

2.2 熱水力特性

定常状態における原子炉内の各領域は Fig. 2.1 に示すように 5 領域に分割する。即ち 1 : ドーム部, 2 : 炉心及びライザ (上部プレナム), 3 : セパレータ及びベッセル飽和水領域 (ダウンカマ部給水スパーチャ-上部), 4 : ダウンカマ (給水スパーチャ-下部), 5 : 下部プレナムの 5 領域である。循環パイプは位置を考慮して領域 4 又は 5 に含める。これらの領域はブローダウン現象が進行すれば飽和, 未飽和および体積の増減などの変化が表われるため Fig. 2.2 に示すように 9 種類の状態を想定している。領域の数が減少しているのは例えば STEP-1 から STEP-2 へ移行する場合領域 4 が飽和になれば領域 3 に合体させる方式を採っていることによる。初期定常状態は STEP-1 に含まれる。なおシュラウド内側の自由水面の高さは冷却材放出量, ボイド量, 再循環ポンプ揚程の有無によって変動し Fig. 2.2 に示したのは 1 つの例である。以下各 STEP について述べる。

2.2.1 各型による熱水力特性

(1) STEP-1

飽和領域 1, 2, 3 について質量, 体積, エネルギーの各保存側を用いてまとめると次式をうる。

$$D_{123} \frac{dp}{dt} = \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \{ v_{fi} W_{fi} + v_f W_{FCS} - v_g (W_S + W_{SRF} + W_{SSV} + W_{B1} + W_{EC}) - v_D W_D - v_{3av} W_{B3} - v_{2av} W_{B2} \} - \Delta h_{fi} W_{fi} - \Delta h_{FCS} W_{FCS} + \Delta h_D W_D + Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2.2.1)$$

ここで,

$$D_{123} = \left(\frac{\partial h_f}{\partial p} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_f}{\partial p} \right) M_f + \left(\frac{\partial h_g}{\partial p} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_g}{\partial p} \right) M_g - \frac{V_{sat}}{J} \quad (2.2.2)$$

$$M_f = M_{f2} + M_{f3} \quad (2.2.3)$$

$$M_g = M_{g1} + M_{g2} + M_{g3} \quad (2.2.4)$$

$$V_{sat} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (2.2.5)$$

$$\Delta h_{fi} = h_f - h_{s5} \quad : W_{fi} > 0 \quad (2.2.6)$$

$$= 0 \quad : W_{fi} \leq 0$$

$$\Delta h_{FCS} = h_f - h_{FCS} \quad (2.2.7)$$

$$\Delta h_D = h_f - h_{s4} \quad : W_D < 0 \quad (2.2.8)$$

$$= 0 \quad : W_D \geq 0$$

$$v_{fi} = v_f \quad : W_{fi} > 0 \quad (2.2.9)$$

$$\begin{aligned} v_{fi} = v_{2av} & : W_{fi} \leq 0 \\ v_D = v_f & : W_D < 0 \\ & = v_{3av} : W_D \geq 0 \end{aligned} \quad (2.2.10)$$

なお、流量の符号は通常運転時に流れている方向を正としている。各領域の蒸気、水の質量保存則は次式となる。

$$\frac{d}{dt} M_{g2} = \dot{M}_{fg2} - W_{gspil} - W_{gsw2} - X_2 W_{B2} + W_{gsip} \quad (2.2.11)$$

$$\frac{d}{dt} M_{f2} = -\dot{M}_{fg2} - W_{fspil} + W_{fi} - (1 - X_2) W_{B2} + W_{FCS} + W_{fsip} \quad (2.2.12)$$

$$\frac{d}{dt} M_{g3} = \dot{M}_{fg3} + \frac{X_{cu}}{1 - X_{cu}} W_{fspil} - W_{gsip} - W_{gsw3} - X_3 W_{B3} \quad (2.2.13)$$

$$\frac{d}{dt} M_{f3} = -\dot{M}_{fg3} + W_{fspil} - W_D - W_{fsip} - (1 - X_3) W_{B3} \quad (2.2.14)$$

ここで X_{cu} はキャリーアンダであり、各領域のクオリティ X_2 , X_3 は次式で表わす。

$$X_2 = \frac{M_{g2}}{M_{g2} + M_{f2}} \quad (2.2.15)$$

$$X_3 = \frac{M_{g3}}{M_{g3} + M_{f3}} \quad (2.2.16)$$

各領域の平均のポイド率 α_2 , α_3 は

$$\alpha_2 = \frac{M_{g2} v_g}{M_{g2} v_g + M_{f2} v_f} \quad (2.2.17)$$

$$\alpha_3 = \frac{M_{g3} v_g}{M_{g3} v_g + M_{f3} v_f} \quad (2.2.18)$$

平均の比容積 v_{2av} , v_{3av} は

$$v_{2av} = v_f + X_2 v_{fg} \quad (2.2.19)$$

$$v_{3av} = v_f + X_3 v_{fg} \quad (2.2.20)$$

\dot{M}_{fg2} , \dot{M}_{fg3} は各領域で圧力変化、吸発熱量変化によりフラッシング又は凝縮する流量で次式で表わす。

$$\dot{M}_{fg2} = -\frac{1}{h_{fg}} \left(-\frac{\partial h_f}{\partial P} M_{f2} + \frac{\partial h_g}{\partial P} M_{g2} - \frac{v_2}{J} \right) \frac{dP}{dt} + \frac{Q_2}{h_{fg}} \quad (2.2.21)$$

$$\dot{M}_{fg3} = -\frac{1}{h_{fg}} \left(-\frac{\partial h_f}{\partial P} M_{f3} + \frac{\partial h_g}{\partial P} M_{g3} - \frac{v_3}{J} \right) \frac{dP}{dt} + \frac{Q_3}{h_{fg}} \quad (2.2.22)$$

W_{gsw2} , W_{gsw3} は各領域から離脱する気泡の流量である。気泡の領域通過時間の $1/2$ を τ_2 , τ_3 とすれば

$$W_{gsw2} = \frac{M_{g2}}{\tau_2} \quad (2.2.23)$$

$$W_{gsw3} = \frac{M_{g3}}{\tau_3} \quad (2.2.24)$$

τ_2, τ_3 は領域の長さを L , 気泡速度を V_B , 流体速度を V_F とすれば

$$\tau_2 = \frac{L_2}{2(V_{B2} + V_{F2})} \quad (2.2.25)$$

$$\tau_3 = \frac{L_3}{2(V_{B3} - V_{F3})} \quad (2.2.26)$$

V_{B2}, V_{B3} は Wilson の相関⁽⁵⁾により次式から求める。

$$\begin{aligned} V_B &= \left(\frac{\alpha}{0.136 h(P) f(P)} \right)^{\frac{1}{1.78}} (H_D + (P)^{\frac{1}{0.19}} g)^{0.5} : \left(\frac{\alpha}{0.136 h(P) f(P)} \right)^{\frac{1}{1.78}} \leq 2.85 \\ &= \left(\frac{\alpha}{0.75 h(P) f(P)} \right)^{\frac{1}{0.78}} (H_D f(P)^{\frac{1}{0.19}} g)^{0.5} : \left(\frac{\alpha}{0.75 h(P) f(P)} \right)^{\frac{1}{0.78}} > 2.85 \end{aligned} \quad (2.2.27)$$

$$h(P) = \left(\frac{\rho_g}{\rho_f - \rho_g} \right)^{0.32} \quad (2.2.28)$$

$$f(P) = \left(\frac{1}{H_D} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_f - \rho_g}} \right)^{0.19} \quad (2.2.29)$$

$$\sigma = 1.24 \times 10^{-5} (668 - 1.8 T_{sat}) \quad (2.2.30)$$

W_{spil} および W_{sip} はそれぞれセパレータを通してシュラウドの外側および内側へ流れる流量である。詳細は 2.2.2 節でのべるが Fig. 2.4 に示すようにシュラウド内外の体積を W_{spil} , W_{sip} を用いずに計算した余剰体積から決まる流量である。このような考え方に基づいた領域 2, 3 の体積バランスは次式となる。なお W_{spil} の考え方については文献(1)を参照している。

$$\frac{dV'_2}{dt} = v_f W_{fi} - v_g W_{gsw2} + v_{fg} \dot{M}_{fg2} - v_{2av} W_{B2} + \left(\frac{\partial v_f}{\partial P} M_{f2} + \frac{\partial v_g}{\partial P} M_{g2} \right) \frac{dP}{dt} \quad (2.2.31)$$

$$\frac{dV'_3}{dt} = v_{fg} \dot{M}_{fg3} - v_g W_{gsw3} - v_{3av} (W_{B3} + W_D) + \left(\frac{\partial v_f}{\partial P} M_{f3} + \frac{\partial v_g}{\partial P} M_{g3} \right) \frac{dP}{dt} \quad (2.2.32)$$

これらを積分して求めた V'_2, V'_3 より W_{spil}, W_{sip} および V_2, V_3 を求める。領域 1 の体積 V_1 は未飽和領域の体積を一定として全体積 V_T から

$$V_1 = V_T - V_2 - V_3 - V_4 - V_5 \quad (2.2.33)$$

$$M_{g1} = \frac{V_1}{v_g} \quad (2.2.34)$$

領域 4 について質量, 体積, エネルギーの各保存則を用いると

$$\frac{d}{dt} M_{s4} = W_D - W_P - W_{B4} + W_F + W_{EF} + W_{E0} \quad (2.2.35)$$

$$\frac{dV_4}{dt} = v_{s4} \frac{dM_{s4}}{dt} + M_{s4} \left\{ \left(\frac{\partial v_s}{\partial h} \right)_P \frac{dh_{s4}}{dt} \right\} = 0 \quad (2.236)$$

$$\frac{d}{dt} (M_{s4} h_{s4}) - \frac{V_4}{J} \frac{dP}{dt} = h_D W_D - h_{s4} W_{B4} - h_P W_P + h_F W_F + h_{EF} W_{EF} + h_f W_{EC} + Q_4 \quad (2.237)$$

$$h_D = h_f + h_{fg} X_3 \quad : W_D > 0 \quad (2.238)$$

$$= h_{s4} \quad : W_D \leq 0$$

$$h_P = h_{s4} \quad : W_P > 0 \quad (2.239)$$

$$= h_{s5} \quad : W_P \leq 0$$

これらの式をまとめ W_D について解くと

$$W_D = \frac{1}{v_{s4} + (h_D - h_{s4}) \left(\frac{\partial v_s}{\partial h} \right)_P} \left[v_{s4} (W_P + W_{B4} - W_F - W_{EF} - W_{EC}) - \left\{ \frac{V_4}{J} \frac{dP}{dt} + W_F (h_P - h_{s4}) + W_{EF} (h_{EF} - h_{s4}) + W_{EC} (h_f - h_{s4}) - W_P (h_P - h_{s4}) + Q_4 \right\} \left(\frac{\partial v_s}{\partial h} \right)_P \right] \quad (2.240)$$

$\frac{dh_{s4}}{dt}$ について解くと

$$\frac{dh_{s4}}{dt} = \frac{1}{M_{s4}} \left\{ \frac{V_4}{J} \frac{dP}{dt} + W_D (h_D - h_{s4}) + W_F (h_P - h_{s4}) + W_{EF} (h_{EF} - h_{s4}) + W_{EC} (h_f - h_{s4}) - W_P (h_P - h_{s4}) + Q_4 \right\} \quad (2.241)$$

$v_{s4}, \left(\frac{\partial v_s}{\partial h} \right)_P$ は蒸気表 (2.3節参照) の h_{s4} から求める。 V_4 は一定としているので領域4の質量は $M_{s4} = V_4 / v_{s4}$ で求めることができる。

領域5について質量, 体積, エネルギー各保存則を用いてまとめ W_{fi} と $\frac{dh_{s5}}{dt}$ について解くと

$$W_{fi} = \frac{1}{v_{s5} + (h_{fi} - h_{s5}) \left(\frac{\partial v_s}{\partial h} \right)_P} \left[v_{s5} (W_P - W_{B5}) + \left\{ \frac{V_5}{J} \frac{dP}{dt} + W_P (h_P - h_{s5}) + Q_5 \right\} \left(\frac{\partial v_s}{\partial h} \right)_P \right] \quad (2.242)$$

$$\frac{dh_{s5}}{dt} = \frac{1}{M_{s5}} \left\{ \frac{V_5}{J} \frac{dP}{dt} + W_P (h_P - h_{s5}) + (h_{fi} - h_{s5}) W_{fi} + Q_5 \right\} \quad (2.243)$$

$$h_{fi} = h_{s5} \quad : W_{fi} > 0 \quad (2.244)$$

$$= h_f + h_{fg} X_2 \quad : W_{fi} \leq 0$$

$W_{B1}, W_{B2}, W_{B3}, W_{B4}, W_{B5}$ は各領域からの破断時の放出流量で, Moody の式⁽⁶⁾ を用い

て計算する。Moody の式は放出流体のクオリティが2%以下では放出流量を過小評価する傾向にあるため Zaloudek の式⁽⁷⁾によりクオリティ0%との間で内挿して用いる。Fig. 2.3にこれらの式による圧力、クオリティ、放出流量の計算側を示す。

$Q_1 \sim Q_5$ は各領域の発(吸)熱量で燃料の他に圧力容器および炉内構造物に対する熱の授受も含まれている。

(2) STEP-2

STEP-1 の領域4が飽和になり領域3に合体された場合である。飽和領域1, 2, 3に質量、体積、エネルギーの各保存則を用いてまとめると次式をうる。

$$D_{123} \frac{dP}{dt} = \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \left\{ v_f (W_F + W_{EF} + W_{FCS} + W_P) - v_g (W_S + W_{SSV} + W_{SRF} + W_{B1}) \right. \\ \left. - v_{2av} W_{B2} - v_{3av} W_{B3} - v_{fg} (W_{EC} + \Delta W_{FCS} + \Delta W_F + \Delta W_{EF}) + v_{fi} W_{fi} \right\} \\ - \Delta h_{fi} W_{fi} - \Delta h_P W_P - \Delta h_F W_F - \Delta h_{EF} W_{EF} - \Delta h_{FCS} W_{FCS} + Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2.2.45)$$

$$\Delta h_P = 0 \quad : W_P > 0 \quad (2.2.46)$$

$$= h_f - h_{s5} \quad : W_P \leq 0$$

$\Delta h_F, \Delta h_{EF}, \Delta h_{FCS}$ はそれぞれ給水・非常用給水・炉心スプレイのエンタルピと飽和エンタルピとの差であり、 $\Delta W_F, \Delta W_{EF}, \Delta W_{FCS}$ はそれぞれの流量による蒸気の凝縮流量で次のように表わす。

$$\Delta W_F = K_F \frac{h_f - h_F}{h_{fg}} W_F f_H (H_{out}) \quad (2.2.47)$$

$$\Delta W_{EF} = K_{EF} \frac{h_f - h_{EF}}{h_{fg}} W_{EF} f_H (H_{out}) \quad (2.2.48)$$

$$\Delta W_{FCS} = K_{FCS} \frac{h_f - h_{FCS}}{h_{fg}} W_{FCS} f_H (H_{in}) \quad (2.2.49)$$

K_F, K_{FCS} は凝縮効率を $f_H (H_{out})$, $f_H (H_{in})$ は炉心シュラウド内外の水位の効果を表わす。領域1, 2, 5はSTEP-1と同様であるので領域3に量質保存則を適用すると

$$\frac{dM_{g3}}{dt} = \dot{M}_{fg3} + \frac{X_{cu}}{1-X_{cu}} W_{fspil} - W_{gsip} - X_3 W_{B3} - X_P W_P \quad (2.2.50)$$

$$\frac{dM_{f3}}{dt} = W_{fspil} - \dot{M}_{fg3} - (1-X_P) W_P - (1-X_3) W_{B3} + W_{EC} + W_F + \Delta W_F + W_{EF} \\ + \Delta W_{EF} \quad (2.2.51)$$

領域3と5の境界の入出流量のクオリティ X_p は領域のボイド分布を考慮した補正係数 β_p を用いて $X_p = \beta_p X_3$ とする。但し $0 \leq \beta_p \leq 1$ である。領域3の体積 V_3 は前節と同様の方法で V_3' を求めた後に求める。 $\frac{dV_3'}{dt}$ は次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{dV_3'}{dt} = & v_{fg} \dot{M}_{fg3} - v_g W_{gsw3} + (v_f + v_{fg} X_p) W_p - v_{3av} W_{B3} \\ & + v_f (W_{EC} + W_F + \Delta W_F + W_{EF} + \Delta W_{EF}) + \left(\frac{\partial v_f}{\partial P} M_{f3} + \frac{\partial v_g}{\partial P} M_{g3} \right) \frac{dP}{dt} \end{aligned} \quad (2.252)$$

(3) STEP-3

STEP-2の領域5が飽和になり領域2に合体された場合である。炉内全域について質量、体積、エネルギーの各保存則を用いてまとめると次式を得る。

$$\begin{aligned} D_{123} \frac{dP}{dt} = & \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \{ v_f (W_{FCS} + W_F + W_{EF}) - v_g (W_S + W_{SSV} + W_{SRF} + W_{B1}) \\ & - v_{2av} W_{B2} - v_{3av} W_{B3} - v_{fg} (W_{EC} + \Delta W_F + \Delta W_{EF} + \Delta W_{FCS}) \} \\ & - (h_f - h_F) W_F - (h_f - h_{EF}) W_{EF} - (h_f - h_{FCS}) W_{fcs} + Q_1 + Q_2 + Q_3 \end{aligned} \quad (2.253)$$

領域1, 3は前述と同様であるので領域2について質量、体積を求める。

$$\frac{dM_{g2}}{dt} = \dot{M}_{fg2} - W_{gspil} - W_{gsw2} - X_2 W_{B2} + W_{gsip} + X_p W_p \quad (2.254)$$

$$\frac{dM_{f2}}{dt} = -\dot{M}_{fg2} - W_{fspil} - (1 - X_2) W_{B2} + W_{fsip} + (1 - X_p) W_p \quad (2.255)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_2'}{dt} = & v_{fg} \dot{M}_{fg2} - v_g W_{gsw2} - v_{2av} W_{B2} + (v_f + v_{fg} X_p) W_p \\ & + \left(\frac{\partial v_f}{\partial P} M_{f2} + \frac{\partial v_g}{\partial P} M_{g2} \right) \frac{dP}{dt} \end{aligned} \quad (2.256)$$

前述の方法により V_2' , V_3' より V_2 , V_3 を求める。

(4) STEP-4

領域2が未飽和ということがSTEP-3と異っている。飽和領域1, 3について質量、体積、エネルギーの各保存則を用いてまとめると次式を得る。

$$\begin{aligned} D_{13} \frac{dP}{dt} = & \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \{ v_f (W_{fspil} + W_F + W_{EF}) - v_g (W_S + W_{SSV} + W_{SRF} + \Delta W_{FCS} + W_{B1}) \\ & - v_{fg} (W_{EC} + \Delta W_F + \Delta W_{EF}) - v_{3av} (W_{B3} + W_{sip}) \\ & - v_{pav} W_p - \frac{d}{dt} V_{13} \} - (h_f - h_F) W_F - (h_f - h_{EF}) W_{EF} \\ & - (h_f - h_{s2}) W_{fspil} - \Delta h_p W_p + Q_1 + Q_2 \end{aligned} \quad (2.257)$$

D_{13} は (2.2.2) 式と同じであるが M_g , M_f , V は次式とする。

$$M_g = M_{g1} + M_{g3} \quad (2.258)$$

$$M_f = M_{f3} \quad (2.259)$$

$$V = V_1 + V_3 \quad (2.260)$$

$$\Delta h_p = h_f - h_{s2} \quad : W_p < 0 \quad (2.2.61)$$

$$= 0 \quad : W_p \geq 0$$

$$v_{pav} = v_f + v_{fg} X_p \quad : W_p \geq 0 \quad (2.2.62)$$

$$= v_f \quad : W_p < 0$$

$$\frac{dV_{13}}{dt} = -\frac{dV_2}{dt} \quad (2.2.63)$$

領域2について質量，体積，エネルギーの各保存則を用いて $\frac{dh_{s2}}{dt}$ について解くと次式となる。

$$\frac{dh_{s2}}{dt} = \{ (h_p - h_{s2})W_p + (h_f + h_{fg}X_3 - h_{s2})W_{sip} + \frac{V_2}{J} \frac{dP}{dt} + Q_2 \} / M_{s2} \quad (2.2.64)$$

(5) STEP-5

領域3が未飽和ということがSTEP-3と異っている。飽和領域1，2について質量，体積，エネルギーの各保存則を用いてまとめると次式を得る。

$$\begin{aligned} D_{12} \frac{dP}{dt} = & \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \{ v_f (W_{FCS} + W_{fsip} - W_{fspil}) - v_g (W_S + W_{SSV} + W_{SRF} + W_{B1} \\ & + \frac{X_{cu}}{1 - X_{cu}} W_{fspil} + \Delta W_F + \Delta W_{EF}) - v_{2av} W_{B2} + v_{pav} W_p - v_{fg} (W_{EC} \\ & + \Delta W_{FCS}) - \frac{dV_{12}}{dt} \} - \Delta h_p W_p - (h_f - h_{s2}) W_{fsip} + Q_1 + Q_2 \end{aligned} \quad (2.2.65)$$

D_{12} は (2.2.2) 式と同じであり， M_g ， M_f ， V は次式となる。

$$M_g = M_{g1} + M_{g2} \quad (2.2.66)$$

$$M_f = M_{f2} \quad (2.2.67)$$

$$V = V_1 + V_2 \quad (2.2.68)$$

$$\Delta h_p = h_f - h_{s3} \quad : W_p > 0 \quad (2.2.69)$$

$$= 0 \quad : W_p \leq 0$$

$$v_{pav} = v_f + v_{fg} X_p \quad : W_p < 0 \quad (2.2.70)$$

$$= v_f \quad : W_p \geq 0$$

$$\frac{dV_{12}}{dt} = -\frac{dV_3}{dt} \quad (2.2.71)$$

領域3について質量，体積，エネルギーの各保存則を用いて $\frac{dh_3}{dt}$ についてまとめると

$$\begin{aligned} \frac{dh_{s3}}{dt} = & \{ W_F (h_F - h_{s3}) + W_{EF} (h_{EF} - h_{s3}) + (\Delta W_F + \Delta W_{EF}) (h_f - h_{s3}) \\ & + W_{EC} (h_f - h_{s2}) + \frac{h_f + h_{fg} X_{cu} - h_{s2}}{1 - X_{cu}} W_{fspil} + \Delta h'_p W_p + Q_3 + \frac{V_3}{J} \frac{dP}{dt} \} \\ & / M_{s3} \end{aligned} \quad (2.2.72)$$

$$\begin{aligned} \Delta h'_p = & h_f + h_{fg} X_p - h_{s3} \quad : W_p < 0 \\ = & 0 \quad : W_p \geq 0 \end{aligned} \quad (2.2.73)$$

領域3の体積は

$$\frac{dV'_3}{dt} = v_{s3} (W_F + W_{EF} + \Delta W_F + \Delta W_{EF} + W_{EC} - W_{B3} - W_p) + \left(\frac{\partial v_s}{\partial h} \right)_p \frac{V_3}{J} \frac{dP}{dt} \quad (2.2.74)$$

これより V'_3 を求め前述の方法で V_3 及び V_2 を求める。

(6) STEP-6

STEP-3の領域2, 3が共に未飽和の場合である。領域1について質量, 体積, エネルギーの保存則を用いてまとめると次式を得る。

$$\begin{aligned} D_1 \frac{dP}{dt} = & \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \{ -v_g (W_S + W_{SSV} + W_{SRF} + W_{B1} + W_{EC} + \Delta W_F + \Delta W_{EF} + \Delta W_{FCS}) \\ & - \frac{dV_1}{dt} \} + Q_1 \end{aligned} \quad (2.2.75)$$

$$D_1 = \left\{ \left(\frac{\partial h_g}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_g}{\partial P} \right) \frac{1}{v_g} - \frac{1}{J} \right\} V_1 \quad (2.2.76)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = - \frac{dV_2}{dt} - \frac{dV_3}{dt} \quad (2.2.77)$$

領域2, 3についてはSTEP-4, 5の未飽和領域の取扱いと同様である。

(7) STEP-7

領域3の水位が著しく増大した場合に1つの領域で取扱うことは高さ方向のボイド分布の効果をも十分に表わすことができないために, 新たに領域7を設ける。STEP-7では領域7がさらに大きくなり主蒸気管に2相流が流れ込む場合を想定している。このときドーム部の主蒸気管入口までの体積を V_{10} とするとドーム最頂部のときは $V_{10} = 0$ である。全領域について質量, 体積, エネルギーの各保存則を用いてまとめると次式を得る。

$$\begin{aligned} D_{237} \frac{dP}{dt} = & \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \{ v_f (W_F + W_{EF} + W_{FCS}) - v_{7av} W_{ST} - v_{2av} W_{B2} - v_{3av} W_{B3} \} \\ & - (h_f - h_F) W_F - (h_f - h_{EF}) W_{EF} - (h_f - h_{FCS}) W_{FCS} + Q_1 + Q_2 + Q_3 \\ & + Q_7 \end{aligned} \quad (2.2.78)$$

D_{237} は(2.2.2)式と同様

$$M_f = M_{f1} + M_{f2} + M_{f3} + M_{f7} \quad (2.2.79)$$

$$M_g = M_{g1} + M_{g2} + M_{g3} + M_{g7} \quad (2.280)$$

$$V = V_T \quad (2.281)$$

$$W_{ST} = W'_S + W'_{SSV} + W'_{SRF} + W'_{B1} + K_7 \cdot W'_{EC}$$

ここに' は2相流で流出する場合を示す。

領域7の蒸気、流体の質量保存則は次式となる。

$$\frac{dM_{g7}}{dt} = W_{g7} + \dot{M}_{fg7} + W_{gsw2} + W_{gsw3} + W_{gspil} - \frac{X_{cu}}{1-X_{cu}} W_{fspil} - W_{gsw7} - K_7 X_7 W_{ST} \quad (2.282)$$

$$\frac{dM_{f7}}{dt} = W_{f7} - \dot{M}_{fg7} - K_7 (1-X_7) W_{ST} \quad (2.283)$$

$$\text{ここで } K_7 = 1 \quad : V_1 < V_{10}$$

$$= 0 \quad : V_1 \geq V_{10}$$

$$X_7 = \frac{M_{g7}}{M_{g7} + M_{f7}} \quad (2.284)$$

$$\alpha_7 = \frac{M_{g7} v_g}{M_{g7} v_g + M_{f7} v_f} \quad (2.285)$$

$$v_{7av} = v_f + v_{fg} X_7 \quad (2.286)$$

$$\dot{M}_{fg7} = -\frac{1}{h_{fg}} \left(M_{f7} \frac{\partial h_f}{\partial P} + M_{g7} \frac{\partial h_g}{\partial P} - \frac{V_7}{J} \right) \frac{dP}{dt} + \frac{Q_7}{h_{fg}} \quad (2.287)$$

