

JAERI-M
82-064

PWRプラントの動特性解析コード：
PWRDYN

1982年6月

横林正雄

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

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section
Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura,
Naka-gun Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)原子力資料サービス

PWRプラントの動特性解析コード：PWRDYN

日本原子力研究所東海研究所安全解析部

横 林 正 雄

(1 9 8 2 年 5 月 2 4 日 受 理)

本報告書はPWRプラントの動特性解析コードPWRDYNの解析モデルと計算例について述べたものである。

本解析コード開発の目的は、運転モードの変更時の過渡解析、制御系統の特性の評価等比較的小幅な外乱に対する過渡応答の評価解析に用いることである。

本解析コードの特長は①主冷却系は平均ループで代表させる②一次冷却水の沸騰はないとする③蒸気発生器2次側は一次元で取扱い、自然循環流量の計算に対しては駆動水頭は常に正としている④主要な制御系は取入れている、の4つである。

本解析コードを用いてRETRANコードと小幅変動について計算結果を比較したところ良好な結果が得られた。また計算時間が実時間の約1/7と極めて短いこと等も考慮して十分実用性のあることが確認された。

PWRDYN: A Computer Code for PWR Plant Dynamic Analysis

Masao YOKOBAYASHI

Division of Nuclear Safety Evaluation,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 24, 1982)

This report describes analytical models and calculated results of a PWR plant dynamic analysis code PWRDYN. The code has been developed in order to analyze and evaluate transient responses for small disturbance such as operating mode change and control system characteristic analysis. The features included in PWRDYN are

- 1) One loop approximation of primary loops,
- 2) Primary coolant is always subcooled,
- 3) At the secondary side of steam generator is used one dimensional model and natural circulation is calculated assuming constant by positive driving head.
- 4) Main control systems are incorporated.

In the transient responses caused by small perturbation, the calculated results by PWRDYN are in good agreement with the RETRAN calculations. Furthermore, computing time is very short so as about one seventh of real time, hence the code is convenient and useful for dynamic analysis of PWR plants.

Keywords: PWRDYN Code, PWR Plant, Dynamic analysis,
Transient Responses, RETRAN Code.

目 次

1. 緒 言	1
2. 解析モデル	3
2.1 中性子動特性	3
2.2 核熱出力	3
2.3 燃料温度	3
2.4 炉心熱水力特性	4
2.4.1 平均チャンネルの熱水力特性	4
2.4.2 炉心バイパス領域の熱水力特性	5
2.4.3 ホットチャンネルの熱水力特性	6
2.5 一次ループの熱水力特性	7
2.5.1 一次ループの熱特性	7
2.5.2 一次ループの水力特性	8
2.5.3 主冷却ポンプの動特性	8
2.6 加圧器熱水力特性	9
2.7 蒸気発生器の熱水力特性	12
2.7.1 加熱管領域	12
2.7.2 ライザ領域	13
2.7.3 蒸気ドーム領域	15
2.7.4 上部ダウンコマ領域	16
2.7.5 下部ダウンコマ領域	17
2.7.6 冷却材の水力学特性	19
2.8 蒸気系統動特性	19
2.8.1 蒸気発生器より流出する蒸気流量	19
2.8.2 主蒸気管による圧力降下	19
2.8.3 主蒸気管部の動特性	20
2.8.4 タービン系統蒸気流量	21
2.8.5 蒸気逃し弁流量	21
2.9 給水系統動特性	21
2.9.1 蒸気発生器給水流量制御系	21
2.9.2 給水エンタルピ	21
2.10 原子炉自動制御系	22
3. 数値解法	25
3.1 初期定常状態の計算	25
3.2 主要パラメータの計算	26

3.3 主なサブルーチン	27
4. 性能評価計算例	29
5. データ入力形式	37
6. 結 論	49
謝 辞	49
参考文献	50
記号表	51
付 録	55

Contents

1.	Introduction	1
2.	Analytical Models	3
2.1	Neutron Kinetics	3
2.2	Nuclear and Thermal Output Power	3
2.3	Fuel Temperature	3
2.4	Core Thermodynamics	4
2.4.1	Core Average Channel Thermodynamics	4
2.4.2	Core Bypass Region Thermodynamics	5
2.4.3	Hot Channel Thermodynamics	6
2.5	Primary Loop Thermo-Hydraulics	7
2.5.1	Primary Loop Thermodynamics	7
2.5.2	Primary Loop Hydraulics	8
2.5.3	Main Coolant Pump Dynamics	8
2.6	Pressurizer Thermo-Hydraulics	9
2.7	Steam Generator Thermo-Hydraulics	12
2.7.1	Heating Region	12
2.7.2	Riser Region	13
2.7.3	Steam Dome Region	15
2.7.4	Upper Downcomer	16
2.7.5	Lower Downcomer	17
2.7.6	Coolant Hydraulics	19
2.8	Steamline Flow Dynamics	19
2.8.1	Steam Flow Leaving Steam Generator	19
2.8.2	Pressure Drop in Main Steamline	19
2.8.3	Main Steam Line Steam Flow Dynamics	20
2.8.4	Steam Flow in Turbine System	21
2.8.5	Steam Flow through Relief Valve	21
2.9	Feedwater System Dynamics	21
2.9.1	Feedwater Control System of Steam Generator	21
2.9.2	Feedwater Enthalpy	21
2.10	Reactor Automatic Control System	22
3.	Numerical Method	25
3.1	Initial Steady State Calculation	25
3.2	Main Parameter Calculation	26
3.3	Main Subprograms	27

4.	Examples of the Code Performance Check Calculations	29
5.	Input Data Description	37
6.	Conclusion	49
	Acknowledgment	49
	References	50
	Nomenclature	51
	Appendix	55

1. 緒 言

本解析コードPWRDYNはPWR(Pressurized Water Reactor)プラントの制御系評価、運転モード変更時の過渡現象など比較的小幅な外乱に対する過渡応答の評価解析を目的として開発されたものである。

解析モデルの作成に当っては以下に述べるBWR(Boiling Water Reactor)プラントの解析モデルを参照した。これはBWRとPWRは元来、機能の集中、分散の形態的相異があるのみで本質的には同質のものであることによる。即ち、PWRの蒸気発生器はBWRの原子炉を燃料棒の代わりにU字型加熱管に、強制循環の代わりに自然循環にしたものにすぎない。またPWRの加圧器はBWRの蒸気ドームと自由水面の一部と熱水力的には同質である。このような考え方からBWRのプラント動特性解析コード、JPDYN⁽¹⁾ およびBWRDYN^(注)の解析モデルを参考としている。これらのコードはいずれもそれぞれJPDR-II(Japan Power Demonstration Reactor-II)、商業用BWRの実測データを用いて有効性が検証されており、上述の如くPWRの加圧器及び蒸気発生器の解析モデル作成に有用であると考えられる。

PWRプラント動特性解析コードは現在までのところ公開されたものがない。但し、詳細な事故解析コードとしてRELAP-5⁽³⁾、RETRAN⁽⁴⁾があるが、これらはLOCA(Loss of Coolant Accident)解析用のコードを動特性解析用に改造したものであり、計算には長時間を要する。これはモーメントの式を場所依存で解いているためであるが、大、中のLOCA解析を除けばモーメントの式は極めて単純化しても現実的な評価精度を失うことはない。

以上のことを考慮して開発されたPWRDYNは次のような特徴を有する。

1. 主冷却ループは単一ループで代表する。
2. 一次系の圧力は一様で加圧器圧力に等しいとする。
3. 一次冷却水の沸騰は取扱わない。
4. 炉心チャンネル領域では、軸方向に一次元で取扱い、ホットチャンネルにおけるDNBRの計算も可能である。
5. 蒸気発生器二次側の熱水力モデルでは、加熱管領域を流路にそって一次元で、他を4領域(ライザ部、蒸気ドーム部、上部ダウンカム領域、下部ダウンカム領域)に分割して取扱い、自然循環流量の計算も含まれている。
6. 給水制御系、原子炉自動制御系など主要な制御系もモデル化されている。

このような特徴を有するPWRDYNの負荷を10%変化させたような小幅な外乱に対する応答をRETRANによる計算結果と比較したところ、良好な結果が得られた。また計算時間も実時間の約1/7で極めて短く、当初に述べた目的をほぼ満足していることがわかった。