W_{gsw7} は前と同様にして

$$W_{gsw7} = \frac{M_{g7}}{\tau_7} \quad (2.288)$$

$$\tau_7 = \frac{L_7}{V_{B7} - V_{F7}} \quad (2.289)$$

領域7の体積 V_7 は

$$\frac{dV_7}{dt} = v_{fg} \dot{M}_{fg7} + v_g (W_{gsw2} + W_{gsw3} - W_{gsw7}) - K_7 v_{7av} W_{ST} + \left(-\frac{\partial v_f}{\partial P} M_{f7} + \frac{\partial v_g}{\partial P} M_{g7} \right) \frac{dP}{dt} \quad (2.290)$$

これを積分して V_7 を求め V_2 , V_3 と同様の方法で V_7 を求める。領域3と7の間の流量 W_{g7} , W_{f7} も W_{spil} , W_{sip} と同様にして求める。詳細は2.2.2節でのべる。

(8) STEP-8

この場合はSTEP-2の領域3が未飽和になったのではなくSTEP-1の領域3が消滅し領域4が未飽和のまま残ったときである。飽和領域1, 2に対して質量, 体積, エネルギーの各保存則を用いてまとめると次式を得る。

$$D_{12} \frac{dP}{dt} = \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \left\{ v_f (W_{FCS} - W_{fspil}) + v_{fi} W_{fi} - v_g (W_S + W_{SSV} + W_{SRF} + W_{B1} + W_{EC} + \frac{X_{cu}}{1-X_{cu}} W_{fspil} + \Delta W_F + \Delta W_{EF}) - v_{2av} W_{B2} - v_{fg} \Delta W_{FCS} - \frac{dV_{12}}{dt} \right\} - \Delta h_{fi} W_{fi} - (h_f - h_{FCS}) W_{FCS} + Q_1 + Q_2 \quad (2.291)$$

D_{12} は (2.2.2) 式と同じ。

$$M_g = M_{g1} + M_{g2} \quad (2.292)$$

$$M_f = M_{f2} \quad (2.293)$$

$$V = V_1 + V_2 \quad (2.294)$$

$$\frac{dV_{12}}{dt} = - \frac{dV_4}{dt} \quad (2.295)$$

領域 5 については STEP-1 のそれと同じである。領域 4 の取扱いは STEP-5 の領域 3 と同じである。

(9) STEP-9

STEP-1 の未飽和領域 5 が飽和となり領域 2 に合体された場合が STEP-9 である。飽和領域 1, 2, 3 に質量, 体積, エネルギーの各保存則を用いてまとめると次式を得る。

$$D_{123} \frac{dP}{dt} = \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \left\{ v_f (W_D + W_{FCS} - W_{B2}) - v_g (W_S + W_{SSV} + W_{SRF} + W_{B1} + W_{EC}) - v_{3av} W_{B3} - v_D W_D - v_{fg} \Delta W_{FCS} \right\} - \Delta h_p W_p - \Delta h_D W_D - \Delta h_{FCS} W_{FCS} + Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2.296)$$

D_{123} は (2.2.2) 式と同じである。また領域 4 については STEP-1 の場合と同様である。

2.2.2 セパレータを通過する流量

セパレータを通してシュラウドの内側から外側へ出る流量を W_{spil} で、逆に外側の水位が高くなり内側へ入る流量を W_{sip} で次のように定義する (Fig. 2.4 参照)

まず W_{spil} , W_{sip} を用いない体積保存式 (2.2.31), (2.2.32) から求めた領域 2, 3 の体積 V'_2 , V'_3 から領域の基準体積に対する余剰体積を次式で求める。

$$\Delta V_{21} = V'_2 - V_{210} \quad (2.297)$$

$$\Delta V_{22} = V'_2 - V_{220} \quad (2.298)$$

$$\Delta V_3 = V'_3 - V_{30} \quad (2.299)$$

ここで V_{210} , V_{30} はそれぞれ領域 2, 3 のセパレータ出口下端までの体積であり, V_{220} は領域 2 の全体積である。

次に(2.2.97)～(2.2.99)式で求めた値の符号により①～③に示す場合において V_2 , V_3 および W_{spil} , W_{sip} を決定する。

$$\textcircled{1} \quad \Delta V_{22} > 0$$

$$W_{spil} = \frac{\Delta V_{22}}{v_{2av} \Delta t} \quad (2.2.100)$$

$$W_{sip} = 0 \quad (2.2.101)$$

$$V_2 = V_2' - \Delta V_{22} \quad (2.2.102)$$

$$V_3 = V_3' + \Delta V_{22} - \Delta V_{2g} \quad (2.2.103)$$

ΔV_{2g} はドーム領域へ流出する蒸気体積で(2.2.124)式(後述)で表わされる。

$$\textcircled{2} \quad \Delta V_{22} < 0, \Delta V_{21} > 0$$

$$W_{spil} = 0 \quad (2.2.104)$$

$$W_{sip} = 0 \quad (2.2.105)$$

$$V_2 = V_2' \quad (2.2.106)$$

$$V_3 = V_3' \quad (2.2.107)$$

以上①, ②はシュラウド内側水位がセパレータ出口下端以上に位置する場合であり, このときはシュラウド外側の水位が高くなっても内側への流入はないとしている。

$$\textcircled{3} \quad \Delta V_{22} < 0, \Delta V_{21} < 0$$

$$\text{i) } \Delta V_3 < 0$$

$$W_{spil} = 0 \quad (2.2.108)$$

$$W_{sip} = 0 \quad (2.2.109)$$

$$V_2 = V_2' \quad (2.2.110)$$

$$V_3 = V_3' \quad (2.2.111)$$

$$\text{ii) } \Delta V_3 \geq 0$$

$$\text{a. } -\Delta V_{21} \geq \Delta V_3$$

$$W_{spil} = 0 \quad (2.2.112)$$

$$W_{sip} = \frac{\Delta V_3}{v_{3av} \Delta t} \quad (2.2.113)$$

$$V_2 = V_2' + \Delta V_3 \quad (2.2.114)$$

$$V_3 = V_3' - \Delta V_3 \quad (2.2.115)$$

$$b. -\Delta V_{21} < \Delta V_3$$

$$W_{spil} = 0 \quad (2.2.116)$$

$$W_{sip} = \frac{\Delta V_{21}}{v_{3av} \Delta t} \quad (2.2.117)$$

$$V_2 = V_2' - \Delta V_{21} \quad (2.2.118)$$

$$V_3 = V_2' + \Delta V_{21} \quad (2.2.119)$$

以上の式から求めた W_{spil} , W_{sip} の蒸気 W_{gspil} , W_{gsip} および水の流量 W_{fspil} , W_{fsip} は次式であらわされる。

$$W_{gspil} = X_2 W_{spil} \quad (2.2.120)$$

$$W_{fspil} = (1 - X_2) W_{spil} \quad (2.2.121)$$

$$W_{gsip} = X_3 W_{sip} \quad (2.2.122)$$

$$W_{fsip} = (1 - X_3) W_{sip} \quad (2.2.123)$$

ドーム領域へ供給される蒸気体積はキャリーアンダーを考慮すると次式となる。

$$\Delta V_{2g} = \frac{W_{gspil} - X_{cu} W_{spil}}{v_g} \quad (2.2.124)$$

なお、ここで定義した W_{sip} はセパレータの構造上逆流時の圧力損失が極めて小さい場合に適用され、大きい場合は存在しないとするかあるいはモーメントの式を用いて決定される流量である。

次に 2.1.1-(7) でのべた領域 3 が増大したとき領域 7 を新たに設ける場合、領域 3 と 7 との間の流量 W_7 は W_{spil} , W_{sip} と同様の方式で求める。領域 3 の体積の上限を V_{370} とすると

$$\Delta V_{37} = V_3 - V_{370} \quad (2.2.125)$$

$$\textcircled{1} \quad \Delta V_{37} \geq 0$$

$$W_7 = \frac{\Delta V_{37}}{v_{3av} \Delta t} \quad (2.2.126)$$

$$W_{g7} = X_3 W_7 \quad (2.2.127)$$

$$W_{f7} = (1 - X_3) W_7 \quad (2.2.128)$$

$$V_7 = V_7' + \Delta V_{37} \quad (2.2.129)$$

$$\textcircled{2} \quad \Delta V_{37} < 0$$

$$W_7 = \frac{\Delta V_{37}}{v_{7av} \Delta t} \quad (2.2.130)$$

$$W_{g7} = X_7 W_7 \quad (2.2.131)$$

$$W_{f7} = (1 - X_7) W_7 \quad (2.2.132)$$

$$V_7 = V_7' + \Delta V_{37} \quad (2.2.133)$$

2.2.3 再循環流量の計算

再循環パイプの圧力損失が炉心、セパレータ、ダウンコマ等他の流路のそれに比べて十分大きい場合は、各部の冷却材流量がパイプ出口流量に等しいとして Fig. 2.5 のような回路で模擬する。

各ループの特性が等しい場合に次式を得る。

$$\left(\sum I_0 + \frac{I_p}{2} \right) \frac{dW_p}{dt} = g (P_p + P_{DH} - \sum F_r) \quad (2.2.134)$$

ここで $(\sum I_0 + I_p/2)$ は $\sum L_i/A_i$ によって求まる慣性モーメントであり $\sum F_r$ は流路抵抗 R_p , R_0 から求まる圧力損失である。ポンプ揚程 P_p は電源喪失時を考慮し減衰時定数 τ_p と電源喪失時間 t_p を用いて次式で表わす。

$$P_p = P_{p0} \left(e^{-\frac{t_p}{\tau_p}} \right)^2 \quad (2.2.135)$$

自然循環水頭 P_{DH} はシュラウド内外の水位、平均の密度から求める。

2.2.4 ダウンコマ水位の計算

水位計水位は差圧により求める方式であるためダウンコマ側の水が未飽和状態でみればダウンコマ水位と水位計水位とは等しいと仮定することができるが（厳密には水位計内の水とダウンコマ部の水の密度補正が必要）Fig. 2.6 のように水位計取出口より高い所に位置する水に気泡が含まれている場合は、各領域の水頭のバランスから

$$H_L = \left(\frac{H_4}{v_{s4}} + \frac{H_3}{v_{3av}} \right) v_L \quad (2.2.136)$$

領域 4 が飽和状態になり領域 3 に合体された場合は、水位計取出口から自由水面までの高さを H_R とすれば

$$H_L = \frac{H_R}{v_{3av}} v_L \quad (2.2.137)$$

STEP-7 の場合は水位計取出口から領域 3 の上限までの高さを H_{30} 、領域 7 の自由水面までの高さを H_7 とすれば

$$H_L = \left(\frac{H_{30}}{v_{3av}} + \frac{H_7}{v_{7av}} \right) v_L \quad (2.2.138)$$

2.3 数値解法

前節までにのべた各ステップにおける諸式の数値解法としては圧力変化率 dP/dt を基本的な未知数とした代数方程式を解くことによる。例えば STEP-1 では (2.2.1), (2.2.40) および (2.2.42) の 3 式から W_D と W_{fi} を消去し dP/dt を求める。他のステップでも同様である。但し STEP-3 と 7 では全領域が飽和状態であるため (2.2.53), (2.2.78) をそ

のまま用いる。こうして dP/dt が求まれば、他の量はすべてこれを基にして計算される。

積分はオイラー法を用いており、中性子動特性方程式は Prompt Jump Method を用いている。

蒸気表は飽和状態では 1~100 ata の圧力の変化率に応じた間隔で 35 点の圧力とそれに対する温度、エンタルピ、比容積を 11 のグループに分け、各グループで物性値を圧力の 3 次式で表わし、その係数を DATA 文で与える方式を用いている。エンタルピ、比容積の圧力に対する変化率は 3 次式の微係数として 2 次式で求めることができる。

未飽和状態では 100, 80, 60, 40, 20, 5 ata の各圧力に対するエンタルピと温度、比容積の関係を 20°C~飽和温度まで 10°C 間隔で数段階にわけエンタルピの 3 次式で表わしその係数を DATA 文で与える方式を用いている。但し圧力の効果は小さいので圧力による内挿は行わずその近傍の圧力に対する式を用いている。

破断放出流量は 2.2.1 節でのべた式を圧力とエンタルピの関数として BLOCK DATA で与えている。

次に 2.2.1~2.2.9 節でのべた各ステップに移行するときの判定条件、移行するときの質量、体積、エンタルピ等の変化を表 2.1 に示す。また Fig. 2.7 にフローチャートで示す。

表 2.1 ステップ移行時の判定条件及び初期条件

ステップ	判定条件	移るステップ	移るときの初期条件
STEP-1	$h_{s4} < h_f, h_{s5} < h_f, V_3 > 0$	STEP-1	なし
	$h_{s4} < h_f, h_{s5} < h_f, V_3 \leq 0$	STEP-8	なし
	$h_{s4} \geq h_f, h_{s5} < h_f,$	STEP-2	$M_{f3} = M_{f3} + M_{s4}$ $V_3 = V_3 + V_4$
	$h_{s4} \geq h_f, h_{s5} \geq h_f$	STEP-3	$M_{f2} = M_{f2} + M_{s5}$ $V_2 = V_2 + V_5$ $M_{f3} = M_{f3} + M_{s4}$ $V_3 = V_3 + V_4$
	$h_{s4} \geq h_f, h_{s5} \geq h_f, V_3 \leq 0$	STEP-5	$M_{f2} = M_{f2} + M_{s5}$ $V_2 = V_2 + V_5$ $M_{s3} = M_{s4}$ $V_3 = V_4$
	$h_{s4} < h_f, h_{s5} \geq h_f, V_3 > 0$	STEP-9	$M_{f2} = M_{f2} + M_{s5}$ $V_2 = V_2 + V_5$
STEP-2	$M_{g3} > 0, h_{s5} < h_f, M_{g2} > 0$	STEP-2	なし
	$M_{g3} > 0, h_{s5} \geq h_f, M_{g2} > 0$	STEP-3	$M_{f2} = M_{f2} + M_{s5}$ $V_2 = V_2 + V_5$
	$M_{g3} > 0, h_{s5} < h_f, M_{g2} \leq 0$	STEP-4	$M_{s2} = M_{f2} + M_{s5}$ $V_2 = V_2 + V_5$ $h_{s2} = (M_{f2} h_f + M_{s5} h_{s5}) / M_{s2}$
	$M_{g3} \leq 0, h_{s5} \geq h_f, M_{g2} > 0$	STEP-5	$M_{f2} = M_{f2} + M_{s5}$ $V_2 = V_2 + V_5$ $M_{s3} = M_{f3}$ $h_{s3} = h_f$
	$M_{g3} \leq 0, h_{s5} < h_f, M_{g2} > 0$ $V_3 < V_{40}$	STEP-8	$M_{s4} = M_{f3}$ $V_4 = V_3$ $h_{s4} = h_f$
	$M_{g3} \leq 0, h_{s5} < h_f, M_{g2} > 0$ $V_3 > V_{40}$	STEP-1	$M_{s4} = M_{f3}$ $V_4 = V_{40}$ $h_{s4} = h_f$ $V_3 = V_3 - V_{40}$ $M_{f3} = V_3 / v_f$ $M_{g3} = 0$
STEP-3	$M_{g3} > 0, M_{g2} > 0, V_1 > 0$	STEP-3	なし
	$M_{g3} > 0, M_{g2} > 0, V_1 \leq 0$	STEP-7	なし
	$M_{g3} > 0, M_{g2} \leq 0, V_1 > 0$	STEP-4	$M_{s2} = M_{f2}$ $h_{s2} = h_f$
	$M_{g3} \leq 0, M_{g2} > 0, V_1 > 0$	STEP-5	$M_{s3} = M_{f3}$ $h_{s3} = h_f$
	$M_{g3} \leq 0, M_{g2} \leq 0, V_1 > 0$	STEP-6	$M_{s2} = M_{f2}$ $h_{s2} = h_f$ $M_{s3} = M_{f3}$ $h_{s3} = h_f$
STEP-4	$h_{s2} \leq h_f, M_{g3} > 0$	STEP-4	なし
	$h_{s2} > h_f, M_{g3} \leq 0$	STEP-5	$M_{f2} = M_{s2}$ $M_{g2} = 0$ $M_{s3} = M_{f3}$ $h_{f3} = h_f$
	$h_{s2} > h_f, M_{g3} > 0$	STEP-3	$M_{f2} = M_{s2}$ $M_{g2} = 0$
	$h_{s2} < h_f, M_{g3} \leq 0$	STEP-6	$M_{s3} = M_{f2}$ $h_{s3} = h_f$
STEP-5	$M_{g2} > 0, h_{s3} < h_f$	STEP-5	なし
	$M_{g2} < 0, h_{s3} \geq h_f$	STEP-3	$M_{f3} = M_{s3}$ $M_{g3} = 0$
	$M_{g2} < 0, h_{s3} \geq h_f$	STEP-4	$M_{f3} = M_{s3}$ $M_{g3} = 0$ $M_{s2} = M_{f2}$ $h_{s2} = h_f$
	$M_{g2} < 0, h_{s3} < h_f$	STEP-6	$M_{s2} = M_{f2}$ $h_{s2} = h_f$
STEP-6	$h_{s2} < h_f, h_{s3} < h_f$	STEP-6	なし
	$h_{s2} \geq h_f, h_{s3} < h_f$	STEP-5	$M_{f2} = M_{s2}$ $M_{g2} = 0$
	$h_{s2} < h_f, h_{s3} \geq h_f$	STEP-4	$M_{f3} = M_{s3}$ $M_{g3} = 0$
	$h_{s2} \geq h_f, h_{s3} \geq h_f$	STEP-3	$M_{f3} = M_{s3}$ $M_{g3} = 0$ $M_{f2} = M_{s2}$ $M_{g2} = 0$
STEP-7	$V_1 = 0$	STEP-7	なし
	$V_1 > 0$	STEP-3	なし
STEP-8	$h_{s4} < h_f, h_{s5} < h_f, V \leq V_{40}$	STEP-8	なし
	$h_{s4} < h_f, h_{s5} < h_f, V > V_{40}$	STEP-1	なし
	$h_{s4} \geq h_f, h_{s5} < h_f$	STEP-2	$M_{f3} = M_{s4}$ $M_{g3} = 0$ $V_3 = V_4$
	$h_{s4} \geq h_f, h_{s5} \geq h_f$	STEP-3	$M_{f2} = M_{f2} + M_{s5}$ $V_2 = V_2 + V_5$ $M_{f3} = M_{s4}$ $M_{g3} = 0$ $V_3 = V_4$
	$h_{s4} < h_f, h_{s5} < h_f, M_{g2} < 0$	STEP-6	$M_{s2} = M_{f2} + M_{s5}$ $V_2 = V_2 + V_5$ $h_{s2} = (M_{f2} h_f + M_{s5} h_{s5}) / M_{s2}$ $M_{s3} = M_{s4}$ $V_3 = V_4$ $h_{s3} = h_{s4}$
STEP-9	$M_{g2} > 0, M_{g3} > 0, h_{s4} < h_f$	STEP-9	なし
	$M_{g2} > 0, M_{g3} > 0, h_{s4} \geq h_f$	STEP-3	$M_{f3} = M_{f3} + M_{s4}$ $V_3 = V_3 + V_4$
	$M_{g2} > 0, M_{g3} < 0, h_{s4} < h_f$	STEP-5	$M_{s3} = M_{f3} + M_{s4}$ $V_3 = V_3 + V_4$ $h_{s3} = (M_{f3} h_f + M_{s4} h_{s4}) / M_{s3}$

STEP-3, 6で領域3が消滅した場合 ($V_3 = 0$) は $M_{g2} > 0$ ではSTEP-3を $h_{s2} < h_f$ ではSTEP-6を用いる。

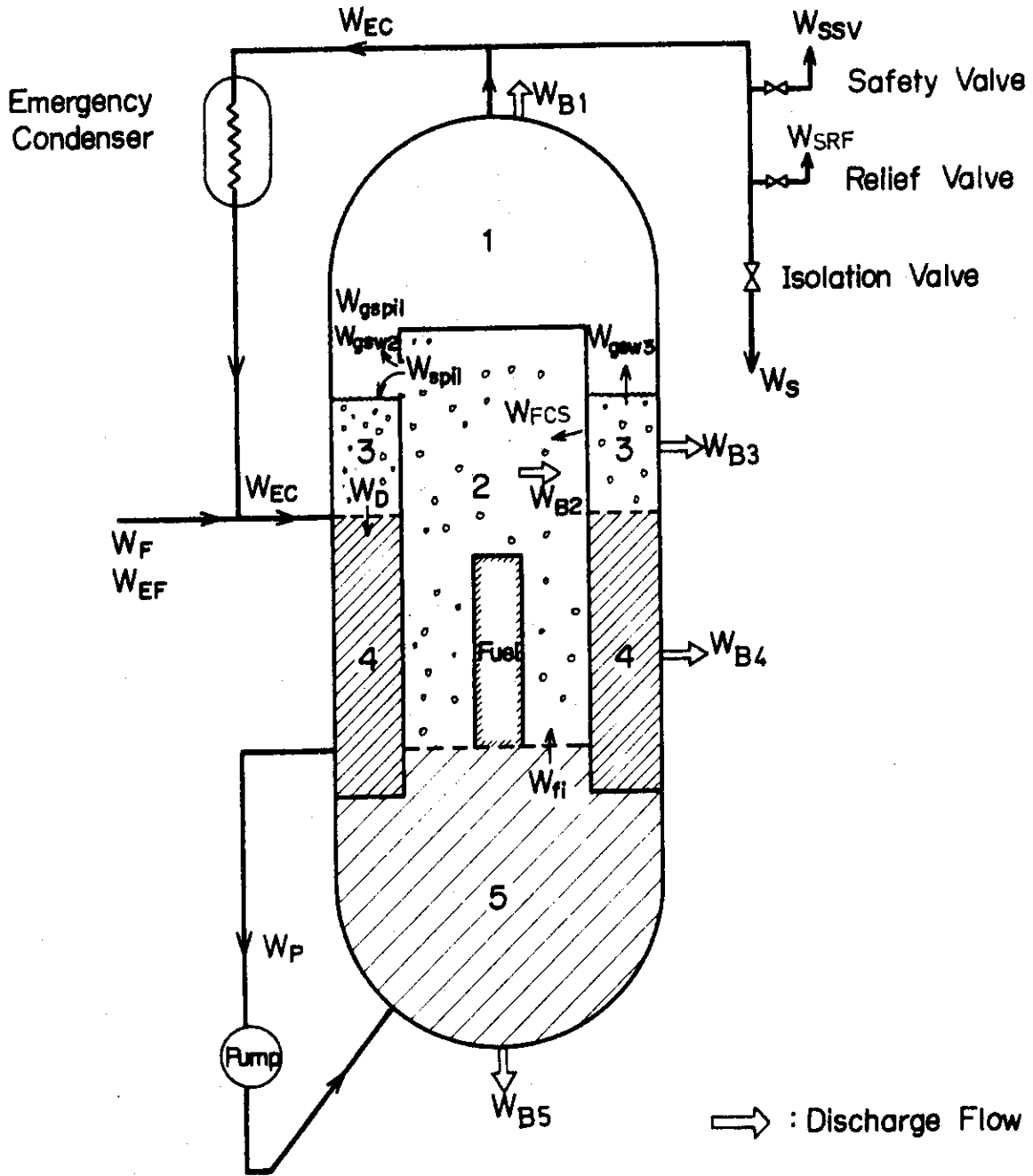


Fig.2.1 Analysis model

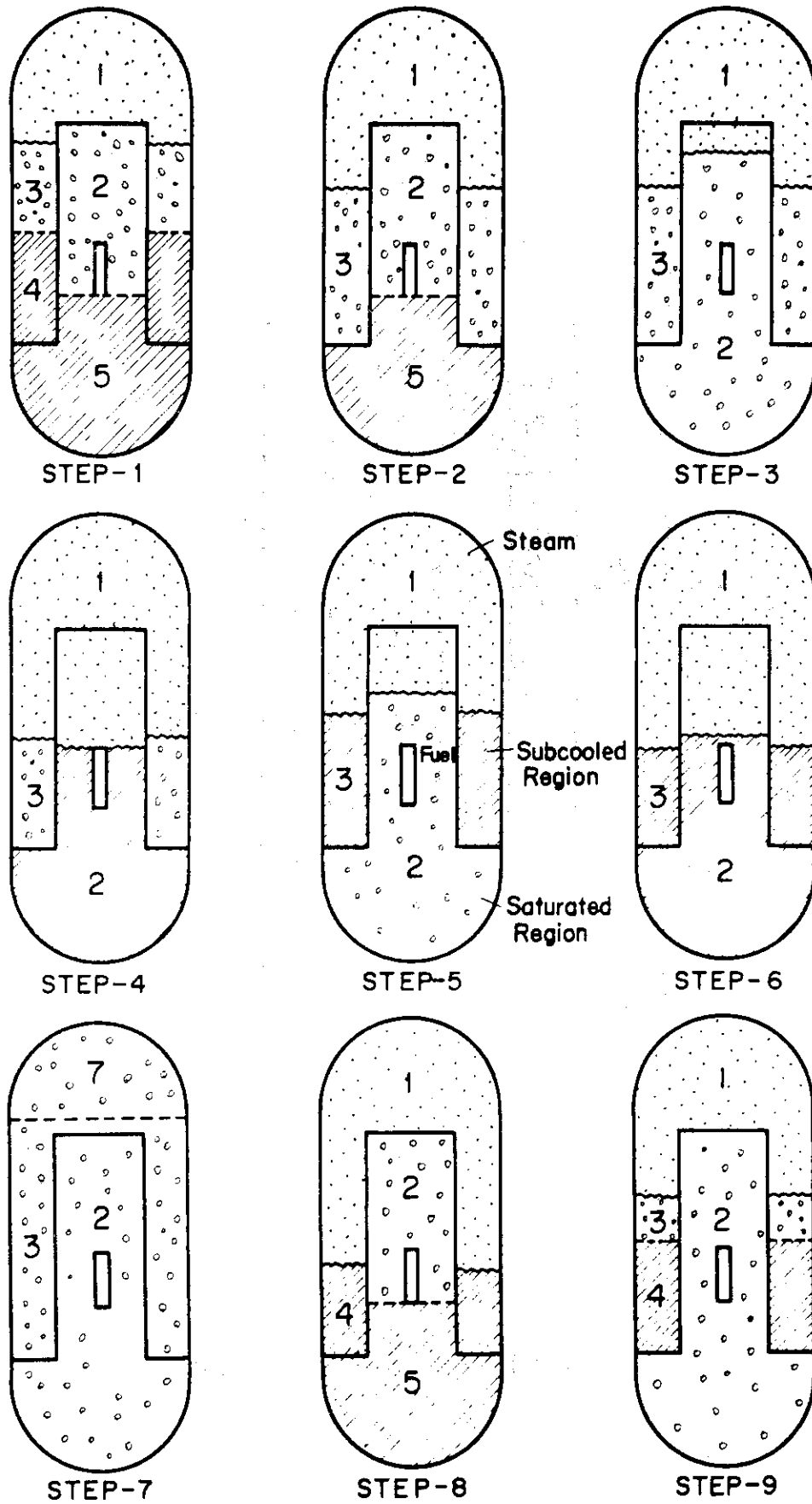


Fig.2.2 Nine types reactor model in transient

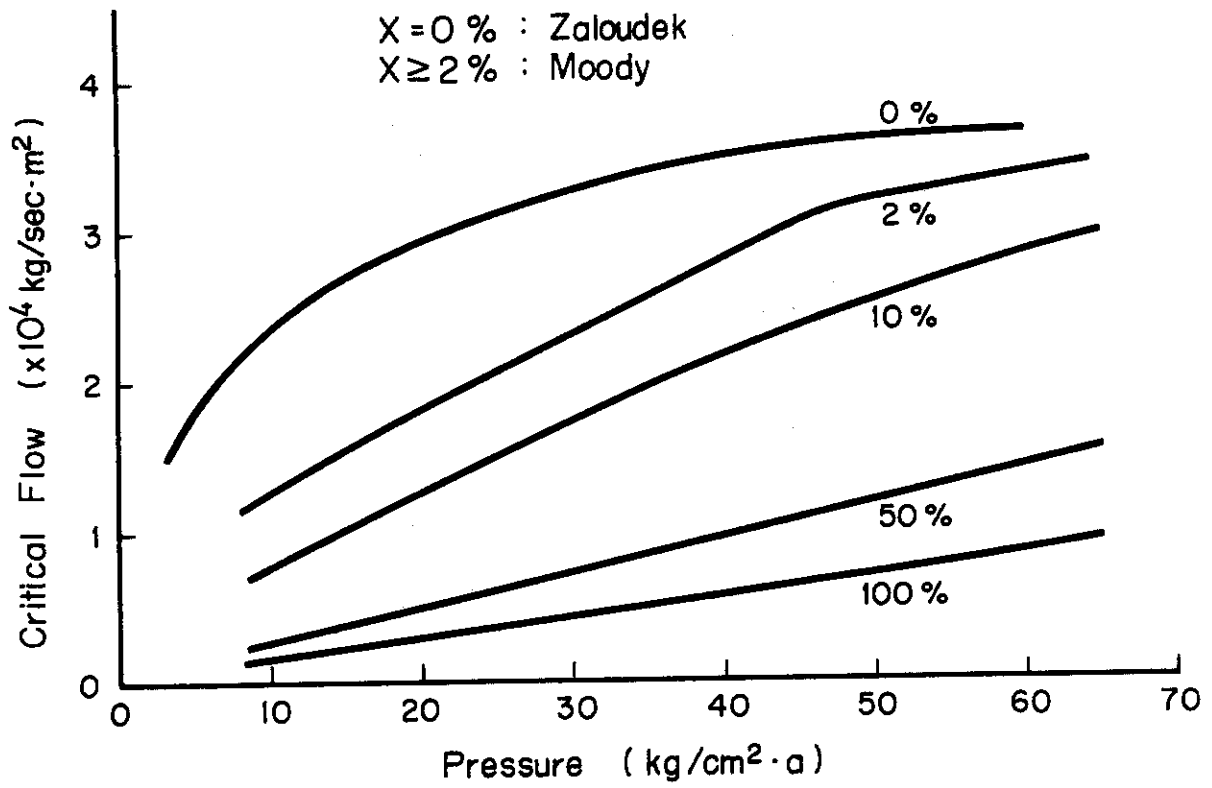


Fig.2.3.a Pressure vs. critical flow

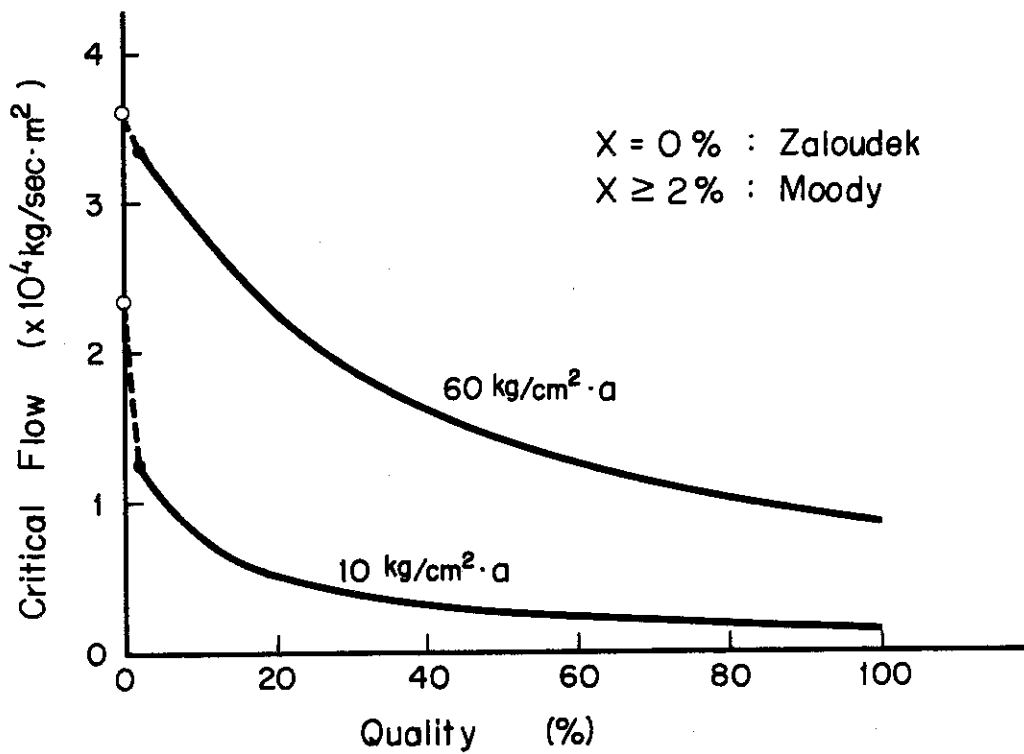


Fig.2.3.b Quality vs. critical flow

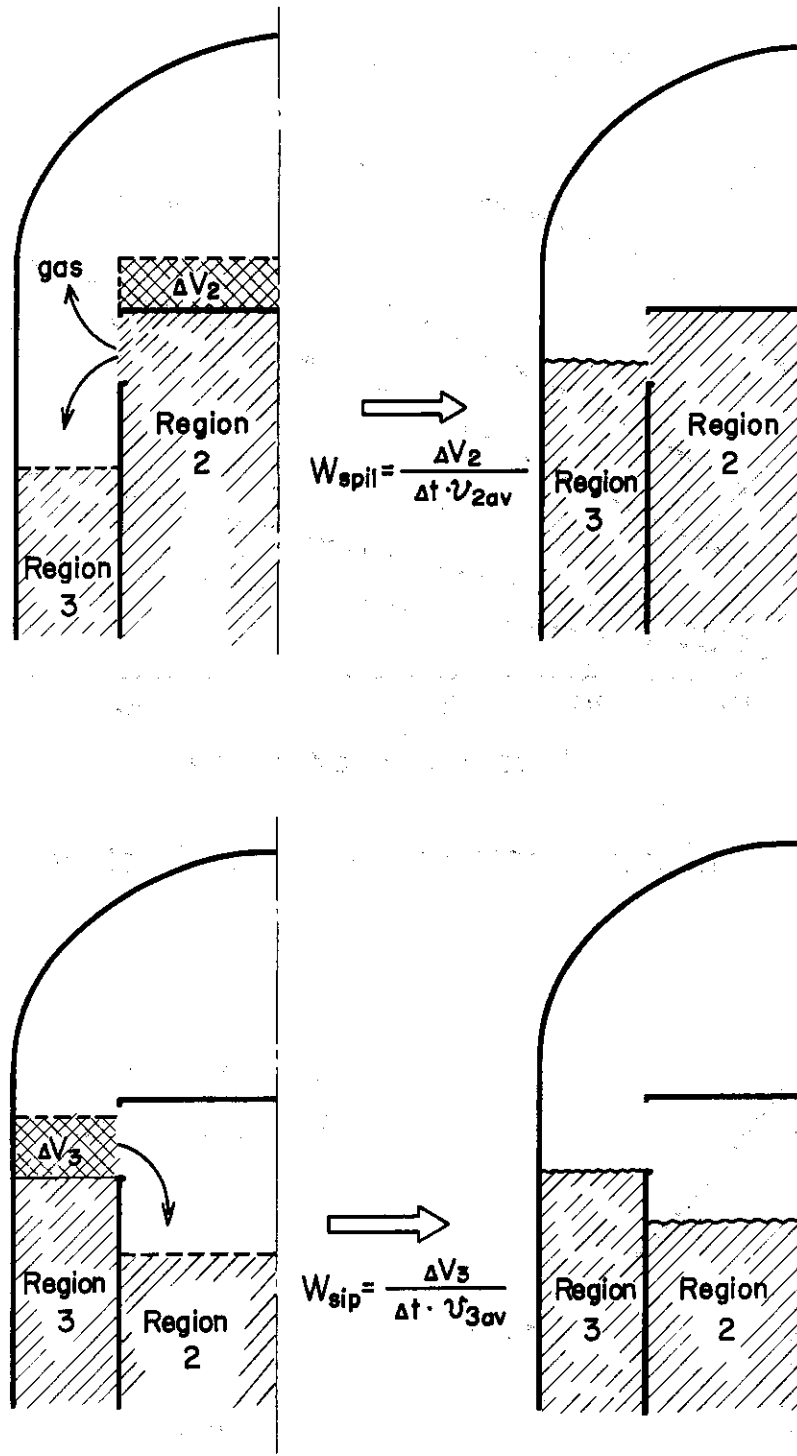


Fig. 2.4 W_{spil} and W_{sip}

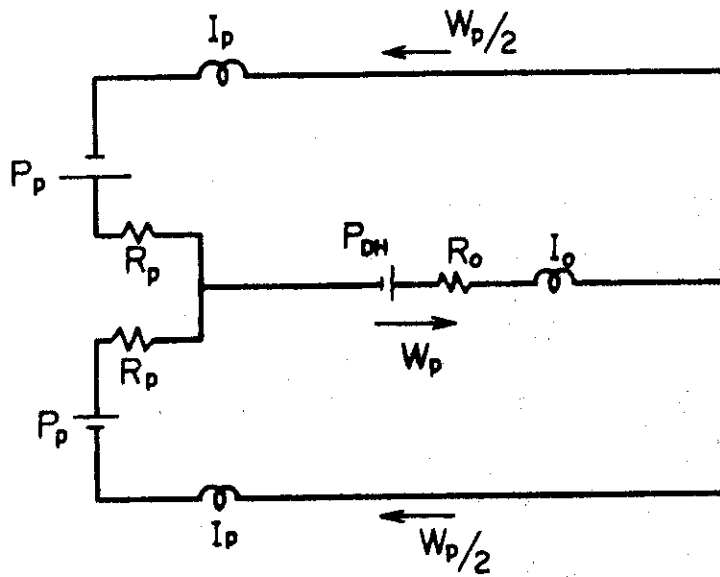


Fig.2.5 Recirculation flow model circuit

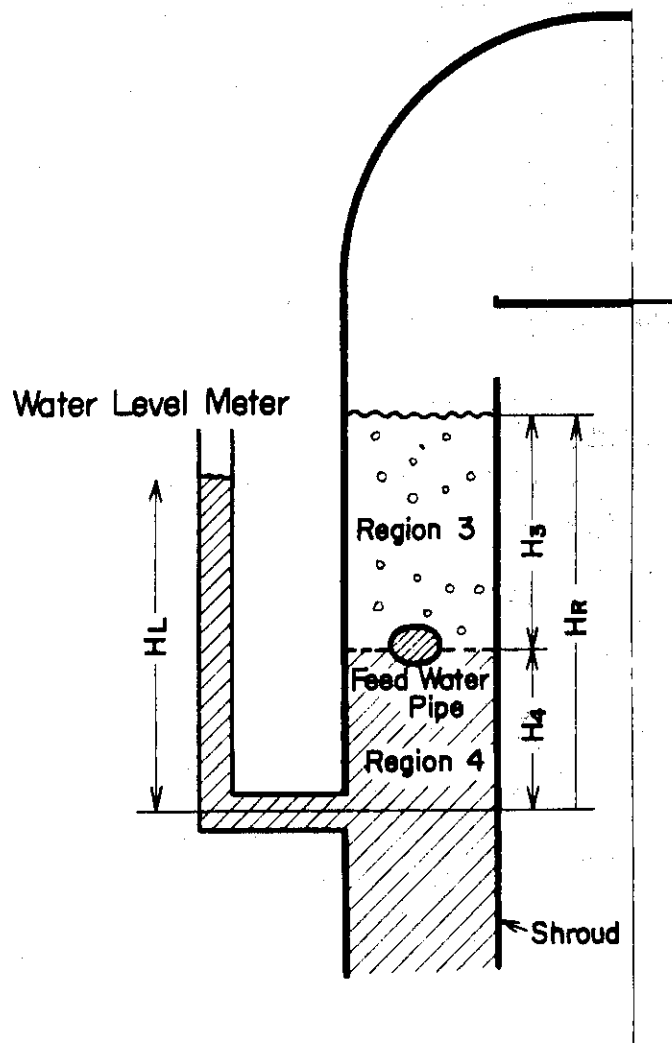


Fig.2.6 Water level meter and real water level

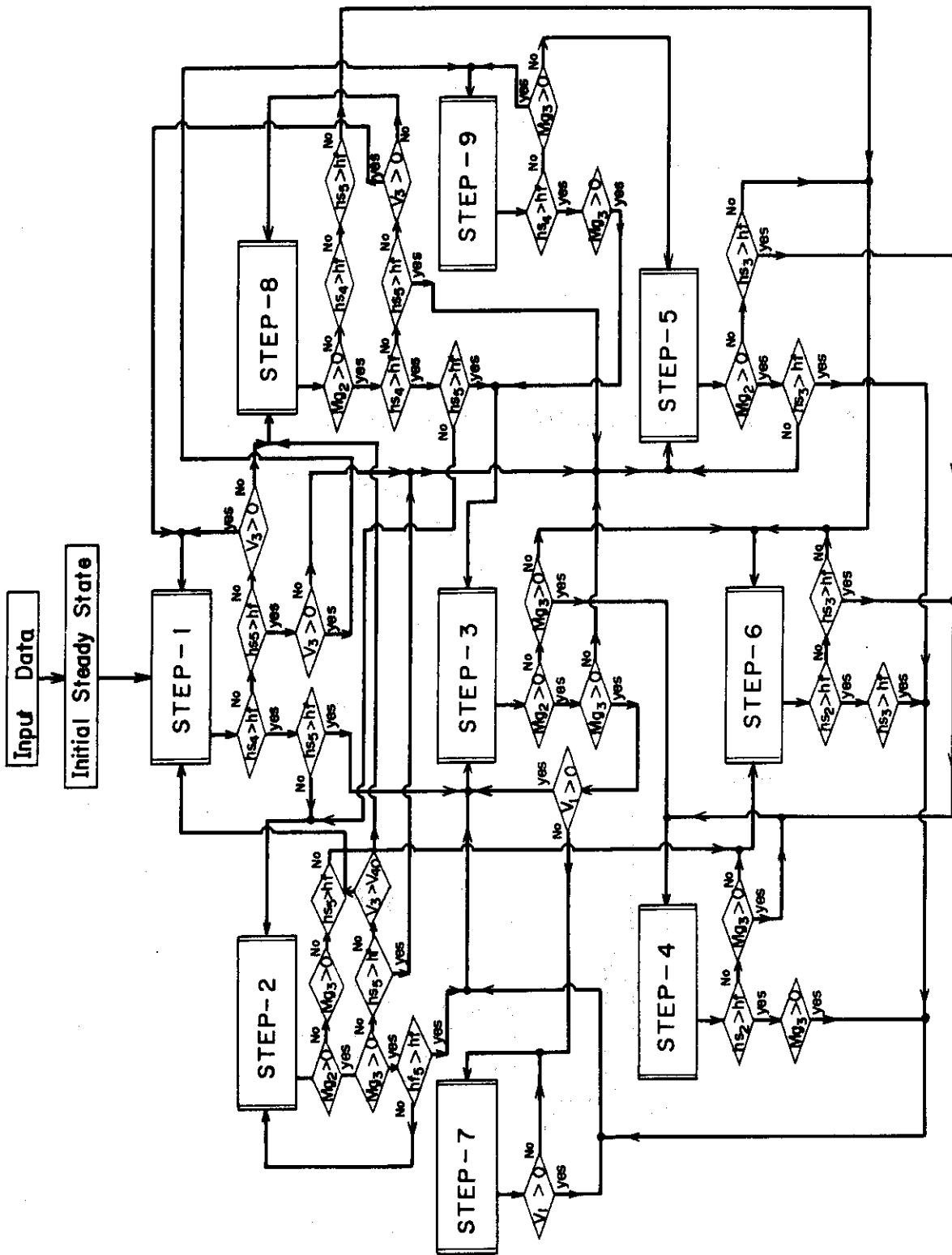


Fig.2.7 Step change flow chart

3. JPDR-IIへの適用

前述のモデルをJPDR-IIへ適用することを試みる。中小破断事故時の解析にあたっては、特に小破断ではブローダウン現象が長く持続するため原子炉の安全系統（スクラム系統・ECCS系統等）の作動条件を正確に模擬しなければ意味がない。そのためここではそれらの条件を模擬した「CONDI」^(註)なるサブルーチンを作成している。また安全系統の信号の中には格納容器内圧も含まれており、格納容器内圧はブローダウンの末期の放出流量に影響を及ぼすのでその模擬も必要である。ここではJPDR-IIに適用するために必要なサブルーチン、計算例および感度解析等についてのべる。

3.1 安全系統の模擬

「CONDI」では次の項目が含まれている。

1. スクラムの判定及びスクラム時の制御棒反応度の計算
2. 外部電源、非常用発電機、ディーゼルエンジン、安全系統電源の自動切換シーケンス
3. ジョッキポンプ、ファイアーポンプ1A及び1Bの自動起動シーケンス（リレー回路）及びポンプ動作
4. 炉心スプレイの信号回路（センサ及びリレー回路）
5. 炉心スプレイポンプ1A、1Bの自動起動シーケンス（リレー回路）及びポンプ動作
6. 炉心スプレイバルブの自動動作シーケンス（リレー回路）及びバルブ動作
7. 炉心スプレイ系特性（バルブ開度対流量特性、ポンプ特性）
8. 原子炉隔離弁の信号回路（センサ・リレー回路）及びバルブ動作・流量特性
9. 非常用凝縮器系統の信号回路（センサ・リレー回路）及びバルブ動作・流量特性
10. 非常用圧力逃し弁系統の信号回路（センサ・リレー回路）及びバルブ動作、流量特性
11. 主蒸気系統特性、系統圧力降下及び圧力制御特性
12. 給水系統特性、三要素（蒸気、給水、水位）による自動制御特性、給水エンタルピ特性を含む
13. 非常用給水系統特性（但しこの系統は手動操作によるため通常の解析には用いない）
14. 安全弁のバルブ動作、流量特性

Fig. 3.1にCONDIのフローチャートを示す。またJPDR-IIの安全系統の概念図を付録のFig. A-1に示す。

註) 横林正雄, 江連秀夫, 石塚 信「JPDR-Iの安全系統のシミュレーションコード: CONDI」JAERI-Internal memo(1977)

3.2 格納容器内圧の計算

破断事故時の格納容器内圧を正しく評価することは次の観点から重要である。

- (i) 安全保護系の信号を発生する。
- (ii) ブローダウン現象の末期に影響を及ぼす。
- (iii) ECCS作動条件を変える。

ブローダウン初期において格納容器内圧を低く見積ることは安全保護系の信号発生時刻を遅らせ、ブローダウン後の燃料の保有熱量を大きく見積ることになる。しかしブローダウン末期においてはECCS系の注入量を多くし、燃料の冷却効果を増加する。逆に格納容器内圧を高く見積ると安全保護系の信号発生を早め、燃料の保有熱を低く、さらにECCS系の注入量を低く見積ることになる。従って一概に低く又は高く見積ることが保守的とはいえず最も現実に近い値を得るように計算することが望ましい。

ブローダウン現象時の格納容器内圧の計算には通常COMTEMPT⁽⁹⁾が用いられている。このコードは計算機のコアメモリも多く直接破断コードにリンクして使用することは不経済である為この計算結果を簡単にシミュレートして使用する。

ブローダウン中の放出流量は多くの場合二相流で、そのエンタルピも時間的に変化する為シミュレートに際しては格納容器内圧の上昇に対する放出流量のエンタルピ効果に注意しなければならない。又格納容器内圧はブローダウン中の放出流量に比例して上昇し、格納容器及び内容物の熱容量、外気への放熱によって低下することが予想されるので格納容器内圧を計算する簡易シミュレーションとして次式を用いる。

$$\frac{dP_{con}}{dt} = -\lambda_p P_{con} + W_B f_{pcon}(h_B, h_{B0}) \quad (3.2.1)$$

ここで P_{con} : 格納容器内圧力

W_B : 放出流量

$f_{pcon}(h_B, h_{B0})$: エンタルピの効果を表わす関数

h_B : 放出流体のエンタルピ

h_{B0} : 定格圧の飽和水のエンタルピ

λ_p : 格納容器の放熱、温度上昇等による減衰係数

これらの定数は次のようにして求める。COMTEMPTによりJPDRの定格圧力の飽和水を放出したときの格納容器内圧上昇 P_{con0} を求める。次にエンタルピの異なる同じ流量の二相

流を放出したときの圧力上昇 P_{con} を求め $\frac{P_{con}}{P_{con0}}$ とエンタルピとの関係(Fig. 3.2 a 参照)から

$f_{pcon}(h_B, h_{B0})$ を $(\frac{h_B}{h_{B0}})$ の2次式で

$$f_{pcon}(h_B, h_{B0}) = a + b \left(\frac{h_B}{h_{B0}}\right) + c \left(\frac{h_B}{h_{B0}}\right)^2 \quad (3.2.2)$$

と表わし a , b , c を求める。

瞬時に放出される大破断事故時の格納容器内圧上昇は放出量に比例するが、中小破断事故時では圧力上昇がゆるやかな為、格納容器の放熱及び温度上昇により、放出量と格納容器内圧と

は必ずしも比例しない (Fig. 3.2 b 参照)。この圧力の減衰効果を大破断時のブローダウンが完了した後の圧力の時間変化から λ_p を求める。

このようにして作成したサブルーチン「CONTA I」と CONTEMPT とを用いた再循環パイプブロチン破断時の放出流量とその 1/10 の流量についての計算結果の比較を Fig. 3.3 に示す。この結果「CONTA I」はブローダウン初期においては格納容器内圧を低く、末期には高く見積っていることがわかる。これは頭書に述べた 3 つの要点をすべて保守側に見積っていることになる。

3.3 炉心平均ボイド率の計算

2.2 節でのべたようにこのモデルではシュラウド内側の燃料下端から上部プレナムまでを一領域としているため、この領域の平均ボイド率とボイド反応度を求めるときのそれとはかなりの差がある。そこでこの領域に関する熱出力 Q_2 、入口流量 W_{fi} およびサブクール度 Δh_s とから炉心平均ボイド率を求める。

チャンネル飽和領域に質量、体積、エネルギーの各保存則を用いて出口流量についてまとめると次式をうる。

$$W_{TC} = \frac{1}{v_f + v_{fg} X_c} \left(\frac{h_{fg}}{v_{fg}} v_f W_{oc} - D_c \frac{dP}{dt} + Q_c - \Delta h_s W_{oc} \right) \quad (3.3.1)$$

$$D_c = \left(\frac{\partial h_f}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_f}{\partial P} \right) M_{fc} + \left(\frac{\partial h_g}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_g}{\partial P} \right) M_{gc} - \frac{V_c}{J} \quad (3.3.2)$$

ここで W_{oc} 、 W_{TC} はそれぞれ炉心チャンネル入口および出口流量であり X_c は出口クォリティ、 Q_c はチャンネル内熱出力、 V_c は炉心飽和領域体積である。炉心平均ボイド率は質量保存則から次のように表わすことができる。

$$R_g = \frac{1}{V_{co} \left(\frac{1}{v_f} - \frac{1}{v_g} \right)} \int (W_{TC} - W_{oc}) dt \quad (3.3.3)$$

V_{co} は炉心全体積であり、 R_g と X_c とは次式のボイドマップ⁽⁸⁾ を用いることにより関係づける。

$$R_g = (4.78 - 0.12 \Delta h_s) \frac{X_c}{1 + 4.4 X_c} \quad (3.3.4)$$

以上の式から前述の Q_2 、 W_{fi} 、 Δh_s を用いて R_g を求めるにあたり、 Δh_s は同一の定義であるが他の量については次のような仮定を設ける。 Q_2 は炉心以外の領域 2 の構造材の熱容量の影響が含まれているが燃料からの発熱量に比べて微少であるため $Q_c \doteq Q_2$ とみなすことができる。 W_{fi} は炉心入口流量でありリーク領域への流量も含まれているが規格化した値 (〔 〕の記号で表わす) に対しては、 $[W_{oc}] \doteq [W_{fi}]$ とみなすことができる。また D_c は (3.3.2) 式のうち炉心飽和領域の質量 M_{fc} により大部分が決まり、炉内飽和領域の質量に占める M_{fc} の割合が小さいため $D_c \doteq$ 一定とみなすことができる。以上の仮定を用いれば炉心平均ボイド率を求めることができる。この計算は原子炉スクラムの時点まで行い。またボイド反応度は次式⁽⁸⁾を用いる。

$$\rho_a = -0.2 R_g - 0.25 R_g^2 \quad (\Delta k/k) \quad (3.3.5)$$

3.4 中小破断時の計算例

計算例としてドーム部の蒸気系配管、計測用ノズル等の破断、ダウンコマ部の給水系配管、計測用ノズル等の破断、下部プレナムの浄化系配管、炉内計測管、再循環配管の微小亀裂等を想定している。初期出力は定格(90MWt)の10.2%、原子炉圧力は定格(61.5 kg/cm²g)である。放出係数は1.0、所内電源は破断と同時に喪失するとし、再循環ポンプ揚程はポンプ部冷却材が飽和温度に達すると失われるとしている。