また本解析コードは次の点を改良することにより、事故発生時に事故進展の予測をするための

注) 横林正雄, 高橋義信「BWRプラントの動特性解析コードBWRDYNによる動特性解析」

高速計算コードとして用いることができる。改良点は①主冷却系は多ループすること②蒸気発生器2次側に冷却材が減少し連続な自然循環流量が得られない場合のモデルを取り入れること、の2つである。

本報告書の構成としては、1章に続いて、2章で解析モデルについて、3章で数値計算法、特に初期のヒートバランスのとり方に重点をおいて述べる。4章ではPWRDYNの有効性を検討するため計算例として原子力船「むつ」に適用し、RETRANによる計算結果と比較検討している。5章ではコードの入力方法について述べる。また入力例については付録に示している。

2. 解析モデル

2.1 中性子動特性

中性子の挙動は一点近似で取扱い，遅発中性子は6群とする。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (2.1.1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell} n - \lambda_i C_i \quad (i=1, 6) \quad (2.1.2)$$

記号については記号表を参照のこと。反応度は減速材温度，ドップラー，制御棒によるものを取扱っている。

2.2 核熱出力

中性子束 n の核分裂により放出される熱量 q_n は，燃料棒内，チャンネル内，チャンネル外での発熱割合をそれぞれ R_{nf} ， R_{nc} ， R_{ni} とすれば

$$q_n = (R_{nf} + R_{nc} + R_{ni}) K_n n \quad (2.2.1)$$

ここで K_n は定数である。また，炉心平均中性子束 n_0 で長時間運転した場合の崩壊熱 q_d は，その後の数十分間をANS標準式を模擬して次式で表わす。

$$q_{dh} = R_{dh} \left(\frac{0.204}{1+15S} + \frac{0.216}{1+40S} + \frac{0.580}{1+1100S} \right) n_0 \quad (2.2.2)$$

ここで S はラプラス演算子， R_{dh} は崩壊熱の出力に占める割合である。崩壊熱はすべて燃料棒内で発熱すると仮定し，(2.2.1)式の各発熱量を項目別に表わすと

$$Q_{nf} = (1 - R_{dh}) R_{nf} K_n n \quad (2.2.3)$$

$$Q_{nc} = (1 - R_{dh}) R_{nc} K_n n \quad (2.2.4)$$

$$Q_{ni} = (1 - R_{dh}) R_{ni} K_n n \quad (2.2.5)$$

ここで Q_{nf} ， Q_{nc} ， Q_{ni} はそれぞれ燃料棒内，炉心チャンネル内，炉心チャンネル外での発熱量である。

2.3 燃料温度

燃料ペレットと被覆材間のギップに含まれるガスの熱容量を無視し，ペレット軸方向の熱伝導はないものと仮定する。半径方向に燃料ペレットを i_{max} 等分，被覆材を1領域にするとペレット領域 i と被覆材についてバランス式は以下の通りである。軸方向には j_{max} 等分するが各領域でのバランス式は同じである。

$$\rho_{fi} C_{pi} V_{fi} \frac{\partial}{\partial t} T_{fi} = A_{fi-1,i} H_{fi-1,i} (T_{fi-1} - T_{fi}) - A_{fi,i+1} H_{fi,i+1} (T_{fi} - T_{fi+1}) + q_{fi} \quad (2.3.1)$$

$$\rho_f C_{pc} V_c \frac{\partial}{\partial t} T_c = A_{fcj} H_{fc} (T_{fi\max} - T_c) - A_{cw} H_{cw} (T_c - T_w) \quad (2.3.2)$$

燃料ペレット内の熱伝達係数は隣接する領域の熱伝導度を体積を重みとして平均した値を用いる。

$$H_{fi,i+1} = \frac{V_{fi} k_{fi} + V_{fi+1} k_{fi+1}}{\Delta r_f (V_{fi} + V_{fi+1})} \quad (2.3.3)$$

燃料ペレットから被覆管への熱伝達係数は

$$\frac{1}{H_{fc}} = \frac{\Delta r_f}{2 k_{fj\max}} + \frac{1}{H_g} + \frac{\Delta r_c}{2 k_c} \quad (2.3.4)$$