Fig. 3.4にドーム部で5 cm²の破断口が生じた場合を示す。解析条件及び図中の記号の説明は表 3.1に示す。図からわかるように蒸気放出により原子炉圧力は下降し格納容器内圧は上昇し0.14 kg/cm²gに達すると原子炉スクラム、炉心スプレイ信号が発せられる。また所内電源の喪失による安全系統電源の喪失から非常用凝縮器系統が、所内電源の喪失とダウンコマ水位異常低信号とから非常用圧力逃し弁系統が作動する。原子炉圧力が約16 kg/cm²gになると炉心スプレイの注入が始まる。図では非常用圧力逃し弁と炉心スプレイの注入とがほぼ同時に開始されたことにより原子炉圧力は急激に減少している。水位の減少は蒸気のみが放出されているために小さく炉心は露出していない。破断口面積が50 cm²の場合をFig. 3.5に示す。放出蒸気量が多いため原子炉圧力の降下は早く、またフラッシングによるボイドの発生から水位の減少も小さく異常低信号が発生しないため非常用圧力逃し弁は作動していない。

主蒸気管付根部が破断した場合をFig. 3.6に示す。原子炉圧力の降下は極めて早く、フラッシングによるボイドの急増から領域1が消滅し2相流が放出されるSTEP-7の状態が生じている。放出量が多いため炉心は露出するが原子炉圧力の降下が早いためそれ以前に炉心スプレイの注入が開始されている。

ダウンコマ部に5 cm²の破断口が生じた場合をFig. 3.7に、50 cm²の場合をFig. 3.8に示す。前者は放出量が少いため約200秒で非常用圧力逃し弁が作動するまで原子炉圧力降下は小さいが後者は放出量が多いため水位の降下が早く約20秒で破断口位置以下になり蒸気が放出され原子炉圧力降下はかなり大きくなっている。炉心露出に関しては前者は燃料上部が露出するが炉心スプレイの注入により再冠しており後者は露出後約30秒で炉心スプレイ注入が開始されている。

下部プレナム底部に5 cm²の破断口が生じた場合をFig. 3.9に、50 cm²の場合をFig. 3.10に示す。前者はFig. 3.7の場合と類似した応答を示しているが破断口位置が炉心下端より低いため水位低下も大きく炉心は露出するが約70秒後に炉心スプレイ注入開始となる。後者は破断口が大きいため放出量が多く約70秒で冷却材はほとんど喪失している。このように現象の進行が早い場合には非常用圧力逃し弁系の効果は小さい。また前者の条件で破断後も所内電源が存在する場合をFig. 3.11に示す。この場合は所内電源があるため給水ポンプは作動するが、非常用凝縮器系統(圧力高で作動)と非常用圧力逃し弁系統とは作動しない。従って圧力降下率は小さく炉心スプレイ注入開始までに約700秒を要するが給水流量が存在するため水位低下は小さく炉心が露出することはない。再循環ポンプは約60秒でダウンコマ側

水位異常低信号により、トリップし、約90秒でシュラウド内外の水位がほぼ等しくなっている。

3.5 感度解析

中小破断では現象が比較的ゆっくりしているために、ブローダウン中のプロセス量の状態が種々の外的条件や仮定によって影響されやすい。その効果を破断口位置が圧力容器底部の場合について種々評価した。

(1) 事故前の原子炉出力が及ぼす効果

初期条件として定格の102%、75%、50%及び0%（ホットスタンドバイ）出力で破断口 50 cm^2 、 5 cm^2 の場合の計算結果をFig.3.12、Fig.3.13に示す。図の中で(a)は原子炉圧力の時間変化、(b)はシュラウド内水位の時間変化、(c)は炉心露出時間及び炉心スプレイが定格流量に達する時間を示している。これらの図より炉心の断熱期間すなわち炉心露出時間から炉心スプレイが定格流量に達するまでの時間は出力が高い方が長くその露出開始時間も早く現われている。しかもその差は破断口面積が小さい程著しく表われている。

(2) 原子炉圧力容器及び炉内構造物の保有熱量の効果

上記の効果を調べる為に構造材表面の熱伝達係数を0から $1000\text{ BTU}/\text{ft}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{F}$ まで変更して計算した結果を破断口 50 cm^2 と 5 cm^2 についてそれぞれFig.3.14、Fig.3.15に示す。いずれの場合も炉心露出開始時間には影響はない。また断熱期間は $0\text{ BTU}/\text{ft}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{F}$ を仮定した場合が最も短い但其の効果は小さい。これは圧力容器及び構造材熱容量が水の保有熱量及び崩壊熱に比べて十分小さいことによる。

(3) 再循環ポンプの揚程を失わせる流体クオリティの効果

再循環ポンプを通過する流体が飽和温度近くになるか又はあるクオリティの二相流になるとポンプは揚程を失う。JPDRでは定格温度、圧力の飽和状態でかなり長い時間ポンプを運転した経験があり、ここまでは揚程に大きな変化がないことは確かめられている。その為解析では保守的に見積って飽和に達した時点でポンプは揚程を失うという条件を入力している。

ポンプ揚程が失われるクオリティとして0、1、2%を仮定して計算した結果をFig.3.16～Fig.3.18に示す。これらの図は破断口 300 、 50 及び 5 cm^2 においてクオリティの効果を調べたもので、破断口が小さい場合には差異がないが大きな破断口についてはクオリティが小さければ炉心露出時間は早く、断熱期間は長くなる。これは破断口が小さい場合には圧力降下が小さい為にクオリティが小さく1%に達しないが、破断口が大きくなると圧力降下が大きく従ってフラッシングによりクオリティの増大は著しく早くなることによる。

(4) 外部電源喪失モードの効果

外部電源の喪失する時点を破断と同時にした場合と、破断に伴って発生する原子炉スクラム時点と同時にした場合を比較して、破断口 50 cm^2 及び 5 cm^2 についてそれぞれFig.3.19、Fig.3.20に示す。いずれの場合も破断と同時に電源喪失が起るとした場合がきびしく炉心露出時刻が早くなっており、特に小さな破断の場合にそれが著しい。

(5) 気泡離脱速度の効果

Wilsonの相関による気泡離脱速度がブローダウン現象に及ぼす効果を破断口 50 cm^2 と 5 cm^2 についてそれぞれ Fig. 3.21 及び Fig. 3.22 に示す。速度が遅くなると水位低下が遅れるのは当然であるが断熱時間に大差はない。これは破断口 50 cm^2 の場合は放出流量が大きく現象が速く進むために気泡の影響は少ないが 5 cm^2 の場合は圧力降下が小さいために気泡そのものの量が少なく水位に対する影響が少ないことによる。従っていずれの場合にも現象に大きな影響を与えないものと考えられる。

3.6 原子炉圧力と放出流量の関係

破断事故時の原子炉圧力の降下と放出流量との関係を定格温度、圧力、零出力時について簡易モデルにより考察する。モデル化に当り次の仮定をおく。

- 原子炉内を蒸気、飽和水、サブクールの3領域に分割する。但しサブクール領域が飽和になると飽和領域に包含される。(Fig. 3.23 a 参照)
- 圧力は一点近似とし飽和領域について質量、体積、エネルギーの各保存則を用いる。
- 燃料、構造材など熱出力は全くないとする(零出力とする)。
- 飽和水領域は水だけとして発生する気泡はすべて蒸気領域に含まれるとする。

b. の仮定により $\frac{dP}{dt}$ を求めると

$$\frac{dP}{dt} = - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} (v_g W_s + v_f W_B) / D \quad (3.6.1)$$

$$D = \left(\frac{\partial h_f}{\partial P} - \frac{\partial v_f}{\partial P} \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \right) M_f + \left(\frac{\partial h_g}{\partial P} - \frac{\partial v_g}{\partial P} \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \right) M_g - \frac{V_{sat}}{J} \quad (3.6.2)$$

$$\dot{M}_{fg} = - \left(M_f \frac{\partial h_f}{\partial P} + M_g \frac{\partial h_g}{\partial P} - \frac{V_{sat}}{J} \right) \frac{1}{h_{fg}} \frac{dP}{dt} \quad (3.6.3)$$

$$\frac{dM_g}{dt} = \dot{M}_{fg} - W_s \quad (3.6.4)$$

$$\frac{dM_f}{dt} = - \dot{M}_{fg} \quad (3.6.5)$$

$$\frac{dM_f}{dt} = - W_B \quad (3.6.6)$$

V_{sat} : 飽和領域の体積

\dot{M}_{fg} : フラッシング又は凝縮による蒸気流量

W_s : 蒸気の放出流量

W_B : 水の放出流量

サブクール領域が飽和領域に含まれたときは

$$\frac{dM_f}{dt} = - \dot{M}_{fg} - W_B \quad (3.6.7)$$

$$M_g = \int \left(\frac{dM_g}{dt} \right) dt \quad (3.6.8)$$

$$M_f = \int \left(\frac{dM_f}{dt} \right) dt \quad (3.6.9)$$

$$M_s = \int \left(\frac{dM_s}{dt} \right) dt \quad (3.6.10)$$

$$V_{sat} = V_T - M_s v_s \quad (3.6.11)$$

V_T : 原子炉全体積

以上の式を用いて一定流量の水又は蒸気を放出した場合の計算を行った。その結果異なる流量で放出した場合でも放出流量の積分値が等しければ圧力は等しいという関係を得た。Fig. 3.23.b に水と蒸気について放出量と圧力の関係を示した。JPDRでは定格圧力(62.5 kg/cm²・a)時に約14 tの水があるが、水が放出されてほとんどなくなった状態でも圧力はまだ約25 kg/cm²・aである。これに対し蒸気が放出された場合はわずか4 tの放出量で圧力は3 kg/cm²・aとなり、この時の残存水量は約10 tである。

これらのことから破断事故時に、早い圧力降下が必要な時は蒸気を放出すればよいことがわかる。即ち非常用凝縮器系統、非常用圧力沈し弁系統の効果が小破断時に大きく現われる所以である。従ってこれらの安全系統が作動しない場合に下部破断すれば原子炉内の水がすべて放出されて蒸気が放出されるまで炉心スプレイ作動圧力に達しない為、破断口が小さい程断熱期間が長くなるという現象が起る。

3.7 大破断解析への応用

大破断解析コードは一つのブローダウン現象の解析に長時間を要しパラメータサーベイには適さない。これはモーメントの式を詳細に評価していることに起因しており、ブローダウン時の現象が比較的ゆるやかな中小破断時にはこの式は極めて簡易化してある。従って中小破断コードの主要部にモーメントの式をある程度取入れることにより大破断時のブローダウン現象をどの程度模擬できるかは興味深い。またこれにより大破断時のパラメータサーベイを行い定性的な傾向を把握することができる。

ここでは再循環パイプ両端破断を想定し、配管を通して放出される流量について考察する。

圧力容器には多くの配管が接続されている。それらの圧力容器の境界や配管で破断が生じて蒸気や水が放出されるとき、その幾何学的形状による流路抵抗によって放出流量が低下する。これに関してMoodyは圧力容器に配管がある場合に、その流路抵抗、圧力をパラメータにして、放出流量を求める方法を提案している。それに従って放出流量を計算すると長時間かかること、Moodyの配管破断の放出流量の正確な数表が入手できないなどの理由によって、簡便な方法で取扱うことを試みている。

配管の放出口にFig.3.24に示すような仮想体積をもうけて、そこから配管と同じ大きさの孔で放出されると仮定する。エネルギーおよびモーメントの各バランス式より次式⁽¹⁰⁾が成立

する。

$$W_B^2 df_1 = -dP - f_2 W_B^2 d\ell \quad (3.7.1)$$

$$f_1 = \frac{J'}{J} \frac{1}{g_c} \{ K(1-X)v_f + Xv_g \} \left(X + \frac{1-X}{K} \right)$$

$$f_2 = \frac{J'}{J} \frac{\bar{f}}{H_D} \frac{1}{2g_c} v_f$$

$$f_3 = h_f + Xh_{fg} \quad (3.7.2)$$

$$f_4 = \frac{1}{2g_c J} \{ K(1-X)v_f + Xv_g \}^2 \left(X + \frac{1-X}{K} \right)$$

$$K = \sqrt{v_g/v_f}$$

d_p : 配管の長さ $d\ell$ での圧力降下

J' , J , g_c : 定数

\bar{f} : 摩擦損失係数

(3.7.1)式と(3.7.2)式とから

$$\frac{dP}{d\ell} = \frac{\bar{f}}{H_D} \frac{1}{T} \quad (3.7.3)$$

ここに,

$$T = \frac{2g_c \left[W_B^2 \left\{ \left(\frac{\partial f_1}{\partial X} \right)_P \frac{\left(\frac{\partial f_3}{\partial P} \right)_X + W_B^2 \left(\frac{\partial f_4}{\partial P} \right)_X - \left(\frac{\partial f_1}{\partial P} \right)_X \right\} - 1 \right]}{v_f \left\{ 1 + \left(\frac{1}{K} \frac{v_g}{v_f} - 1 \right) X \right\}^2 W_B^2} \quad (3.7.4)$$

(3.7.3)式を Fig. 3.24 に示される概念図を基に A 点から B 点までの圧力降下を計算して Moody の maximum flow rate の条件を適用し、区間 $d\ell$ においては放出流量が一定であることを仮定すると次式が成立する。

$$\int_{P_B}^{P_A} \frac{dP}{d\ell} d\ell = \int_{P_B}^{P_A} \frac{\bar{f}}{H_D} \frac{1}{T} d\ell \quad (3.7.5)$$

$$\sum_i \Delta P_i \approx \sum_i \frac{\bar{f}_i}{H_{Di}} \frac{\Delta \ell_i}{T_i} \quad (3.7.6)$$

実際の計算手順ではある放出流量を仮定し、その流量に基く配管による圧力損失を(3.7.6)式により求め Fig. 3.24 の A 点の入口圧力がわかれば、出口 B 点の圧力が求められる。この出口圧力と流体の物性値が定めれば放出流量が求められる。この放出流量と仮定したそれとの差をなくすように繰返しを行えばよい。

流路抵抗はレイノルズ数と配管の内面粗さ、等価直径によって Moody's pipe friction chart によって求める。ここでは次式の Colebrook function⁽¹¹⁾ を使用する。

$$\epsilon/H_D = \log^{-1} \left(0.57 - \frac{1}{2\sqrt{f}} \right) - \frac{9.3}{Re\sqrt{f}} \quad (3.7.7)$$

ϵ : 管内面粗さ

Re : レイノルズ数

また、ボイドを含む流体に対しては、プログラムではあらかじめ Martinelli & Nelson および Thom の圧力損失係数をボイドと圧力の関数の数表として与える方式を用いている。

次に計算例について述べる。配管の流路抵抗がある場合とない場合とについて、配管長さ 10 m、直径 0.3 m、粗さ 0.03 mm の条件のもとでクオリティをパラメータとして計算した結果を Fig. 3.2.5 に示す。また配管入口のクオリティが零で入口圧力をパラメータとして出口圧力を計算した結果を Fig. 3.2.6 に示す。

JPDR-II には再循環系は 2 系統ある。そのうち 1 系統の再循環ポンプ入口部、下部プレナムの入口部、ダウンカマの出口部が破断した場合の現象を解析した。解析条件は初期出力が定格の 102% で配断と同時に所内電源喪失、放出係数は 1.0 である。下部プレナムの入口部が大破断したとき初期放出流量は約 1.5×10^4 t/h、そのときの圧力降下は約 20 kg/cm^2 、炉心露出時間は約 5.6 秒である。このときの解析の圧力、炉出力、水位等を Fig. 3.2.7 に示す。また参考として前述の 3 ケースの炉心露出時間を表 3.2 に示す。

表に示すように炉心露出時間は a の場合が最も早く、b、c の場合はほぼ同一である。これは a では下部プレナム部からは流路抵抗なしで放出され、ダウンカマ側からは大きな流路抵抗により放出流量が少いが、b では再循環パイプの流路抵抗が下部プレナム側およびダウンカマ側の両面に生じるために放出流量が a の場合より減少することによる。また c の場合はダウンカマ側では放出流量が早い時期に水から蒸気になり圧力降下が早く、下部プレナム側からは流路抵抗が大きく放出流量が少いことによる。従って炉心露出時間は c の場合が最も遅くなる。ブローダウン終了時間はいずれの場合も約 20 秒であり、これは RELAP-3 による JPDR-II の大破断解析の結果⁽¹²⁾に述べられている放出係数を 1.0 としたときの結論とよく一致している。

表 3.1 解析条件及び記号の説明

破断口位置	破断口面積 (cm^2)	解 析 条 件	図 番 号
ドーム上部	5	破断と同時に電源喪失	Fig. 3.4
	50	"	Fig. 3.5
	283	"	Fig. 3.6
給水管部	5	"	Fig. 3.7
	50	"	Fig. 3.8
圧力容器 下部	5	"	Fig. 3.9
	50	"	Fig. 3.10
	5	破断後も電源あり	Fig. 3.11
図中の記号	説 明		単 位
POWER	原子炉出力(定格で90)		MWt
P	原子炉圧力(定格で62.5)		$\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{a}$
PCON	格納容器内圧		$\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$
HREAL	シュラウド外側実水位, 初期値からの変化分		cm
HLEVEL	ダウンコマ水位計水位 "		cm
HOUT	シュラウド外側実水位 炉心下端を基準		m
HIN	シュラウド内側実水位 "		m
WFCS	炉心スプレイ流量		kg/sec
WRELF	非常用圧力沈し弁系流量		"
WEF	非常用給水流量		"
WEC	非常用凝縮器系流量		"

註) 放出係数は1.0としている。再循環ポンプ揚程はポンプ部冷却材が飽和温度に達すると喪失するとしている。Fig. 3.6 は蒸気管付根部の破断である。

表 3.2 大破断時の炉心露出時間

再循環パイプ破断箇所	炉心露出時間(秒)
a. 下部プレナム入口部	5.58
b. ポンプ入口部	7.58
c. ダウンコマ出口部	7.95

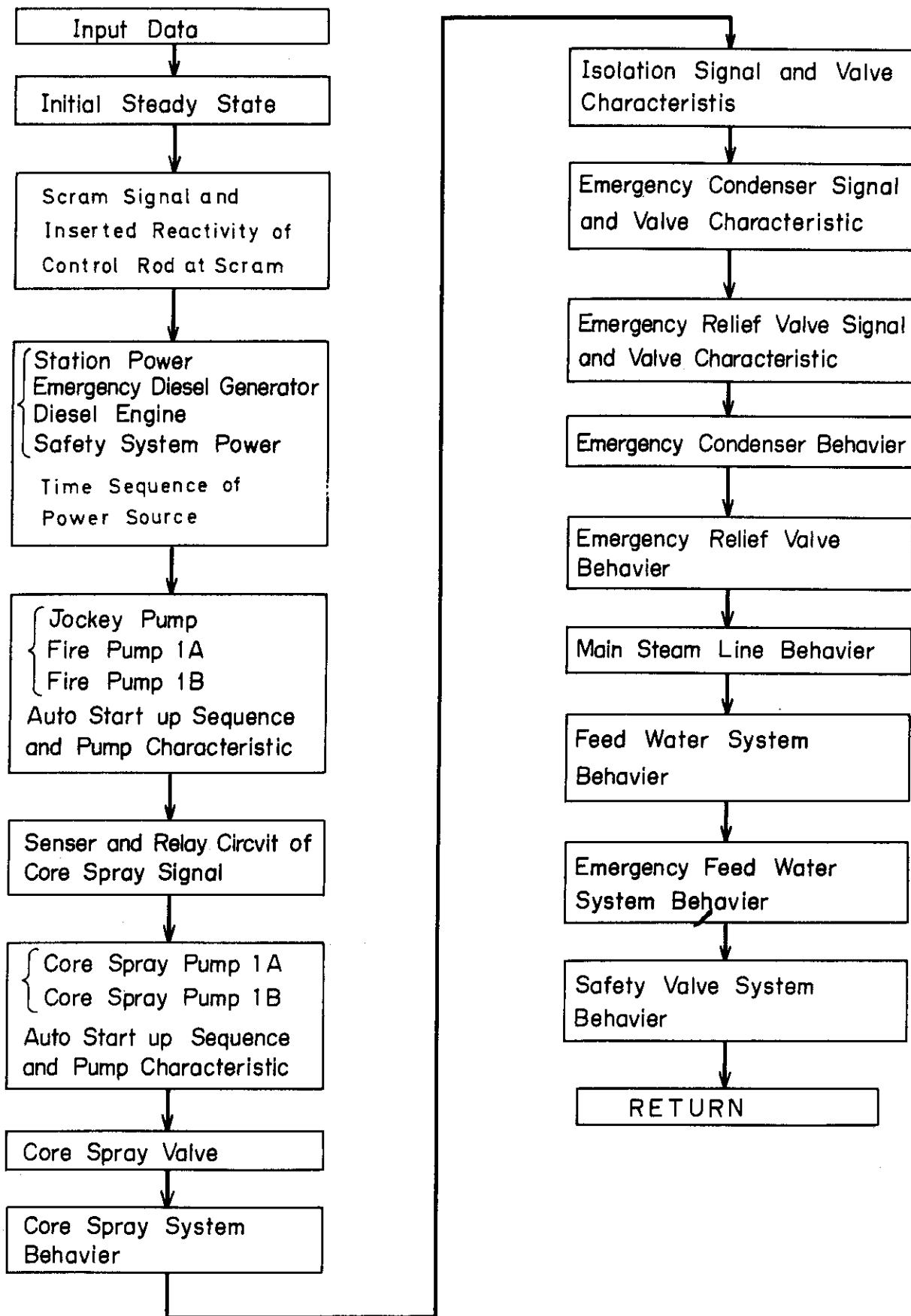


Fig.3.1 CONDI flow chart

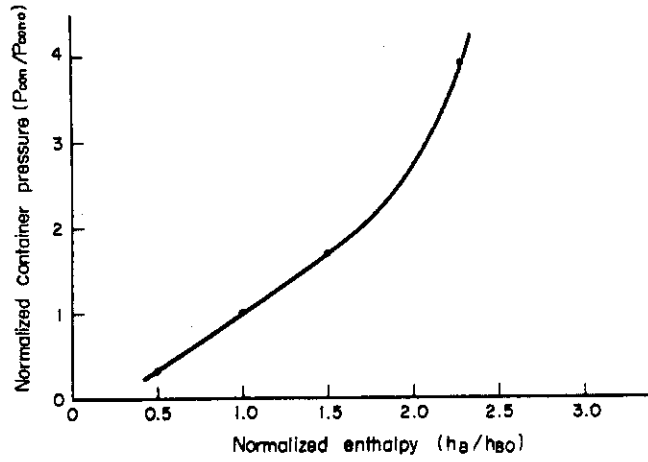


Fig.3.2.a Effect of discharge flow enthalpy

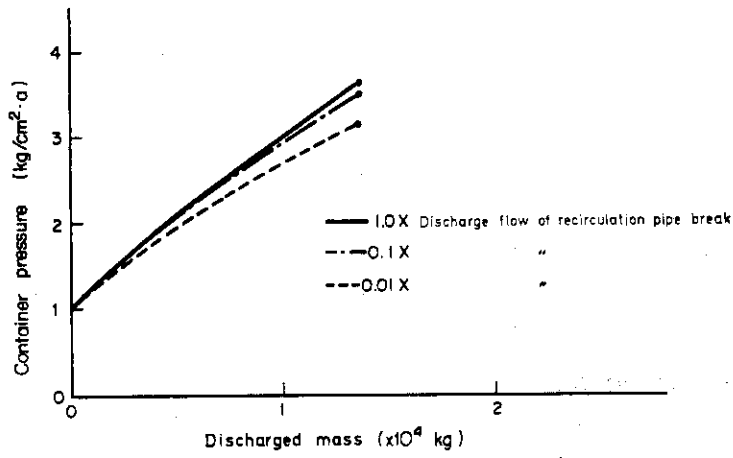


Fig.3.2.b Effect of discharge flow rate

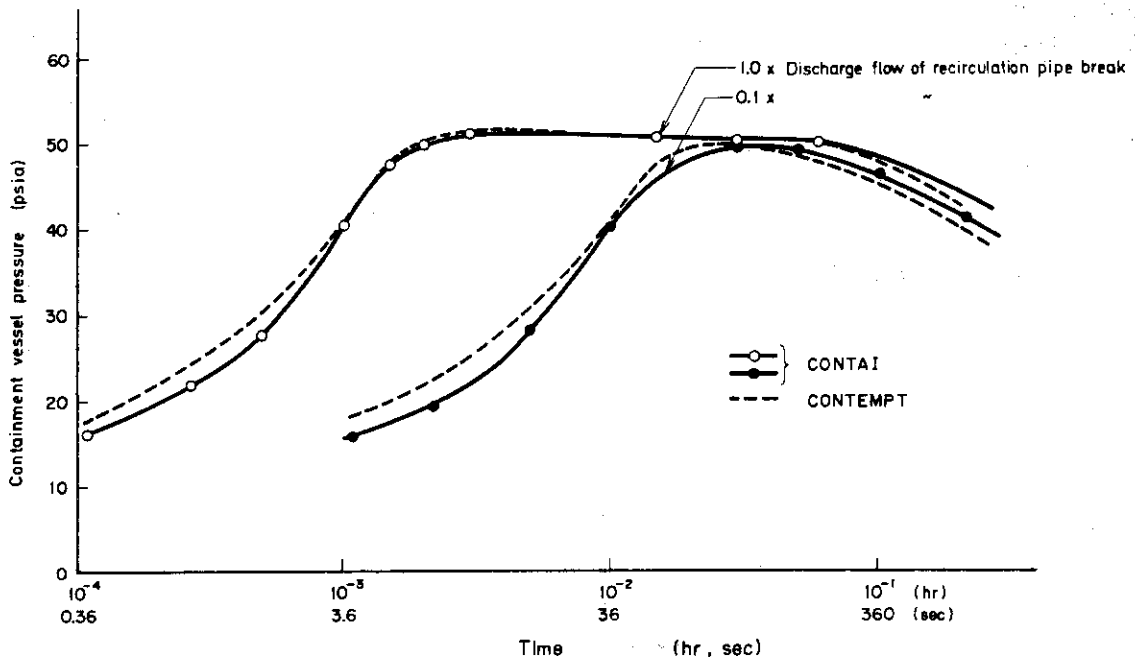


Fig.3.3 Comparison of CONTEIPT with CONTAI

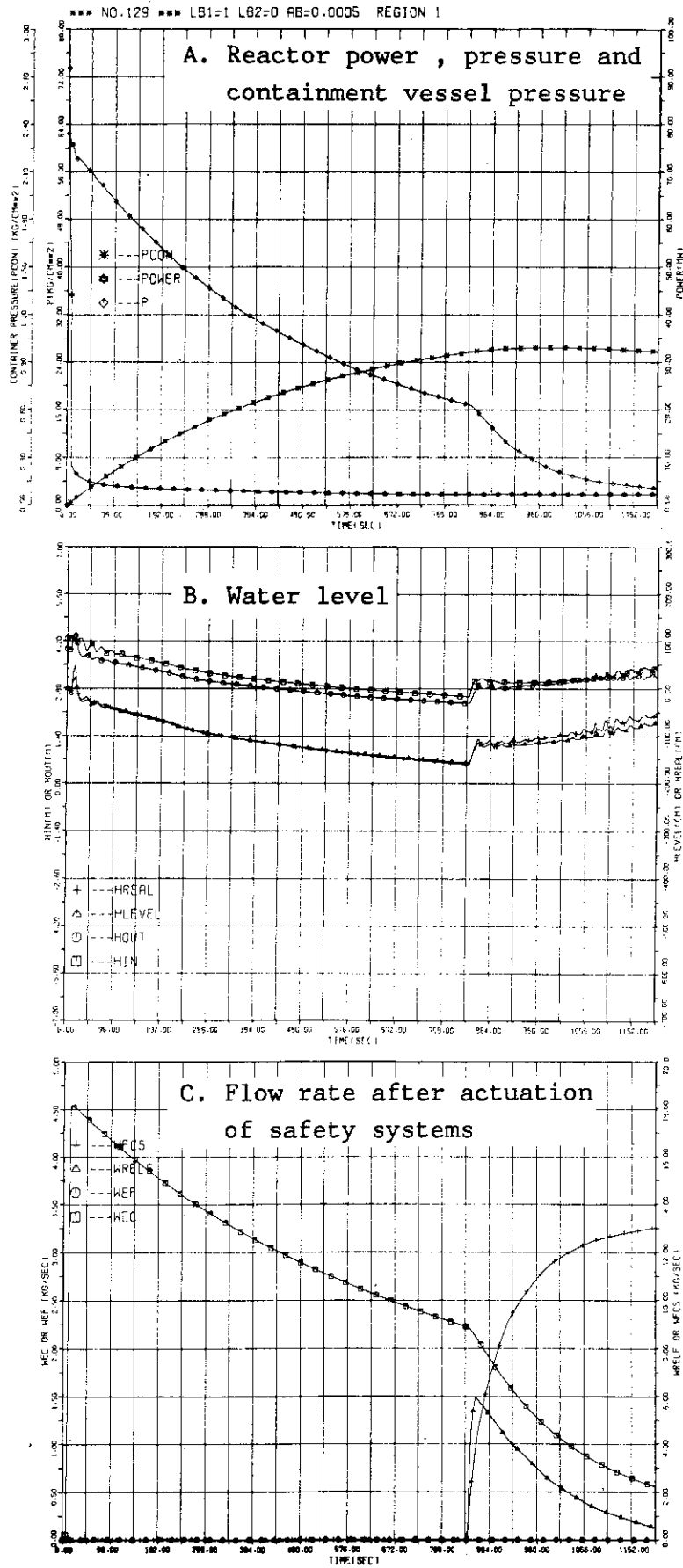


Fig.3.4 Steam dome break (break area 5cm²)