ここで Δr_f は i_{\max} 等分された燃料ペレットの半径方向距離, Δr_c は被覆管厚さ, H_g はギップ熱伝達係数, k_f , k_c はそれぞれ燃料および被覆管の熱伝導度である。

燃料表面熱流束 q_s は燃料表面熱伝達係数を H_w , 被覆管表面温度を T_{cs} , 冷却材温度を T_w とすれば

$$q_s = (T_{cs} - T_w) H_w \quad (2.3.5)$$

被覆管外半径を r_{co} , 被覆管中心までの半径を r_{cc} とすれば被覆管表面温度 T_{cs} は定常状態では次式で表わされる。

$$T_{cs} = T_c - \frac{q_s r_{co}}{k_c} \ell_n \frac{r_{cc}}{r_{co}} \quad (2.3.6)$$

被覆管の熱伝導度は大きく, かつ被覆管厚さが小さいことから過渡状態においてもこの関係が成り立つとすると表面熱流束は (2.3.5), (2.3.6) 式から T_{cs} を消去して

$$q_{cs} = (T_c - T_w) H_{cw} \quad (2.3.7)$$

$$\frac{1}{H_{cw}} = \left(\frac{1}{r_{co} H_w} + \frac{1}{k_c} \ell_n \frac{r_{cc}}{r_{co}} \right) r_{co} \quad (2.3.8)$$

被覆管から冷却材への実効的な熱伝達係数は (2.3.8) 式で表わされる H_{cw} である。 H_w には炉心はいつも单相強制対流を仮定して Colburn の式⁽⁴⁾を用いる。

$$H_w = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{k_w}{H_d} \quad (2.3.9)$$

ここで k_w , H_d はそれぞれ冷却材の熱伝導度, 水力等価直径, Re , Pr はレイノルズ数, プラントル数である。

2.4 炉心熱水力モデル

2.4.1 平均チャンネルの熱水力特性

炉心入口の流量を W_c とするとチャンネル内に流れる量とチャンネル外のそれとは流量配分率を η とすれば

$$W_{cc} = (1-\eta)W_c \quad (2.4.1)$$

$$W_{cl} = \eta W_c \quad (2.4.2)$$

で表わされ η は流量の関数として表わされる。本コードでは η と W_c の相関を入力する。炉心チャンネル方向に j_{\max} 等分し各々の領域の冷却材エンタルピ h_{cj} は次のエネルギーバランスで近似する。

$$\frac{d}{dt} (M_{cj} h_{cj}) = W_{cj-1} h_{cj-1} - W_{cj} h_{cj} + Q_{cj} \quad (2.4.3)$$

一次側冷却材はサブクール水と仮定し、さらに非圧縮性を仮定すれば流量は場所により不変である。即ち

$$\frac{d M_{cj}}{dt} = W_{cj-1} - W_{cj} = 0 \quad (2.4.4)$$

これらの式より

$$\frac{d}{dt} h_{cj} = \frac{W_{cc} (h_{cj-1} - h_{cj}) + Q_{cj}}{M_{cj}} \quad (2.4.5)$$

冷却材の温度 T_{wj} は (2.4.5) 式を積分して求めた h_{cj} を用いて蒸気表から求める。冷却材質量 M_{cj} は

$$M_{cj} = \frac{V_{cj}}{v_{cj}} \quad (2.4.6)$$

冷却材比容積 v_{cj} は蒸気表より h_{cj} から求める。

熱量 Q_{cj} は (2.3.7) 式と (2.2.4) 式とから

$$Q_{cj} = A_{cw} q_{sj} + Q_{ncj} \quad (2.4.7)$$

(2.4.7) 式の右辺第2項は2.2節でのべたチャンネル内で直接発熱する熱量である。

2.4.2 炉心バイパス領域の熱水力特性

これは炉心層とコアバレルの間のバイパス流のある領域であり、一点近似で取扱う。平均のエンタルピを h_{clav} とすれば次式が成立する。

$$\frac{d h_{clav}}{dt} = \{ W_{cl} (h_{clo} - h_{cin}) + Q_{cl} \} \frac{V_{scl}}{V_{cl}} \quad (2.4.8)$$