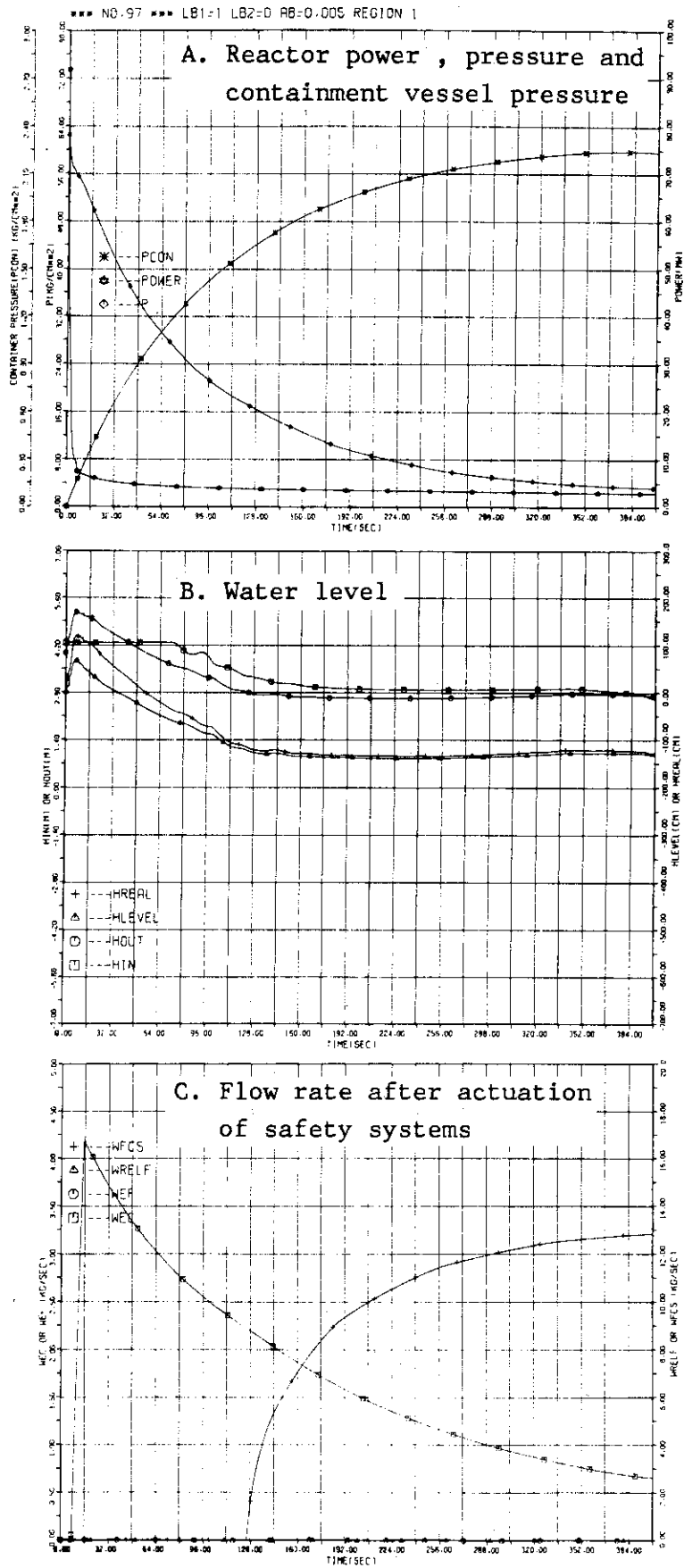


Fig.3.5 Steam dome break (break area 50cm²)

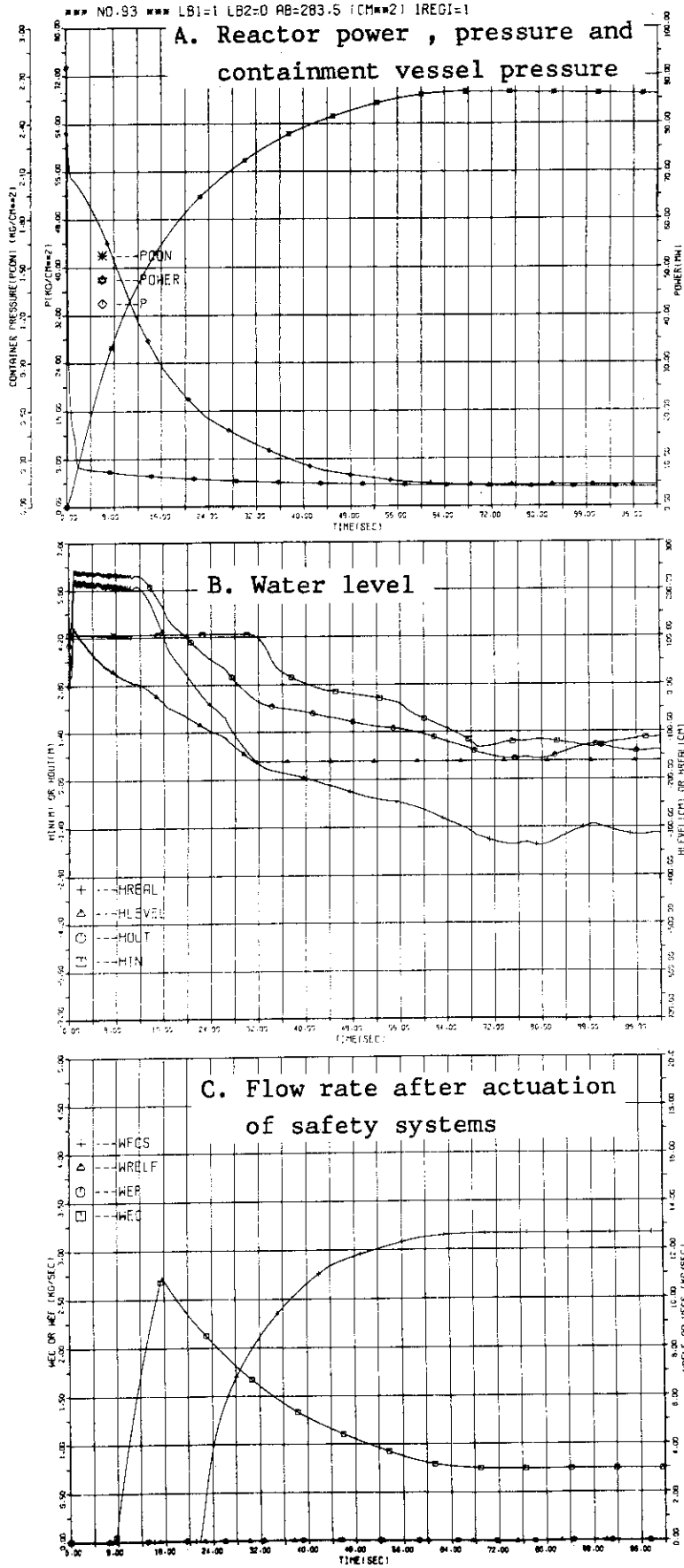


Fig.3.6 Main steam pipe break (break area 283cm²)

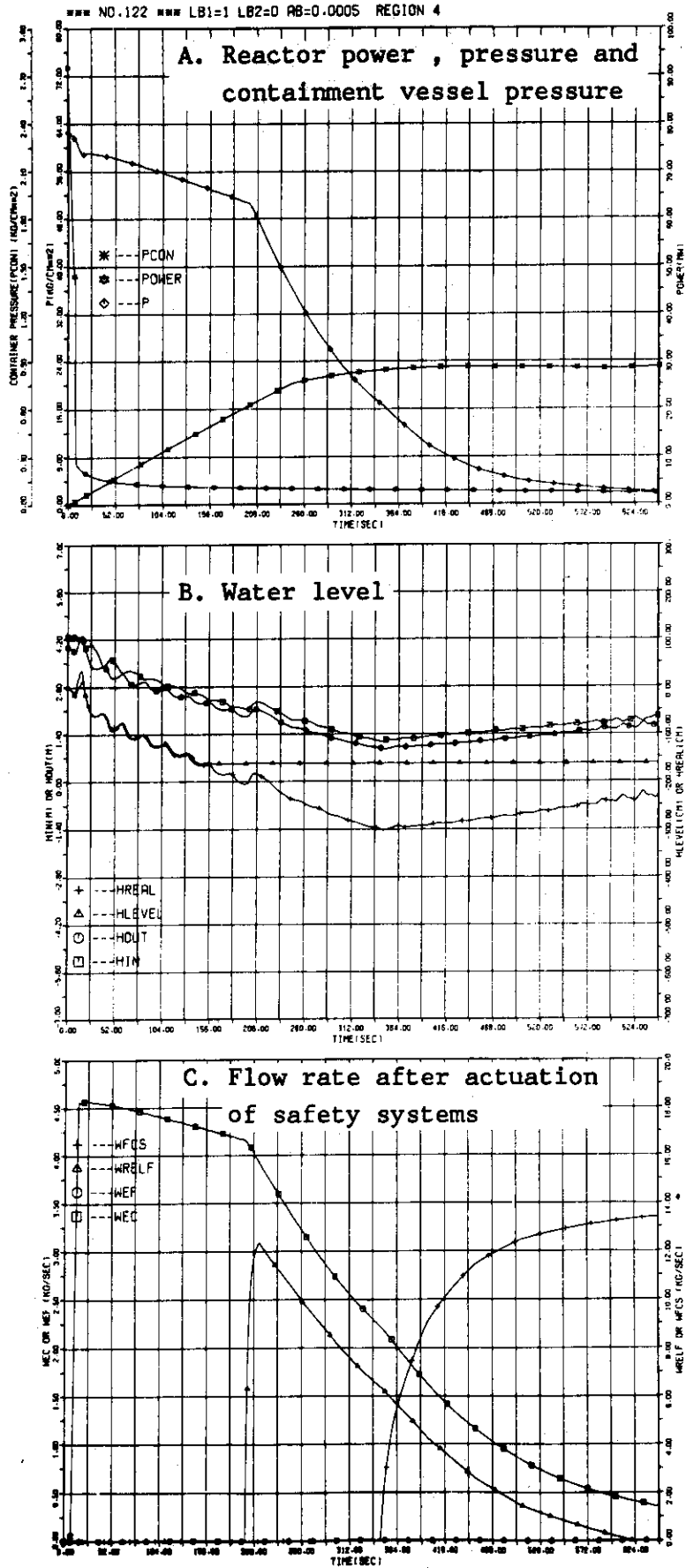


Fig.3.7 Downcomer break (break area 5cm²)

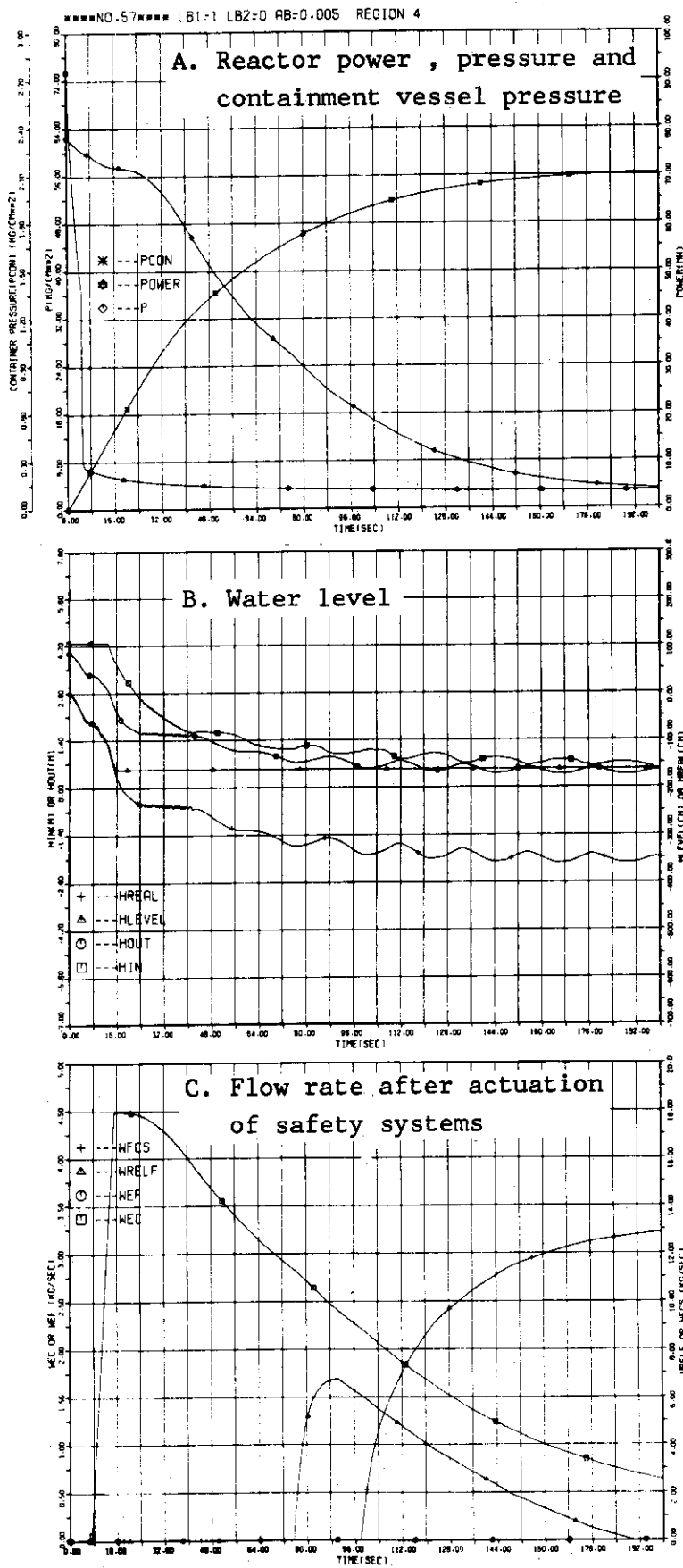


Fig.3.8 Downcomer break (break area 50cm²)

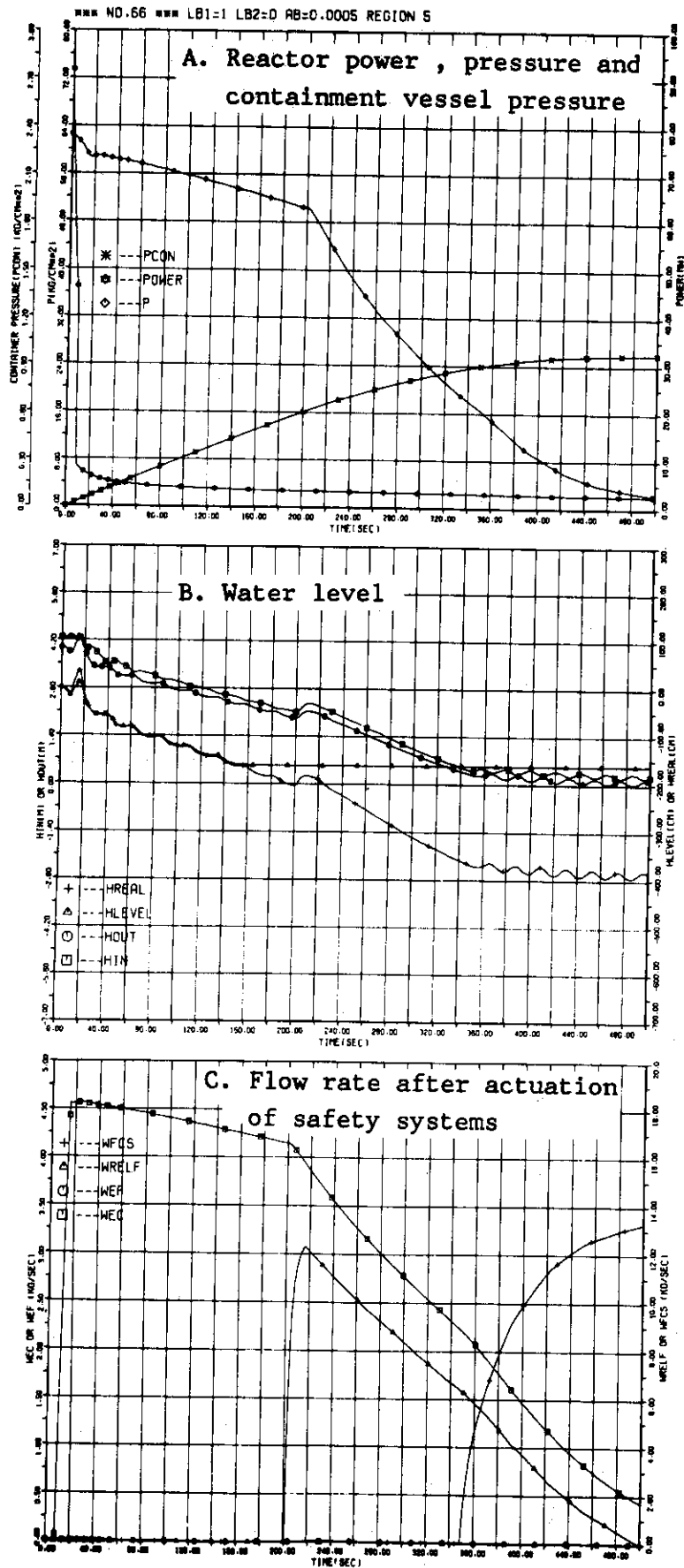


Fig.3.9 Lower plenum break (break area 5cm²)

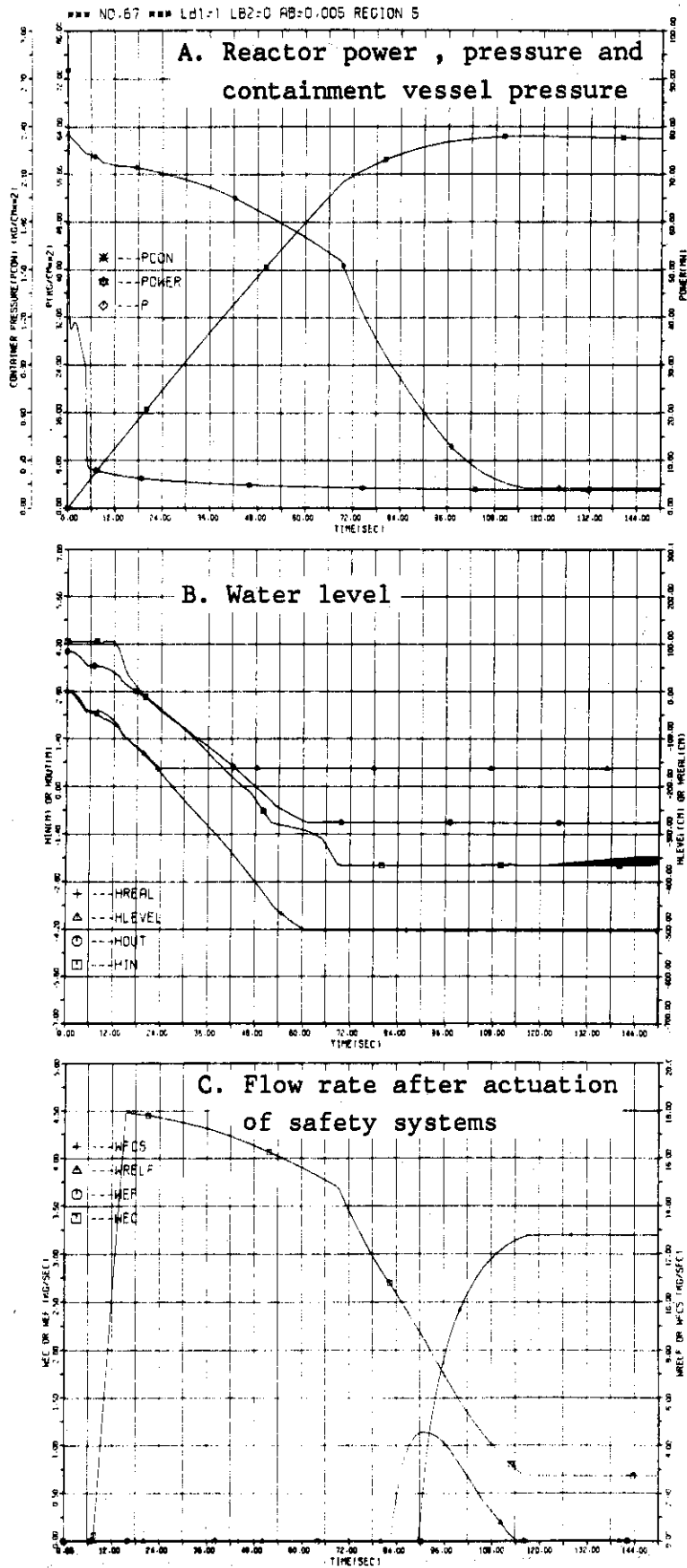


Fig.3.10 Lower plenum break (break area 50cm²)