出口エンタルピ h_{clo} は $h_{clav} = (h_{clo} + h_{cin})/2$ の式にエンタルピの輸送おくれを考慮すると次式で表わされる。

$$h_{clo} = \frac{2 h_{clav}}{1 + \frac{\tau_{cl} S}{2}} - \frac{h_{cin}}{1 + \tau_{cl} S} \quad (2.4.9)$$

$$\tau_{cl} = \frac{V_{cl}}{v_{scl} W_{cl}} \quad (2.4.10)$$

炉心出口エンタルピ h_{co} はチャンネル出口とリーク領域出口のエンタルピが混合されるので次式となる。

$$h_{co} = \frac{W_{cc} h_{cmax} + W_{cl} h_{clo}}{W_c} \quad (2.4.11)$$

2.4.3 ホットチャンネルの熱水力特性

ホットチャンネルにおける熱水力特性計算の必要性はDNBR (Departure of Nucleate Boiling Ratio) を求めることにある。ここでは厳密な計算を避けて前述解析モデルを用い、ホットチャンネルだけ独立に計算する。即ち2.3節の燃料棒温度はホットチャンネル係数を用いた発熱量で計算し、2.4.1節の方法で冷却材エンタルピを計算する。次にWH社のW-3相関式⁽⁵⁾を用いて熱流束を計算する。

等価一様DNB熱流束は

$$q_{DNB,EU} = [(2.022 - 6.119 \times 10^{-3} P) + (0.1722 - 1.4 \times 10^{-3} P) e^{(18.18 - 58.73 \times 10^{-2} P) x}] \times [(0.1484 - 1.5696 x + 0.1729 x | x |) G \times 2.048 \times 10^{-7} + 1.037] \times [1.157 - 0.869 x] [0.2664 + 0.8357 e^{-124.1 D_e}] \times [0.8258 + 1.429 \times 10^{-3} (h_f - h_{in})] \times 2.713 \times 10^6 \quad (2.4.12)$$

ここで

- P : 圧力 kg/cm² a
 G : 流量 kg/m² h
 D_e : 等価直径 m
 x : 蒸気クオリティ (負の値も用いる)
 h : エンタルピ Kcal/kg

非一様DNB熱流束は $q_{DNB,EU}$ をF-因子で除する。

$$q_{DNB,NE} = q_{DNB,EU} / F \quad (2.4.13)$$

$$F = \frac{C}{q_{DNB} \ell_{DNB} (1 - e^{-C \ell_{DNB}})} \int_0^{\ell_{DNB}} q(z) e^{-C(\ell_{DNB} - z)} dz \quad (2.4.14)$$

$$C = 17.32 \frac{(1 - x_{DNB})^{7.9}}{(2.048 \times 10^{-7} G)^{1.72}} \quad (2.4.15)$$

ここで

- ℓ_{DNB} : 入口からDNB点までの距離 m
 q(z) : z点の熱流束 Kcal/m² h

DNBRは燃料表面熱流束qとの比であるから

$$DNBR = \frac{q_{DNB,NE}}{q} \quad (2.4.16)$$

2.5 一次ループの熱水力特性

2.5.1 一次ループの熱特性

本解析モデルでは一次ループは1ループで代表させている。またループの熱損失はないものとし、サージ流量のような枝管によるループへの冷却水の出入は無視している。これは短時間の動特性解析では一次ループ全体の保有水量と保有熱量に比べこれらの量が十分小さいことによる。

炉心及びSG加熱管部を除いた領域を i_{\max} 個のノードに分割し、各々のノードに質量、エネルギーバランス式を用いてまとめると

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{W_{1p}(h_{i-1} - h_i) v_{si}}{V_i} + Q_{stgi} \quad (2.5.1)$$

W_{1p} はループ流量で V_i はその領域の体積である。原子炉内の場合 W_{1p} の代りに W_c を用いる。比容積 v_{si} はエンタルピ h_i を用いて蒸気表から求める。