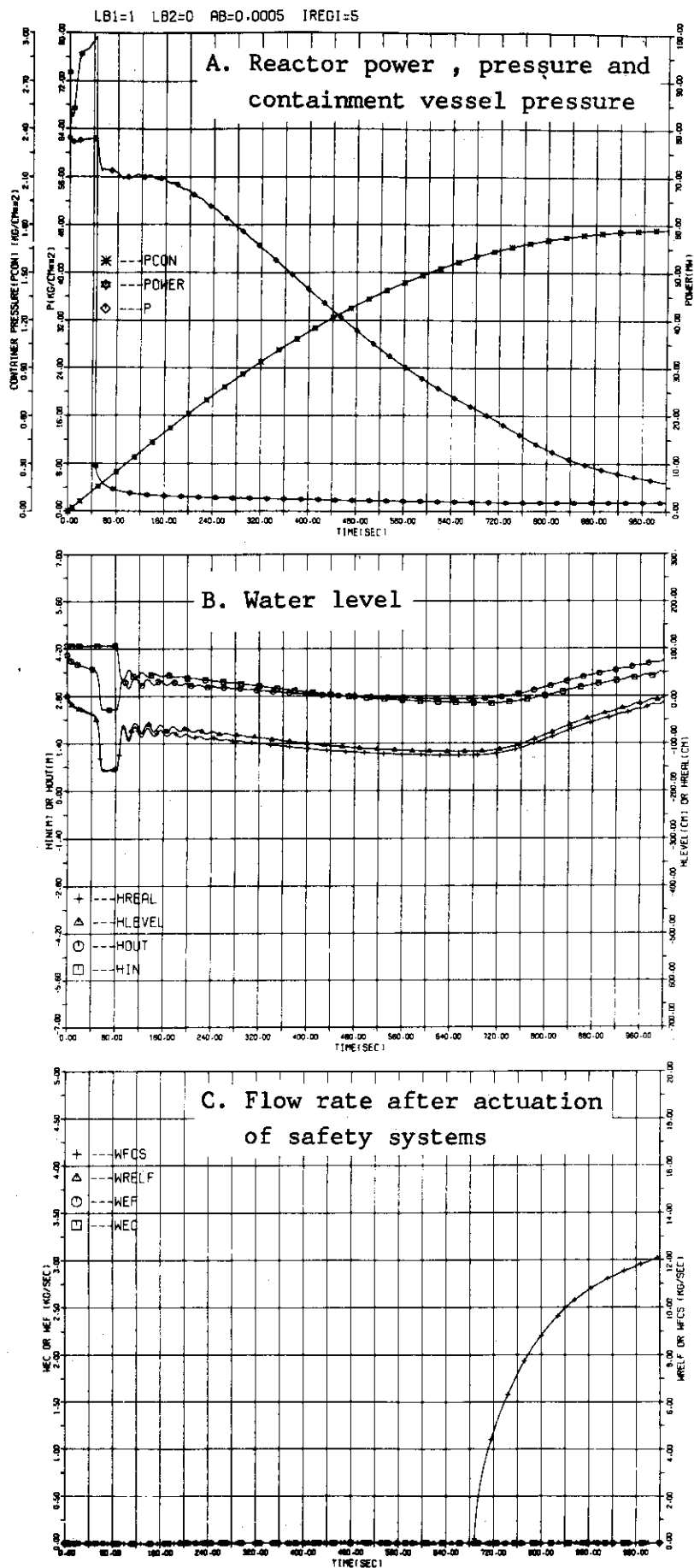


Fig.3.11 Lower plenum break (break area 5cm²)
-Without staion power loss-

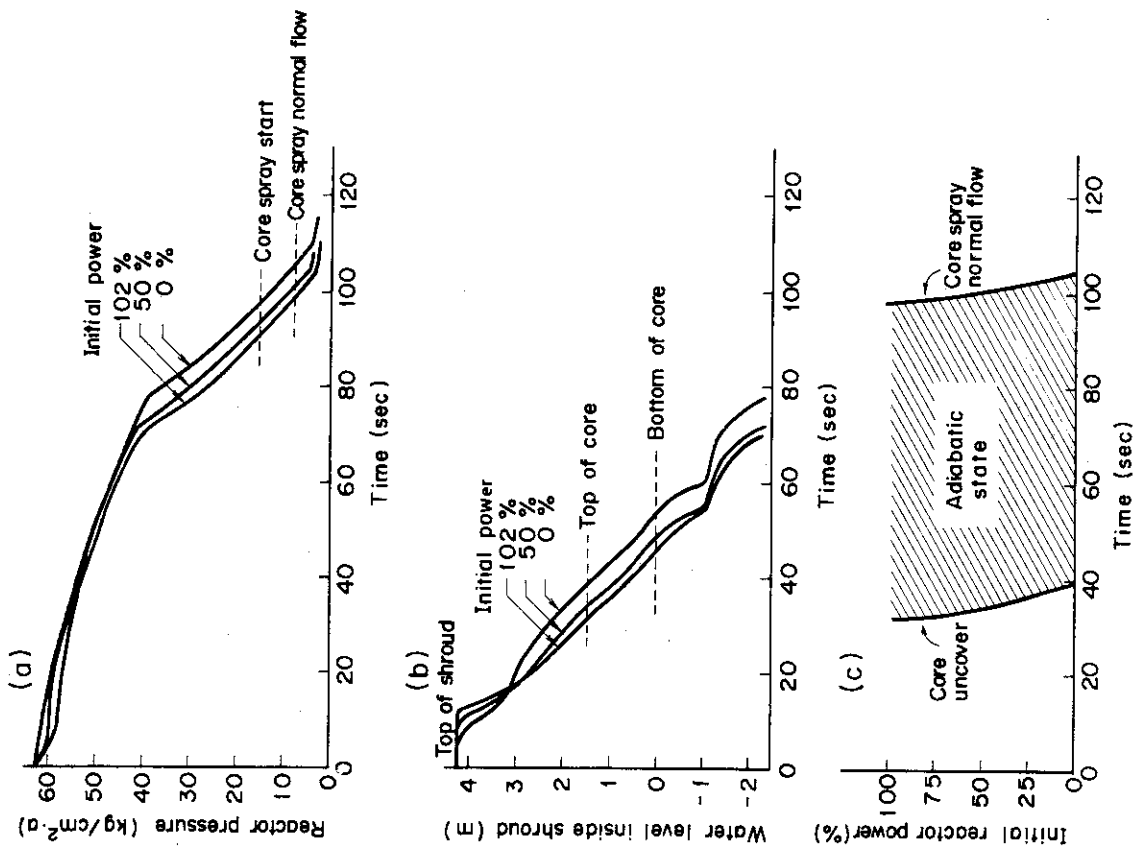


Fig. 3.12 Effect of initial reactor power (break area 50cm²)

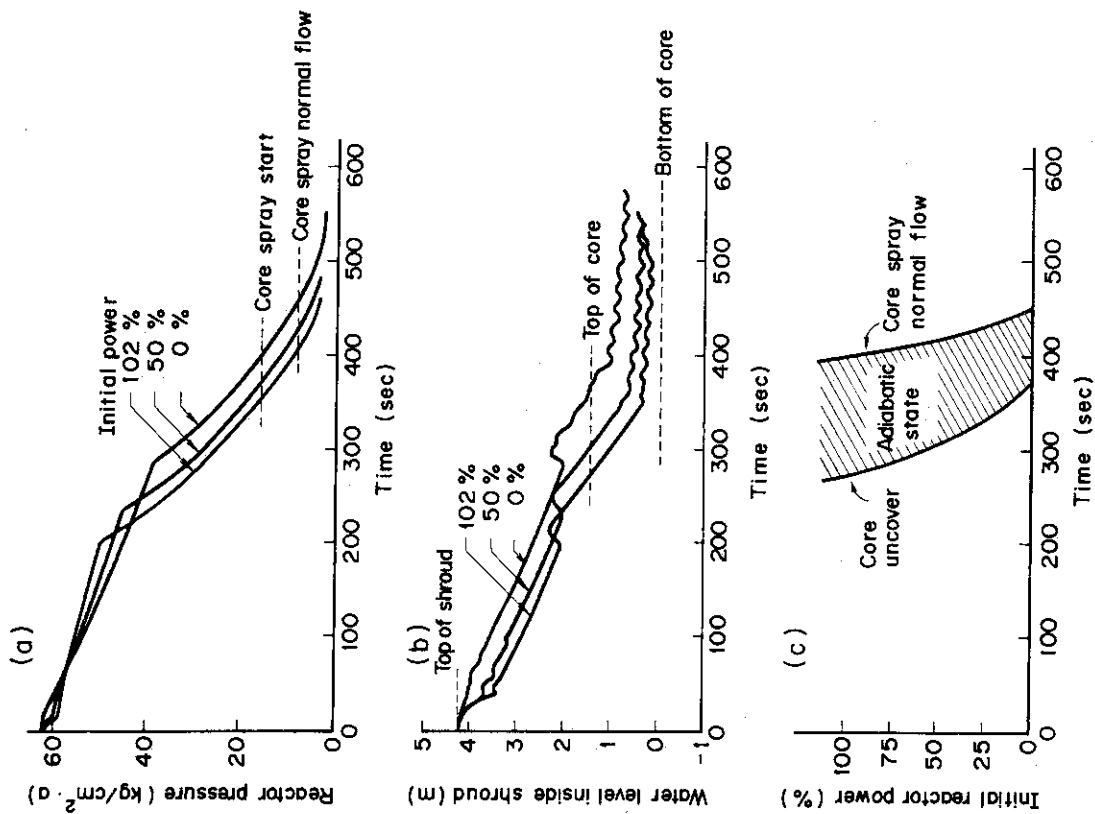


Fig. 3.13 Effect of initial reactor power (break area 5cm²)

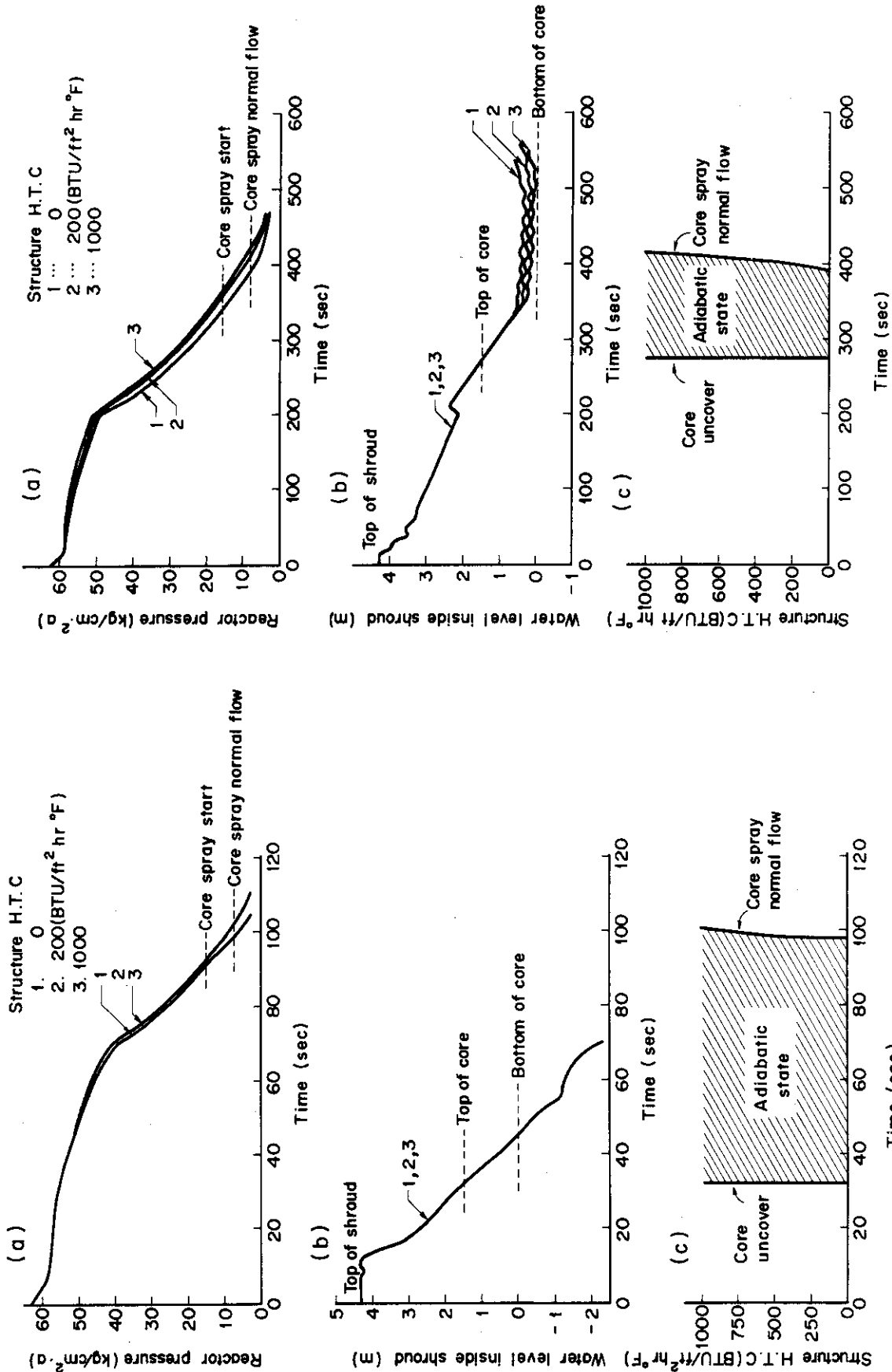


Fig.3.14 Effect of structure H.T.C (break area 50 cm²)

Fig.3.15 Effect of structure H.T.C (break area 5 cm²)

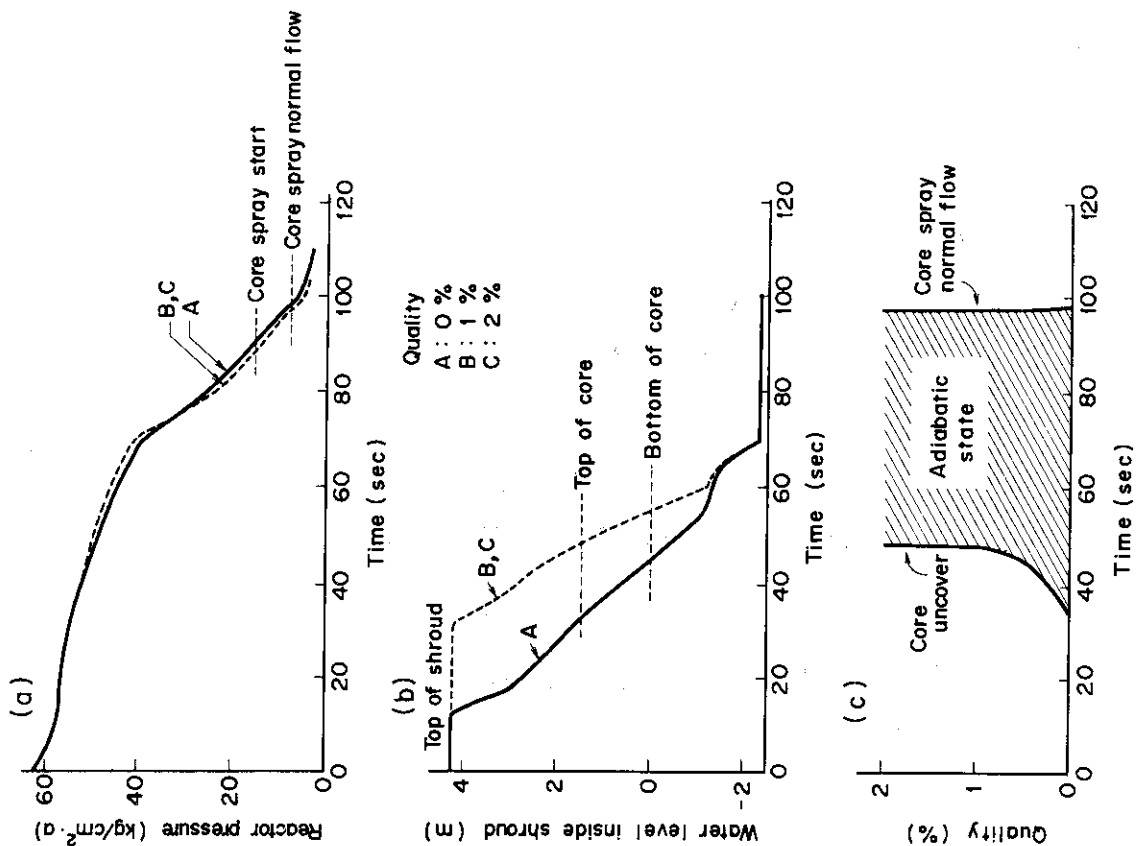


Fig.3.16 Effect of quality with loss of recirculation pump head (break area 300cm²)

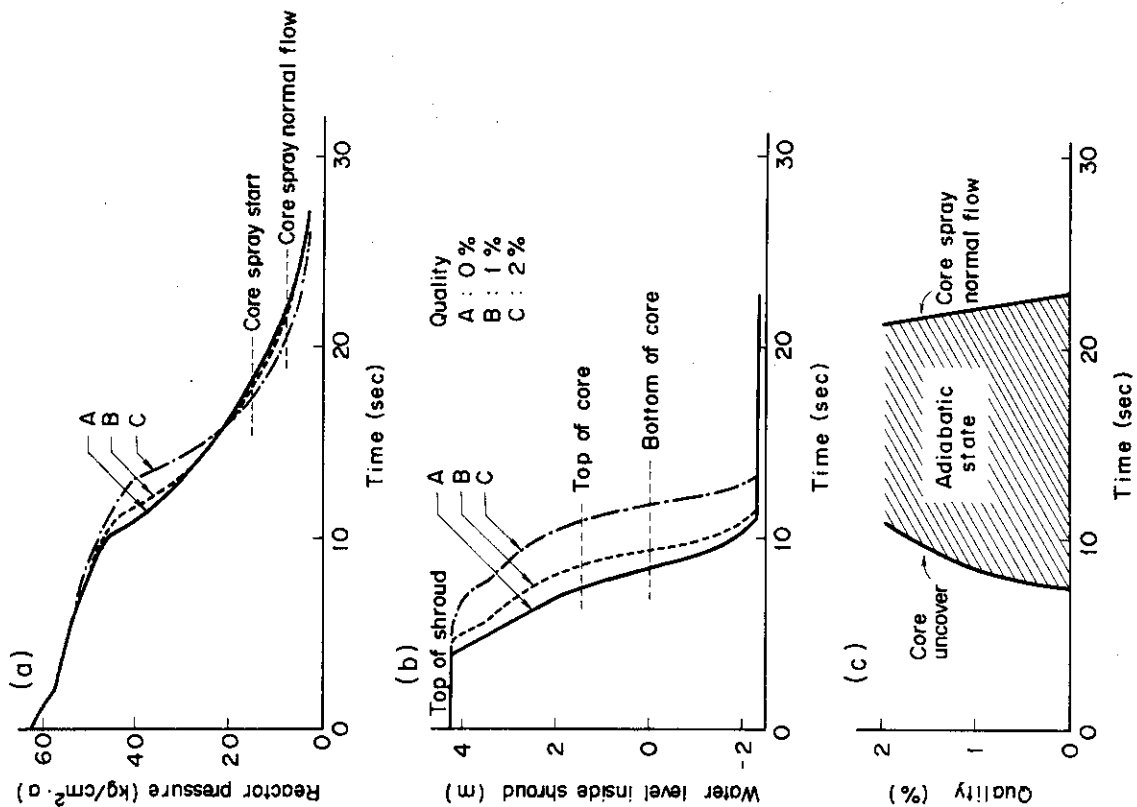


Fig.3.17 Effect of quality with loss of recirculation pump head (break area 50cm²)

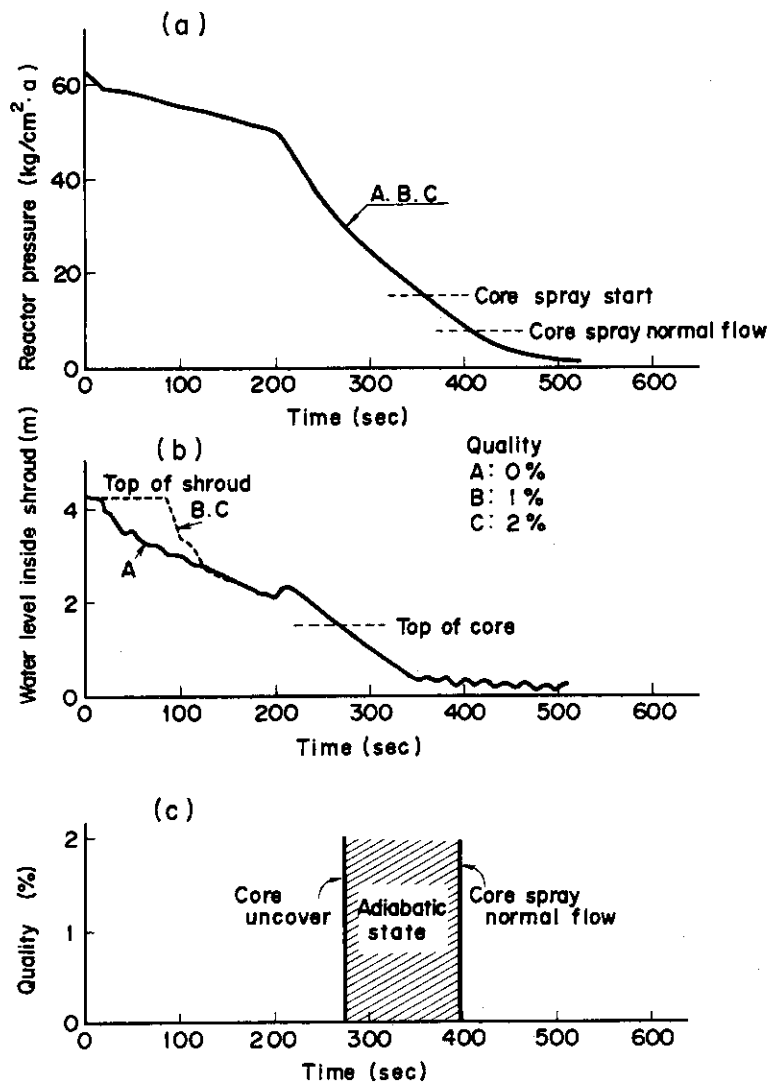


Fig.3.18 Effect of quality with loss of recirculation pump head (break area 5 cm²)

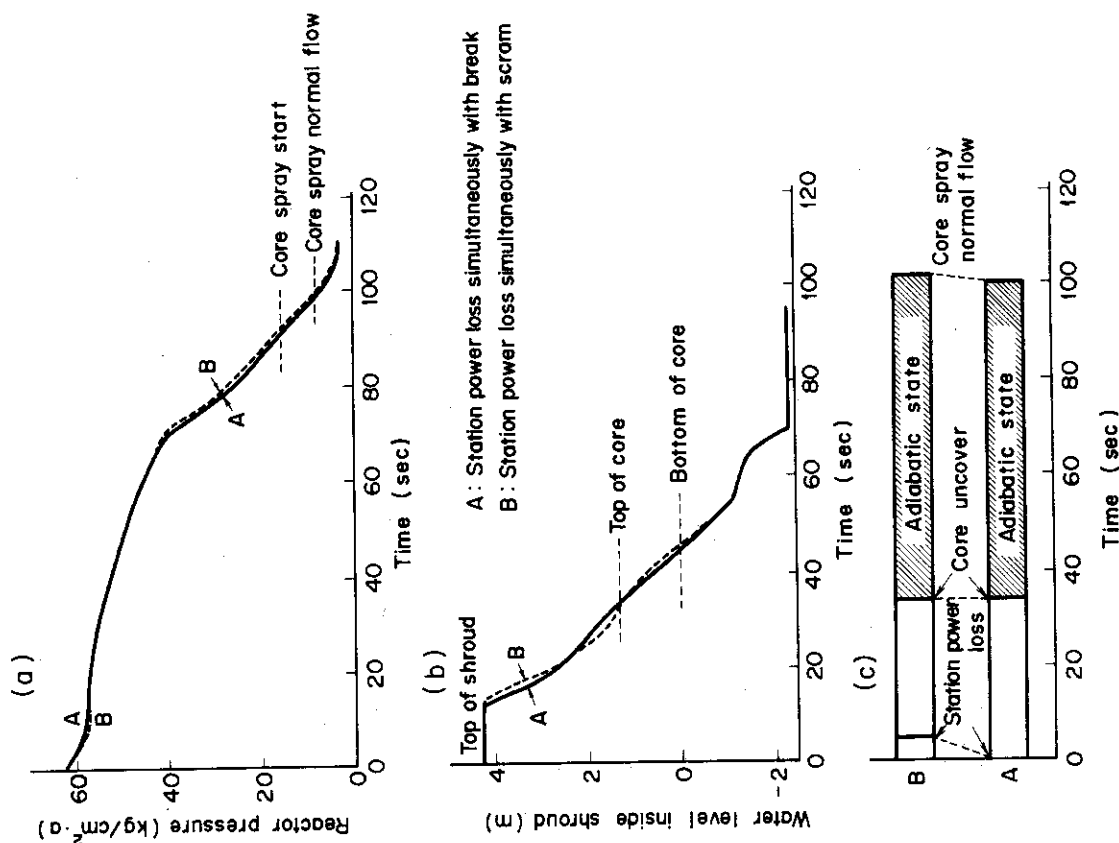


Fig.3.19 Effect of station power loss time (break area 50cm²)

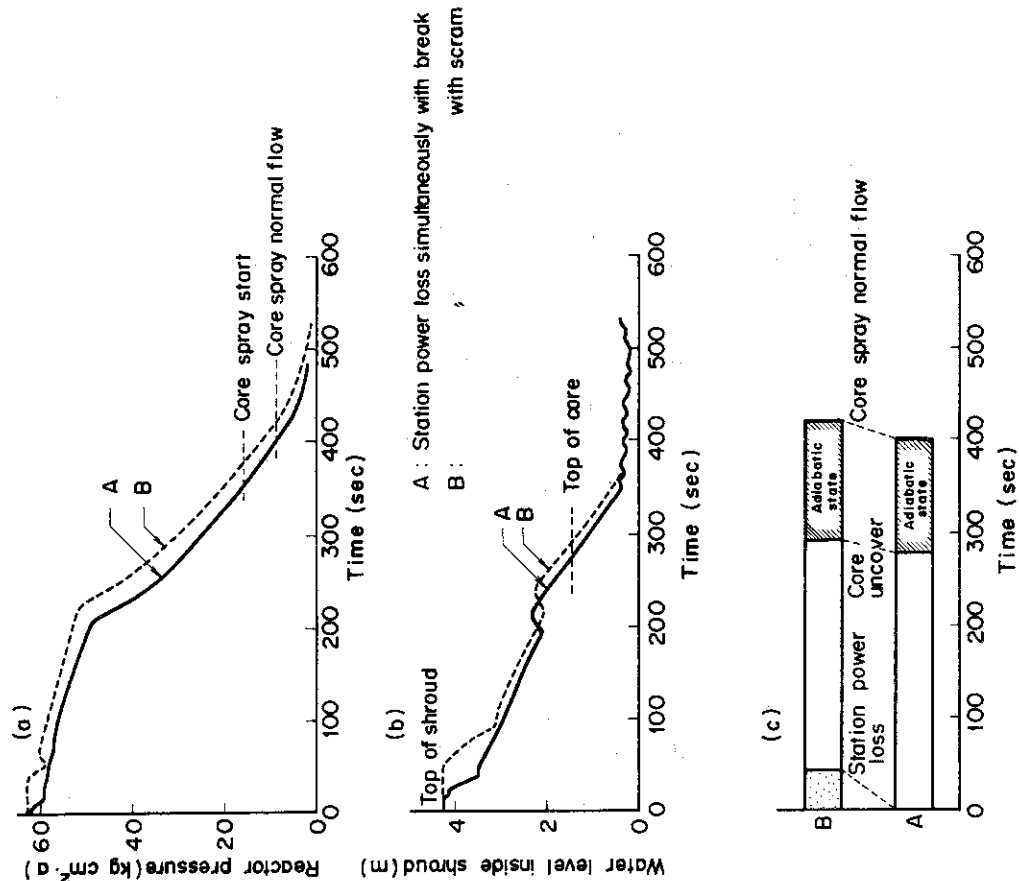


Fig.3.20 Effect of station power loss time (break area 5cm²)

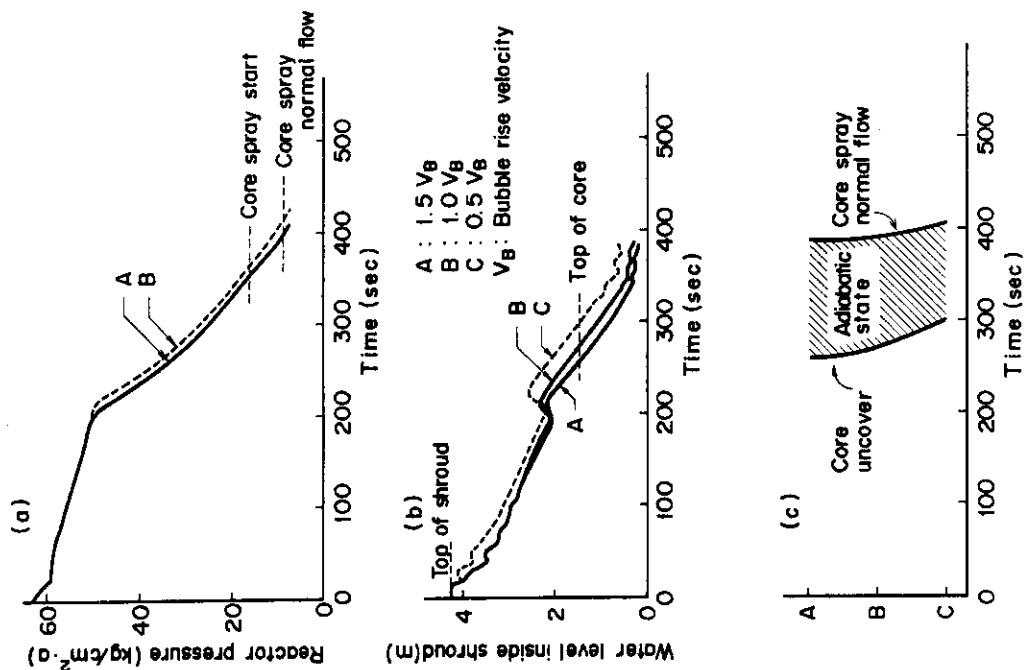


Fig. 3.21 Effect of bubble rise velocity (break area 50 cm²)

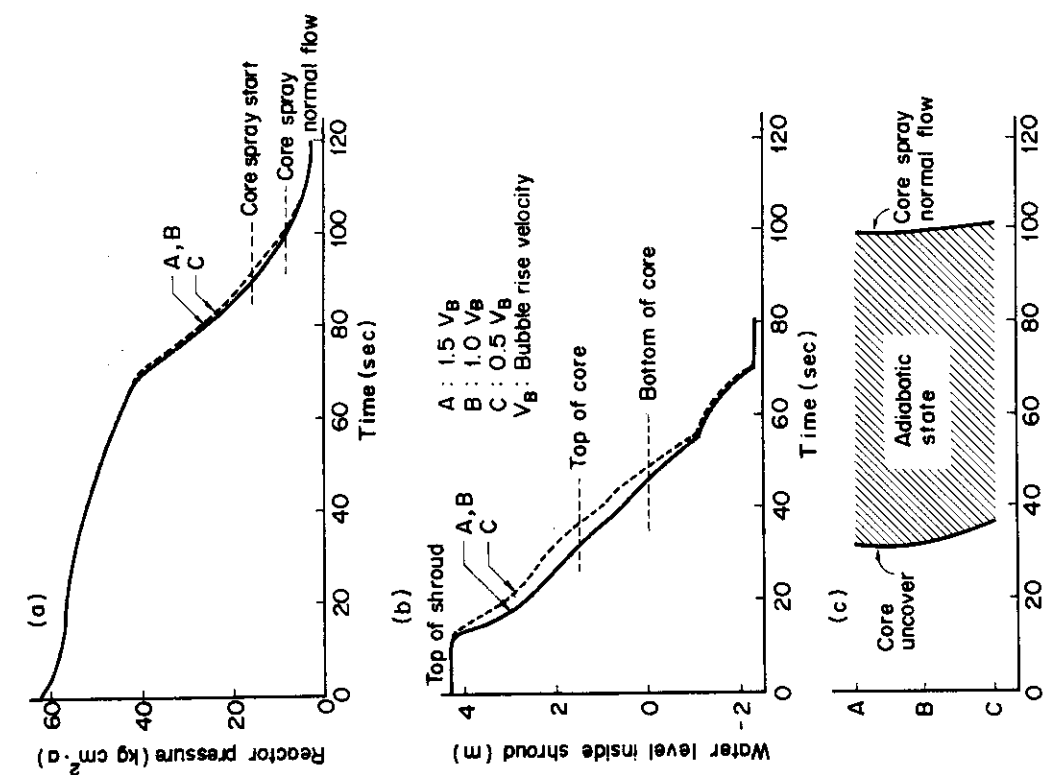


Fig. 3.22 Effect of bubble rise velocity (break area 5 cm²)

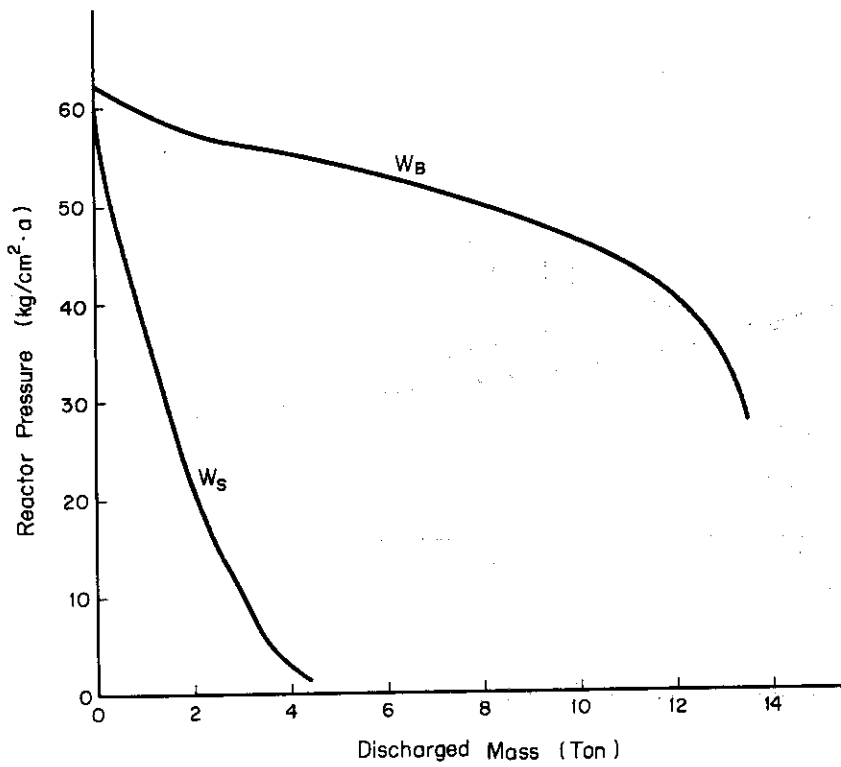


Fig.3.23.b Discharged mass vs. reactor pressure

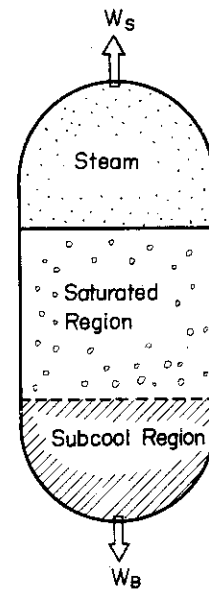


Fig.3.23.a Simple model

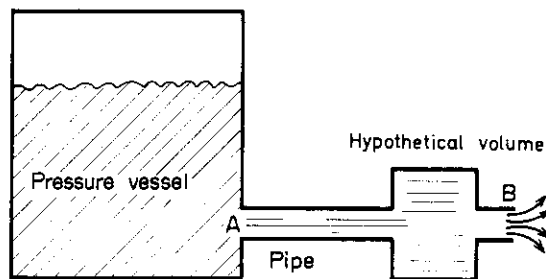


Fig.3.24 Model of blowdown through pipe

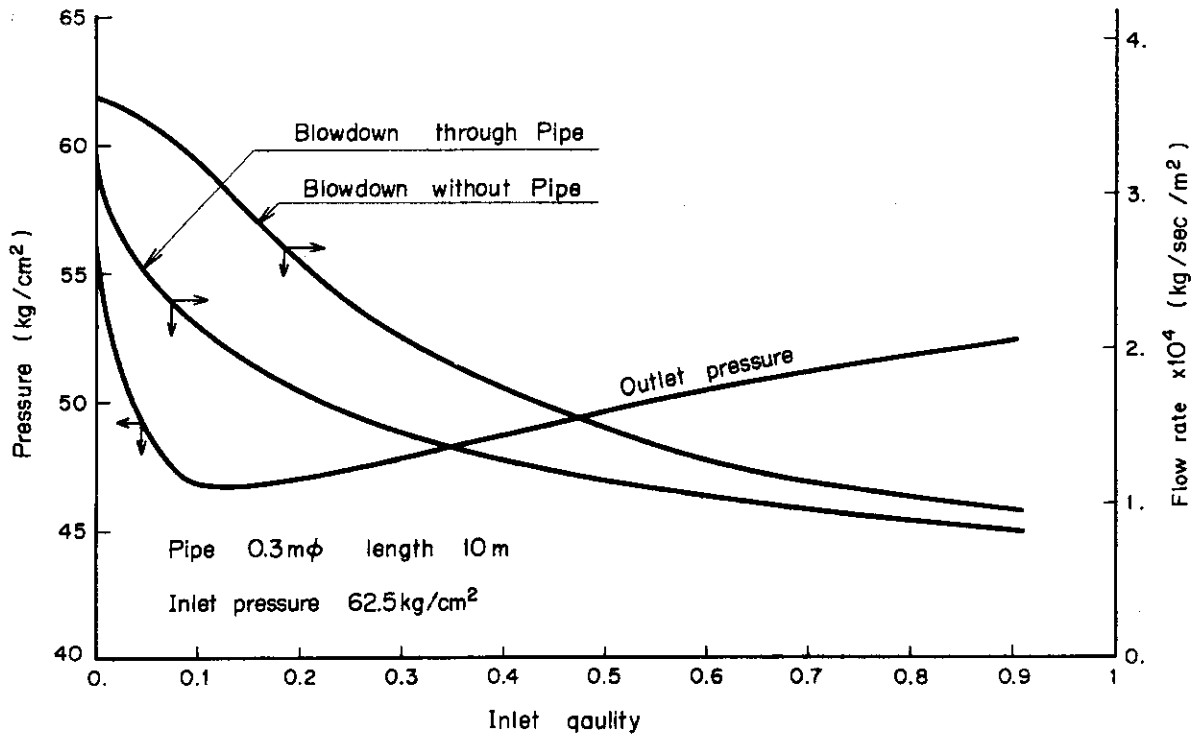


Fig.3.25 Outlet pressure and blowdown flow rate vs. inlet quality

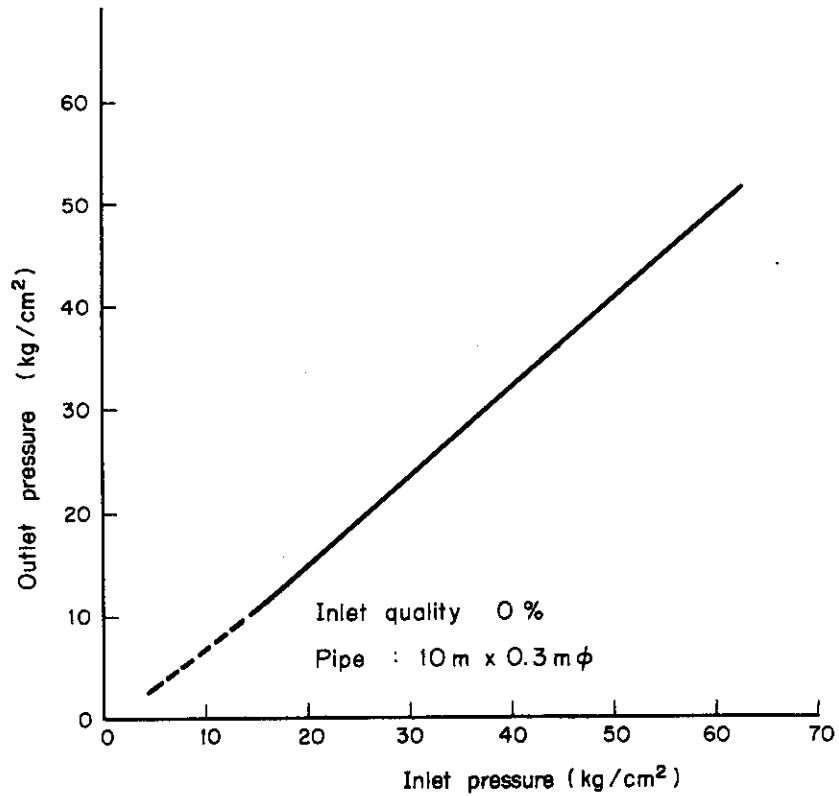


Fig.3.26 Outlet pressure vs. inlet pressure

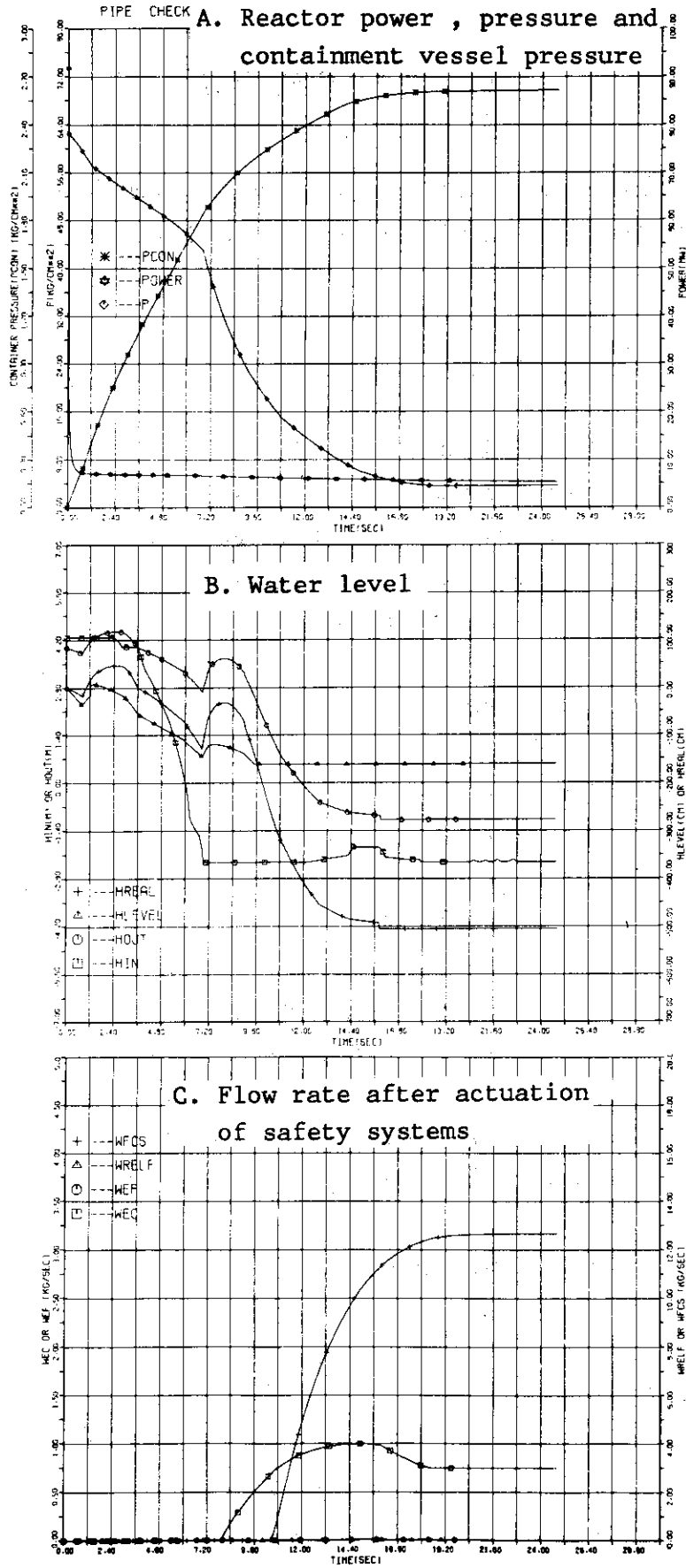


Fig.3.27 Recirculation pipe break

4. コード使用法

JPLEAKの入力変数には次の項目が必要である。但し安全系統に係わる入力（単一故障条件等）は前述のCONDIで行う。また各領域の高さ、体積等に関してはSTEP-1の状態における値である。

1

TITLE	タイトル
-------	------

2

1	Q0	原子炉定格熱出力	(kcal/s)
2	WP0	定格再循環流量	(kg/s)
3	P0	原子炉定格圧力	(kg/cm ² ·a)
4	WS0	定格主蒸気流量	(kg/s)
5	XCU	キャリーアングクオリティ	(-)

3

1	V10	領域1の体積	(m ³)
2	V20	領域2 "	"
3	V30	領域3 "	"
4	V40	領域4 "	"
5	V50	領域5 "	"
6	VBOTOM	下部プレナムの再循環パイプ入口以下の体積	(m ³)
7	V4L	給水スパーチャーから水位計取出口までの体積	(m ³)
8	V201	領域2のシュラウド出口下端までの体積	(m ³)
9	V301	領域3のシュラウド内側から外側への出口下端までの体積	(m ³)
10	V302	領域3のシュラウド内側から外側への出口上端までの体積	(m ³)
11	V303	領域3の上部に領域7を設けるときの基準体積	(m ³)
12	V100	領域1の主蒸気管出口高さ以上の体積	(m ³)

4

1	A1	領域1の平均断面積	(m ²)
2	A2	領域2 "	(m ²)
3	A3	領域3 "	(m ²)
4	A4	領域4 "	(m ²)
5	A5	領域5 "	(m ²)
6	HD2	領域2の等価直径	(m)
7	HD3	領域3 "	(m)
8	HD7	領域7 "	(m)

5

1	FUELH	燃料有効長	(m)
2	SPRAYH	燃料下端から炉心スプレイまでの高さ	(m)
3	HFEED	給水スパージャー	(m)
4	HDOWN	圧力容器内底からダウンカム下端までの高さ	(m)
5	HTOTAL	圧力容器全内高	(m)
6	HZERO	圧力容器内底から燃料下端までの高さ	(m)
7	HBASE	自然循環水頭計算基準面から燃料下端までの高さ	(m)
8	HLEV	燃料下端から水位計取出口までの高さ	(m)
9	H303	領域 3 と 7 の境界位置 (燃料下端を基準)	(m)

6

1	BETA0	実効遅発中性子割合	
2	BETA(i)	(i = 1, 6) 遅発中性子割合	
3	RAM(i)	(i = 1, 6) 崩壊定数	(sec ⁻¹)
4	ROWROD	スクラム挿入反応度	(△k/k)

7

1	JMAX	燃料半径方向分割数	(≤ 10)
2	JLMAX	燃料軸方向分割数	(≤ 20)
3	JFA	燃料軸方向出力分布の入力データ数	(≤ 20)
4	LEVI	シュラウド内側の水位計算入力組数	(≤ 10)
5	LEVO	外側	(≤ 10)
6	IPV	圧力容器を高さ方向に分割するときのノード数	(≤ 30)
7	IST	構造材の入力ノード数	(≤ 30)

8

FA(i) (i = 1, JFA) 軸方向出力分布

9

1	RF	燃料ペレット半径	(m)
2	RCO	被覆管外半径	(m)
3	RCI	被覆管内半径	(m)
4	FUELN	燃料棒数	
5	HGAP	燃料ギャップ熱伝達係数	(Kcal/m ² ·s·°C)

10

1	VT2(i)	(i = 1, LEVI) シュラウド内側の体積	(m ³)
2	ALT2(i)	(") VT2 に対応する高さ (炉心下端を 0)	(m)

11

1	VT3(i)	(i = 1, LEVO) シュラウド外側の体積	(m ³)
2	ALT3(i)	(") VT3 に対応する高さ (炉心下端を 0)	(m)

12

1	SPV(i)	(i=1, IPV) 圧力容器内側伝熱面積	(m^2)
2	CPV(i)	(") 圧力容器熱容量	(Kcal/°C)
3	RFLUID	圧力容器と冷却水間の熱抵抗	($m^2 \cdot s \cdot ^\circ C / Kcal$)
4	RGAS	" 蒸気 "	" "

13

1	SMIS(i)	(i=1, IST) 構造材伝熱面積	(m^2)
2	CMIS(i)	(") 構造材熱容量	(Kcal/°C)
3	RMISF	構造材と冷却水間の熱抵抗	($m^2 \cdot s \cdot ^\circ C / Kcal$)
4	RMISG	" 蒸気の "	(")

14

1	CONST1	炉心スプレイによる蒸気凝縮系数	$0.0 \leq CONST1 \leq 1.0$
2	CONST2	給水系による蒸気凝縮系数	$0.0 \leq CONST2 \leq 1.0$

15

1	PH0	再循環ポンプ揚程定格値	(kg/m^2)
2	S	$\sum_i L_i / A_i$	(m^{-1})
3	BETAP	高さ方向のクオリティの分布を考慮したときのポンプ部の平均クオリティに対する割合	(-)
4	TAUP	電源喪失時のポンプ揚程減衰時定数	(sec)
5	XPO	ポンプ揚程を喪失せしめるポンプ部流体クオリティ	(-)

以上はプラントの定数に関する値であるが、これ以降は計算条件である。

16

1	Q	原子炉出力, 定格で 1.0
2	WP	再循環流量, 定格で 1.0
3	ALF2	領域 2 の平均ボイド率

17

1	AB	破断口面積	(m^2)
2	CD	放出係数	(-)
3	HLEAK	破断口位置, 燃料下端を基準	(m)
4	IREGI	破断口の含まれる領域	

18

1	TMAX	計算時間	(sec)
2	TPLOT	プロッターに書く時間	"
3	DT	タイムメッシュ	"
4	DT10	"	"
5	DT20	"	"
6	DT30	"	"

19

- | | | | |
|---|-------|-------------------------|-------|
| 1 | T10 | DTを用いて計算する時間(0~T10) | (sec) |
| 2 | T20 | DT10を用いて計算する時間(T10~T20) | " |
| 3 | T30 | DT20を用いて計算する時間(T20~T30) | " |
| 4 | KW | 書出し間隔 | |
| 5 | KW1 | " | |
| 6 | TLMKW | KWからKW1になるときの時間 | (sec) |

次にCONDIから次のデータを入力する。

20

- | | | | |
|---|-----|---------|---|
| 1 | LB1 | スクラムモード | { 0 : 時間を指定
1 : スクラム条件に従う |
| 2 | LB2 | 電源喪失モード | { 0 : 時間で指定
1 : 電源喪失なし
2 : スクラムと同時に電源喪失 |

次の3~15は { 1 : 正常
0 : 故障 } である。

- | | | |
|----|--------|------------------------------|
| 3 | M1 | 原子炉隔離等駆動機構 |
| 4 | M4 | 非常用圧力逃し弁-1 駆動機構 |
| 5 | M4PRIM | " -2 " |
| 6 | M5 | " -3 " |
| 7 | M5PRIM | " -4 " |
| 8 | M6 | 非常用凝縮器系バルブ-1 駆動機構 |
| 9 | M7 | " -2 " |
| 10 | M8 | 炉心スプレイバルブ駆動機構 |
| 11 | M9 | ジョッキポンプモーター |
| 12 | M10 | ファイアポンプ1Aモーター |
| 13 | M11 | 炉心スプレイポンプ1Aモーター |
| 14 | M12 | 主給水ポンプモーター |
| 15 | M13 | 非常用給水ポンプモーター |
| 16 | LOAD | 主蒸気系制御モード { 0 : 手動
1 : 自動 |

21

- | | | | |
|---|-----|--------------------|-------|
| 1 | T1 | LB2=0のとき電源喪失時間をセット | (sec) |
| 2 | TSC | LB1=0のときスクラム時間をセット | (sec) |

次の3~5は { 1 : 正常
0 : 故障 } である。

- | | | |
|---|------|---------------|
| 3 | FDG | 非常用ディーゼル発電機 |
| 4 | FDE1 | ファイアポンプ1Bエンジン |

5 FDE2 炉心スプレイポンプ1Bエンジン

以上の入力形式はTITLEが20A4, 実数型がE10.0, 整数型がI5である。制御系統および安全系統の定数はCONDIに組込まれている。

JPLEAKはカード枚数約4500, 計算時間はFACOM-230-75で0.2秒のタイムメッシュで500秒まで計算すると約40秒を要する。コアメモリは図形出力を含めて約120KWである。Fig. 4.1 に計算フローチャートを示す。また計算例を付録に示す。