Q_{stgi} は上部プレナム等に存在する滞留水との熱の受授で

$$Q_{stgi} = H_{stg} A_{stgi} (T_{stgi} - T_i) \quad (2.5.2)$$

T_i は h_i より換算した温度、 T_{stgi} は滞留水の温度で

$$\frac{dT_{stgi}}{dt} = \frac{Q_{stgi} v_{stgi}}{V_{stgi} C_{pstgi}} \quad (2.5.3)$$

SGU字管部では(2.5.1)式の Q_{stgi} の代りに2次側との熱の受授の項が加わる。即ち

$$Q_i = H_{1u} A_1 (T_i - T_{ui}) \quad (2.5.4)$$

$$\frac{1}{H_{1u}} = \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_u} \quad (2.5.5)$$

ここで H_{1u} は、1次側の熱伝達係数で H_1 は(2.3.9)式から、 H_u はU字管の熱伝導度から求める。

U字管の平均温度 T_{ui} は、体積、密度をそれぞれ V_u 、 ρ_u とすれば

$$V_u \rho_u C_{pu} \frac{dT_{ui}}{dt} = Q_i - H_{u2} A_2 (T_{ui} - T_{hi}) \quad (2.5.6)$$

ここで T_{hi} は2次側加熱管領域の温度である。

2次側の熱伝達係数には自然循環の式としてClark-Rohsenowの式⁽⁴⁾を用いる。

$$H_2 = 4.55 \times 10^5 \frac{C_p^3 T_{sat}^2 \mu}{h_{fg}^2 P_r^{5.1}} \sqrt{\frac{\rho_f - \rho_g}{\sigma}} \quad (2.5.7)$$

ここで

C_p : 比熱 (Kcal/kg°C)

μ : 粘性係数 (kg s/m²)

σ : 表面張力 (kg/m)

2.5.2 一次ループの水力特性

一次ループを n 個有する系について Fig. 2.1 のような回路で模擬する。

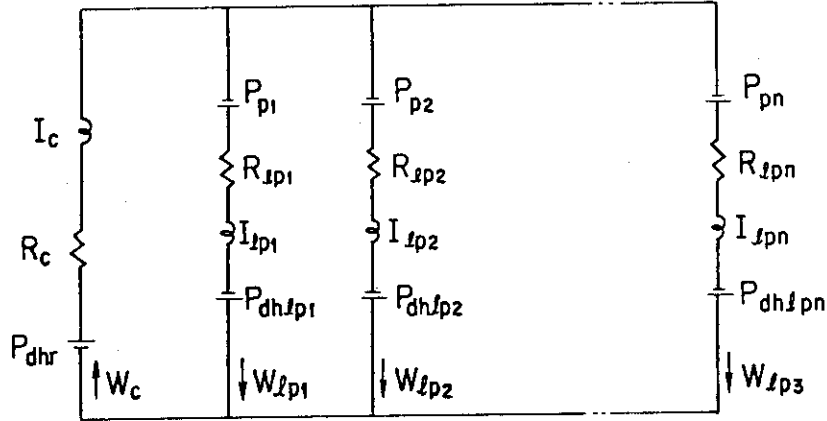


Fig. 2.1 Primary coolant hydraulics

各ループについて次式が成り立つと仮定する。

$$I_c \frac{dW_c}{dt} + I_{1p1} \frac{dW_{1p1}}{dt} = g(P_{p1} + P_{dhr} + P_{dh1p1} - FR_c - FR_{1p1}) \quad (2.5.8)$$

$$I_c \frac{dW_c}{dt} + I_{1p2} \frac{dW_{1p2}}{dt} = g(P_{p2} + P_{dhr} + P_{dh1p2} - FR_c - FR_{1p2}) \quad (2.5.9)$$

⋮

$$I_c \frac{dW_c}{dt} + I_{1pn} \frac{dW_{1pn}}{dt} = g(P_{pn} + P_{dhr} + P_{dh1pn} - FR_c - FR_{1pn}) \quad (2.5.10)$$

各ループの定数が等しいとして W_c についてまとめると次式をうる。

$$\frac{dW_c}{dt} = \frac{g(P_p + P_{dhr} + P_{dh1p} - FR_c - FR_{1p})}{I_c + \frac{I_{1p}}{n}} \quad (2.5.11)$$

$$W_{1p} = \frac{W_c}{n} \quad (2.5.12)$$

ここで P_p はポンプ揚程, P_{dhr} , P_{dh1p} はそれぞれ原子炉およびループの自然循環水頭である。ポンプ揚程は通常一定であるがトリップしたときは次節で述べる方法で計算される。自然循環水頭は前節で述べた各場所におけるエンタルピから求めた比容積と入力された高さとから計算される。