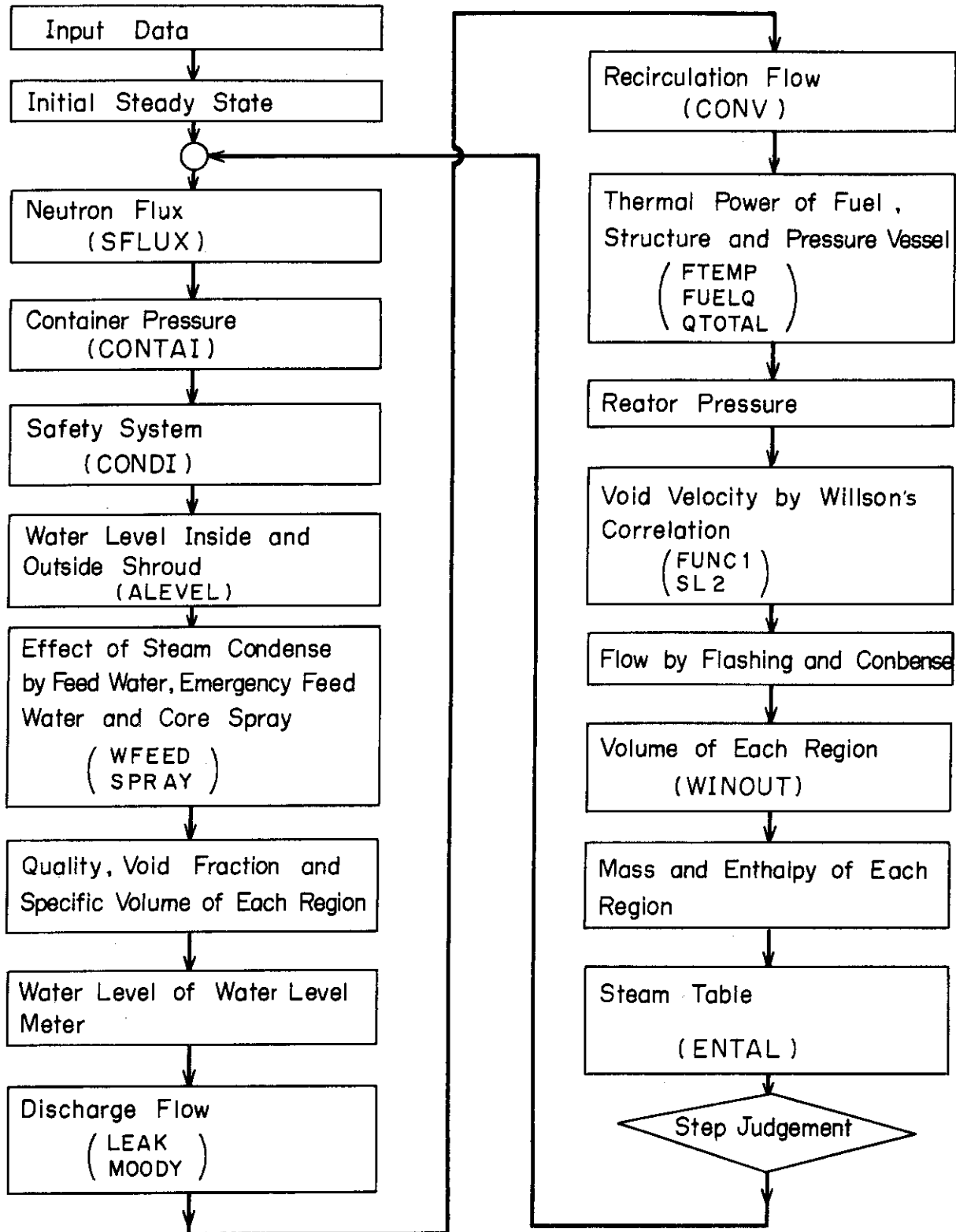


Fig. 4.1 Main program flow chart [(): SUBROUTINE or FUNCTION Name]

5. 検討及び結論

この解析モデルの問題点としては、シュラウドを境界として同じ側の領域（領域2と5，3と4）が飽和又は未飽和になれば一領域に合体する方式を用いているためにその時点で質量，エンタルピ，クオリティ，ボイド率等が不連続になることである。しかし流量は連続であり，圧力の変化率は飽和領域の質量，体積，発（吸）熱量と流量により決まるため，前記の不連続量の影響を受けることはない。不連続量の改善には合体方式をとらないで独立した領域のまま扱えばよいが，この場合は領域4，5の体積が一定であるため気泡の生成，消滅等に伴う体積変化に対し2.2.2節でのべた方式を領域2，3，4，5に対して適用しなければならない。

Wilsonの気泡離脱速度は自由水面に対し用いるものであるが，今回の計算では初期の強制循環ポンプ回転時から用いた。これは計算が主に破断と同時に電源喪失という場合を扱っているために小径口の破断時でも強制循環ポンプの揚程は約10秒以内に喪失しており，長時間を要する過渡現象に与える影響が少ないからである。このことからいえばFig. 3.11に示した電源が喪失しない場合はBankof等のスリップ比のモデルを用いるべきである。但しこの図の場合は給水ポンプが動作中であるために比較的早い時期に炉心全体がサブクールになり気泡の問題はなくなる。

次に計算時のステップ移行条件であるが，領域の体積が減少して0に近づいた場合一例えば下部破断時にはダウンコマ部の体積は0になる—その領域のエンタルピ等の量は計算誤差が増大すると考えられる。従って，体積がある一定値以下になるとステップ移行の判定条件からその領域をはずし，その領域の計算も簡略化する必要がある。このような制限を設けなければ例えばSTEP-3とSTEP-4でタイムメッシュ毎にステップが移行するという現象が見られた。ステップ移行時には2.3節にあるように移行時の条件が必ずしも連続ではなく，又前述の如く不連続量が表われる場合もあるためにステップの過度の移行は計算誤差の蓄積を増大させる。従って原子炉の形状にあった制限値が必要である。

3.5節の感度解析では炉心が冷却水面上に露出し燃料棒表面からの熱伝達が断熱状態になる時から炉心スプレイ流量が定格値に達するまでの期間の長さの影響を及ぼす要因について考察した。この結果中破断では再循環ポンプの揚程が喪失する流体クオリティの効果があり，小破断では破断時の運転出力の効果大きい。その他の場合には大きな影響はない。しかしこれは個々の要因についてであり複数個の要因が重なればその効果は小さくないと考えられるので適正に評価した値を用いる必要がある。

3.6節でのべた定格温度，圧力（零出力）における放出量と原子炉圧力の関係はこのようなブローダウン現象時の圧力変化等の推測には極めて有用である。

このコードでは原子炉内を状態に応じて分割し9つの型を想定するなど比較的簡単なモデルを用いており前述のような問題点もあるが，計算時間が短いため中小破断のような破断口面積をパラメータとした破断スペクトル解析および安全系統の多くの機器の単一故障等極めて多量の計算ケースを必要とする場合に適している。

今後は実験データ等を考慮して上記特徴を生かしモデルを複雑化することなく実効的な形で修正し実用性の向上をはかる予定である。

謝 辞

本解析コードの作成に当たっては、原子炉第1課、第2課、技術課および計算センターの方々の協力を得た。また開発室では石塚 信室長（現技術課）をはじめ松原邦彦氏（現照射2課）、山下 修氏（現原子炉第2課）の多大な協力を得た。小林岩夫室長には種々の助言を得た。以上の方々に対し深甚なる謝意を表する。

Reference

- 1) Slifer, B.C and Hench, J.E : NEDO-10329 (1971)
- 2) Lyons, M.F et al : ANS Trans. 7(1) (1964)
- 3) Ishikawa, M and Kuge, Y et al : JAERI-M 3592 (1969)
- 4) Morishima, J and Harayama, Y et al : JAERI-M 2704 (1969)
- 5) Wilson, J.F et al : ANS Trans. 5(1) (1962)
- 6) Moody, F.J : Trans. ASME 134-142 (1965)
- 7) Zaloudek, F.R : HW-77594 (1963)
- 8) Yokobayashi, M and Ishizuka, M et al : JAERI-M 8010 (1978)
- 9) Carmichael, C.F and Marko, S.A : IDO-17252 (1969)
- 10) Moody, F.J : J.Heat Transfer 285-295 (1966)
- 11) Meclain, C.H : "Fluid flow in pipes" The Industrial Press(1963)
- 12) Ishikawa, M and Onishi, N et al : JAERI-M 5719 (1974)

今後は実験データ等を考慮して上記特徴を生かしモデルを複雑化することなく実効的な形で修正し実用性の向上をはかる予定である。

謝 辞

本解析コードの作成に当たっては、原子炉第1課、第2課、技術課および計算センターの方々の協力を得た。また開発室では石塚 信室長（現技術課）をはじめ松原邦彦氏（現照射2課）、山下 修氏（現原子炉第2課）の多大な協力を得た。小林岩夫室長には種々の助言を得た。以上の方々に対し深甚なる謝意を表する。

Reference

- 1) Slifer, B.C and Hench, J.E : NEDO-10329 (1971)
- 2) Lyons, M.F et al : ANS Trans. 7(1) (1964)
- 3) Ishikawa, M and Kuge, Y et al : JAERI-M 3592 (1969)
- 4) Morishima, J and Harayama, Y et al : JAERI-M 2704 (1969)
- 5) Wilson, J.F et al : ANS Trans. 5(1) (1962)
- 6) Moody, F.J : Trans. ASME 134-142 (1965)
- 7) Zaloudek, F.R : HW-77594 (1963)
- 8) Yokobayashi, M and Ishizuka, M et al : JAERI-M 8010 (1978)
- 9) Carmichael, C.F and Marko, S.A : IDO-17252 (1969)
- 10) Moody, F.J : J.Heat Transfer 285-295 (1966)
- 11) Meclain, C.H : "Fluid flow in pipes" The Industrial Press(1963)
- 12) Ishikawa, M and Onishi, N et al : JAERI-M 5719 (1974)

今後は実験データ等を考慮して上記特徴を生かしモデルを複雑化することなく実効的な形で修正し実用性の向上をはかる予定である。

謝 辞

本解析コードの作成に当たっては、原子炉第1課、第2課、技術課および計算センターの方々の協力を得た。また開発室では石塚 信室長（現技術課）をはじめ松原邦彦氏（現照射2課）、山下 修氏（現原子炉第2課）の多大な協力を得た。小林岩夫室長には種々の助言を得た。以上の方々に対し深甚なる謝意を表する。

Reference

- 1) Slifer, B.C and Hench, J.E : NEDO-10329 (1971)
- 2) Lyons, M.F et al : ANS Trans. 7(1) (1964)
- 3) Ishikawa, M and Kuge, Y et al : JAERI-M 3592 (1969)
- 4) Morishima, J and Harayama, Y et al : JAERI-M 2704 (1969)
- 5) Wilson, J.F et al : ANS Trans. 5(1) (1962)
- 6) Moody, F.J : Trans. ASME 134-142 (1965)
- 7) Zaloudek, F.R : HW-77594 (1963)
- 8) Yokobayashi, M and Ishizuka, M et al : JAERI-M 8010 (1978)
- 9) Carmichael, C.F and Marko, S.A : IDO-17252 (1969)
- 10) Moody, F.J : J.Heat Transfer 285-295 (1966)
- 11) Meclain, C.H : "Fluid flow in pipes" The Industrial Press(1963)
- 12) Ishikawa, M and Onishi, N et al : JAERI-M 5719 (1974)

Nomenclature

A	Cross section	m^2
C	Concentration of delayed neutron	—
C_p	Specific heat	$kcal/kg \cdot ^\circ C$
D	Denominator of pressure rate equation	$kcal/kg/cm^2$
g	Acceleration of gravity	m/sec^2
H	{ Water level	m
	{ Heat transfer coefficient	$kcal/m^2 \cdot sec \cdot ^\circ C$
H_D	Hydraulic diameter	m
h_f	Liquid saturated enthalpy	$kcal/kg$
h_g	Steam saturated enthalpy	"
h_{fg}	Heat of vaporization	"
h_F	Feedwater enthalpy	"
h_{EF}	Emergency feedwater enthalpy	"
h_{FCS}	Core spray enthalpy	"
h_s	Liquid subcooled enthalpy	"
J	Joule constant (4269)	$kg \cdot m/kcal$
k	Thermal conductivity	$kcal/m \cdot sec \cdot ^\circ C$
L	Length	m
M_f	Mass of saturated liquid	kg
M_g	Mass of saturated steam	"
M_s	Mass of subcooled liquid	"
\dot{M}_{fg}	Flashing rate	kg/sec
N	Neutron flux	—
N_D	Decay heat	—
P	Reactor pressure	$kg/cm^2 \cdot a$
P_{con}	Containment vessel pressure	$kg/cm^2 \cdot g$
P_{DH}	Driving head of natural circulation	kg/m^2
P_p	" recirculation pump	"
Q	Heat generation rate	$kcal/sec$
s	Laplace operator	sec^{-1}
T	Temperature	$^\circ C$
t	Time	sec
t_s	Elapsed time after shutdown	sec
V	Volume	m^3

V_B	Bubble rise velocity	m/sec
V_F	Fluid velocity	"
v_f	Specific volume of saturated liquid	m^3/kg
v_g	Specific volume of saturated steam	"
v_{fg}	$v_g - v_f$	"
v_s	Specific volume of subcooled water	"
W_B	Blowdown flow rate from break area	kg/sec
W_D	Mixing flow rate at feedwater sparger	"
W_{EC}	Flow rate emergency condenser system	"
W_{EF}	Emergency feedwater flow rate	"
W_F	Feedwater flow rate	"
W_{FCS}	Core spray flow rate	"
W_{fi}	Core inlet flow rate	"
W_{gsw}	Steam flow rate swept out of a region	"
W_p	Recirculation pump flow rate	"
W_s	Main steam flow rate	"
W_{sip}	Flow rate from outside shroud to inside through separator	"
W_{spil}	Flow rate from inside shroud to outside through separator	"
W_{SRP}	Flow rate of relief valve	"
W_{SSV}	Flow rate of safety valve	"
X	Quality	—
X_{cu}	Carry under quality	—
α	Void fraction	—
β	Effective delayed neutron ratio	—
ρ	{ Reactivity	$\Delta k/k$
	{ Density	kg/m^3
τ	Bubble rise time	sec
τ_p	Decay constant of recirculation pump head	"
λ	Decay constant of delayed neutron	sec^{-1}

subscript

0	Initial value
1~7	Region number
av	Average
c	Clad
f	Fuel or saturated liquid

g Saturated steam
p Recirculation pump or pressure
s Subcool
w Coolant

付 録

JPLEAKの計算例を示す。計算条件は破断口面積 5 cm^2 、位置は圧力容器底部、破断と同時に所内電源は喪失する場合である。計算結果の出力のうち入力値、安全系統の作動状況、主要パラメータの過渡変化を参考として付してある。安全系統に関しては任意時間々隔で書出すことができる。過渡時の主要パラメータの記号の意味はすでに述べたが未定義のものは次の通りである。

- WBG : 蒸気の破断放出流量, 破断口が領域1に位置するとき (kg/s)
- WBF1 : シュラウド内側からの破断流体放出流量, 破断口が領域2か5に位置するとき (kg/s)
- WBFO : シュラウド外側からの破断流体放出流量, 破断口が領域3か4に位置するとき (kg/s)
- TWBD : 破断放出流量の積分値 (kg)
- TDWIO : 原子炉に対する入出流量の積分値 (kg)
- VOID : 水面下に含まれる全ボイド量 (m^3)
- VWATR : 原子炉内に存在する水の体積 (m^3)

3.1節でのべたJPDR-IIの安全系統の概念図をFig.A-1に示す。図中のM1, FDE1等は第4章でのべた各機器の正常, 異常の解析条件の入力記号である。主蒸気隔離弁は2個のうち1つで代表させ, その下流にあるバイパス弁M3, M3Pは取扱っていない。炉心スプレイの注入には5つのポンプが使用可能であるが正常時には炉心スプレイポンプ1Aが駆動源となる。

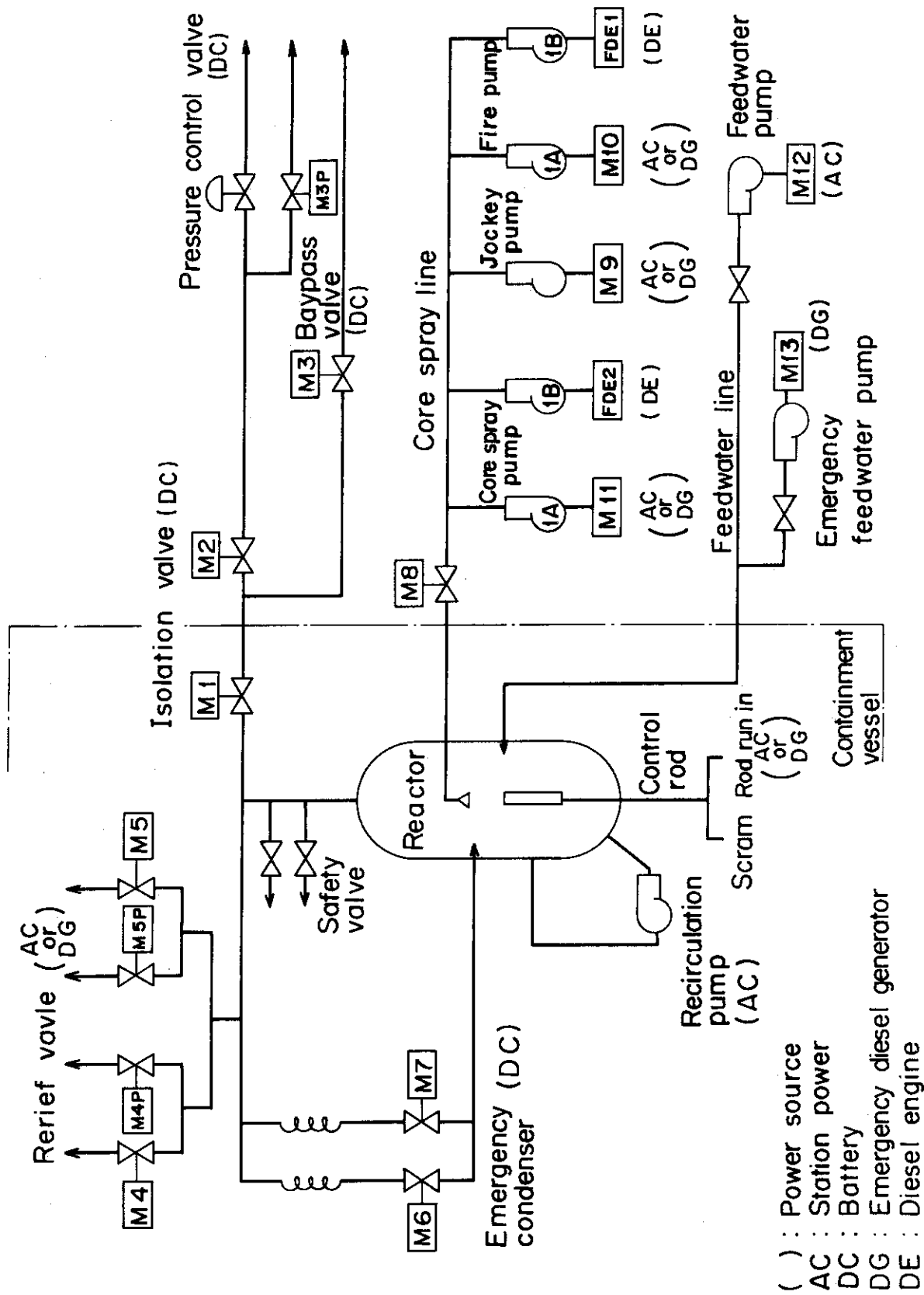


Fig. A-1 Safety systems of JPDR-II plant

付録 3

JPLEAK

LB1=1 LB2=0 AB=0.0005 IREGI=5

79-08-11

PAGE 1

TIME= 0.0 P = 6.2500E+01 POWER= 1.0200E+00 WP = 1.0000E+00 HIN = 4.2680E+00 HOUT = 4.9024E+00 HLEVL=-4.4364E-08
 FLUX = 1.0200E+00 WS = 3.8990E+01 WF = 3.8990E+01 DHIN = 2.6558E+01 DHOUT = 0.0 WBG = 0.0
 PCON = 0.0 WEC = 0.0 WFCS = 0.0 WRELF = 0.0 WSSV = 0.0 WBFJ = 0.0
 TF2 = 8.4599E+02 TF4 = 1.1076E+03 TF6 = 9.3717E+02 TF8 = 6.8890E+02 TF10 = 4.2874E+02
 TC2 = 2.9584E+02 TC4 = 3.0005E+02 TC6 = 2.9740E+02 TC8 = 2.9283E+02 TC10 = 2.8636E+02
 ISTEP= 1. 1.8577E-05 VOID = 1.8268E+00 VWATR= 1.9003E+01 MT = 1.4756E+04 TDWIO= 0.0
 X2 = 1.4908E-02 X3 = 2.0000E-02 MG2 = 3.6047E+03 MF3 = 1.5403E+03 WGSW2 = 2.7688E+01
 ALF2 = 2.6610E-01 ALF3 = 4.5815E-02 V1 = 5.4222E+00 V2 = 6.4975E+00 WSPIL = 8.7701E+02 WSP = 0.0
 V3 = 2.1324E+00 V4 = 2.8418E+02 H55 = 5.7850E+00 WFI = 1.0000E+00
 HF = 2.9161E+02 HS4 = 2.7106E+02 TS5 = 2.7106E+02

TIME= 2.00 P = 6.1545E+01 POWER= 1.4469E-01 WP = 8.9903E-01 HIN = 4.2680E+00 HOUT = 4.0074E+00 HLEVL=-5.7464E+00
 FLUX = 8.6659E-02 WS = 3.7228E+01 WF = 0.0 DHIN = 2.6558E+01 DHOUT = 4.9990E-01 WBG = 0.0
 PCON = 6.2097E-03 WEC = 0.0 WFCS = 0.0 WRELF = 0.0 WSSV = 0.0 WBFJ = 1.8269E+01
 TF2 = 7.2336E+02 TF4 = 9.4797E+02 TF6 = 8.0035E+02 TF8 = 5.9407E+02 TF10 = 3.9038E+02
 TC2 = 2.9117E+02 TC4 = 2.9417E+02 TC6 = 2.9196E+02 TC8 = 2.8836E+02 TC10 = 2.8340E+02
 ISTEP= 1. 1.4695E-02 X3 = 4.2176E-03 MF2 = 1.9350E+00 VOID = 1.9350E+00 VWATR= 1.8908E+01 MT = 1.4681E+04 TDWIO=-7.5381E+01
 X2 = 2.6683E-01 ALF3 = 9.3673E-02 MG2 = 5.3805E+01 MG3 = 6.3427E+00 WGSW3 = 0.0
 ALF2 = 5.4094E+00 V2 = 6.4975E+00 V3 = 2.1482E+00 WSPIL = 7.7276E+02 WSP = 0.0
 V1 = 2.9036E+02 HS4 = 2.8548E+02 H55 = 2.8429E+02 V4 = 5.7850E+00 WFI = 8.8057E-01
 HF = 2.7594E+02 TS4 = 2.7212E+02 TS5 = 2.7115E+02

TIME= 4.00 P = 6.0010E+01 POWER= 1.2319E-01 WP = 7.9236E-01 HIN = 4.2680E+00 HOUT = 3.9888E+00 HLEVL=-1.2893E+01
 FLUX = 6.3757E-02 WS = 3.1148E+01 WF = 0.0 DHIN = 2.6558E+01 DHOUT = -1.3583E+00 WBG = 0.0
 PCON = 1.2585E-02 WEC = 0.0 WFCS = 0.0 WRELF = 0.0 WSSV = 0.0 WBFJ = 1.8269E+01
 TF2 = 6.0122E+02 TF4 = 7.7686E+02 TF6 = 6.6023E+02 TF8 = 5.0423E+02 TF10 = 3.5729E+02
 TC2 = 2.8725E+02 TC4 = 2.8964E+02 TC6 = 2.8744E+02 TC8 = 2.8477E+02 TC10 = 2.8078E+02
 ISTEP= 1. 1.4341E-02 X3 = 6.1671E-03 MF2 = 2.0294E+00 VOID = 2.0294E+00 VWATR= 1.8768E+01 MT = 1.4574E+04 TDWIO=-1.8098E+02
 X2 = 2.6808E-01 ALF3 = 1.3511E-01 MG2 = 3.6170E+03 MG3 = 1.3795E+03 WGSW2 = 2.3194E+01
 ALF2 = 5.4591E+00 V2 = 6.4975E+00 V3 = 2.0985E+00 WSPIL = 6.6744E+02 WSP = 0.0
 V1 = 2.8833E+02 HS4 = 2.8715E+02 H55 = 2.8483E+02 V4 = 5.7850E+00 WFI = 7.7547E-01
 HF = 2.7429E+02 TS4 = 2.7349E+02 TS5 = 2.7159E+02

TIME= 6.00 P = 5.9173E+01 POWER= 9.7496E-02 WP = 3.6869E-01 HIN = 4.2680E+00 HOUT = 3.9975E+00 HLEVL=-2.5896E+00
 FLUX = 4.0178E-02 WS = 2.4740E+01 WF = 0.0 DHIN = 2.6558E+01 DHOUT = -4.8860E-01 WBG = 0.0
 PCON = 1.8971E-02 WEC = 0.0 WFCS = 0.0 WRELF = 0.0 WSSV = 0.0 WBFJ = 1.8253E+01
 TF2 = 5.0478E+02 TF4 = 6.3154E+02 TF6 = 5.4675E+02 TF8 = 4.3610E+02 TF10 = 3.3344E+02
 TC2 = 2.8451E+02 TC4 = 2.8640E+02 TC6 = 2.8475E+02 TC8 = 2.8229E+02 TC10 = 2.7902E+02
 ISTEP= 2. 1.9149E-01 VOID = 2.1744E+00 VWATR= 1.8650E+01 MT = 1.4481E+04 TDWIO=-2.7328E+02
 X2 = 1.4013E-02 X3 = 2.2904E-03 MF2 = 3.6271E+03 MG3 = 5.7069E+03 WGSW2 = 1.6177E+01
 ALF2 = 2.6697E-01 ALF3 = 5.5559E-02 MG2 = 5.1672E+01 MG3 = 1.3288E+01 WGSW3 = 0.0
 V1 = 5.4278E+00 V2 = 6.4975E+00 V3 = 7.9148E+00 WSPIL = 3.4733E+02 WSP = 0.0
 HF = 2.8722E+02 HS5 = 2.8540E+02 WFI = 3.5093E-01 TSAT = 2.7338E+02 TS5 = 2.7206E+02

TIME= 8.00 P = 5.8617E+01 POWER= 7.3853E-02 WP = 2.2025E-01 HIN = 4.2680E+00 HOUT = 4.0769E+00 HLEVL=-2.8673E+00
 FLUX = 1.6669E-02 WS = 1.9982E+01 WF = 0.0 DHIN = 2.6558E+01 DHOUT = 7.4472E+00 WBG = 0.0
 PCON = 2.5362E-02 WEC = 2.8497E-01 WFCS = 0.0 WRELF = 0.0 WSSV = 0.0 WBFJ = 1.8246E+01
 TF2 = 4.3550E+02 TF4 = 5.2295E+02 TF6 = 4.6419E+02 TF8 = 3.8795E+02 TF10 = 3.1666E+02
 TC2 = 2.8261E+02 TC4 = 2.8406E+02 TC6 = 2.8266E+02 TC8 = 2.8064E+02 TC10 = 2.7796E+02
 ISTEP= 2. 1.7883E-01 VOID = 2.4896E+00 VWATR= 1.8529E+01 MT = 1.4400E+04 TDWIO=-3.5412E+02
 X2 = 1.4942E-02 X3 = 3.4271E-03 MF2 = 3.5606E+03 MG3 = 5.6244E+03 WGSW2 = 1.4892E+01
 ALF2 = 2.8140E-01 ALF3 = 8.1537E-02 MG2 = 5.4034E+01 MG3 = 1.9709E+01 WGSW3 = 1.1713E+00
 V1 = 5.2330E+00 V2 = 6.4975E+00 V3 = 8.1096E+00 WSPIL = 1.7740E+02 WSP = 0.0
 HF = 2.8674E+02 HS5 = 2.8562E+02 WFI = 2.0072E-01 TSAT = 2.7299E+02 TS5 = 2.7224E+02