2.5.3 主冷却ポンプの動特性

ポンプの駆動水頭 P_p は流量 W_{1p} の 2 次式で近似されるものとし、回転数依存の形で表わすと次のようになる。

$$P_p = a v_{sp} W_{1p}^2 + b N_p W_{1p} + c \frac{N_p^2}{v_{sp}} \quad (2.5.13)$$

ここで a , b , c は定数, N_p はポンプ回転数 (rpm) で v_{sp} は流体の比容積である。慣性モーメントを I , ポンプの理論水力トルクを T_{pth} , 全系の等価損失トルクを T_l とすれば

$$I \frac{dN_p}{dt} = -T_{pth} - T_l \quad (2.5.14)$$

$$I = \frac{2\pi}{60} \frac{GD^2}{4g} \quad (2.5.15)$$

$$T_{pth} = K_1 \frac{v_{sp} P_p W_{1p}}{N_p} \quad (2.5.16)$$

$$T_l = K_2 \frac{N_p^{m-1}}{N_{p0}^m} E_l \quad (2.5.17)$$

ここで K_1 , K_2 は定数, GD^2 はポンプのはずみ車効果と呼ばれている慣性モーメント, E_l は定格運転状態における全系の電氣的損失を表す。また m は損失が回転数の m 乗に比例するとしたときの定数である。

2.6 加圧器熱水力特性

加圧器は気相部と液相部の2領域に分けて取扱い, 圧力は一様とし気相部は常に飽和状態とする。(Fig. 2.2 参照)

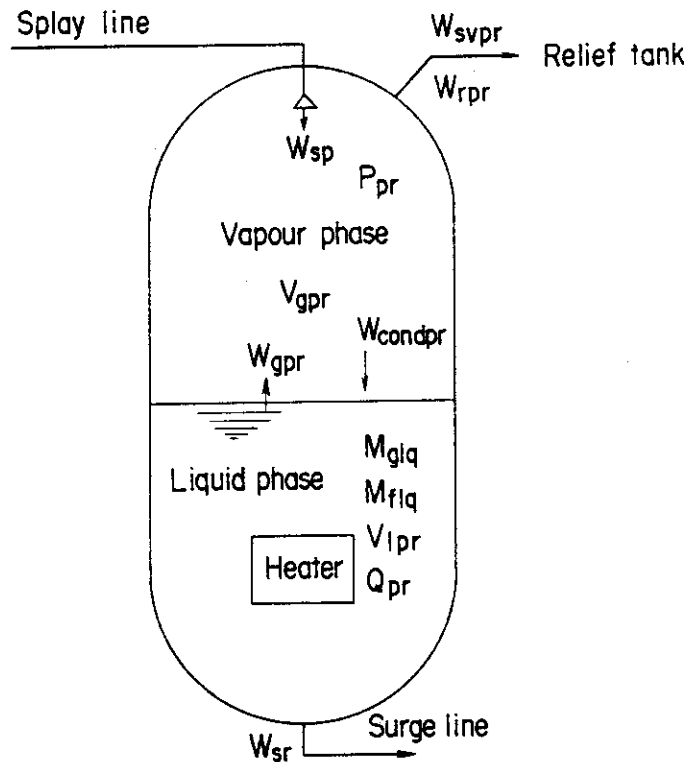


Fig. 2.2 Pressurizer thermodynamics

気相部に質量，体積，エネルギーの各保存則を適用してまとめると次式をうる。

$$\frac{h_{fg}}{v_{fg}} \left\{ v_g (W_{gpr} - W_{rfpr} - W_{svpr} - W_{condpr}) - \frac{dV_{gpr}}{dt} \right\} - D_g \frac{dP_{pr}}{dt} = 0 \quad (2.6.1)$$

ここで

$$D_g = \left\{ \left(\frac{\partial h_f}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_g}{\partial P} \right) \frac{1}{v_g} - \frac{1}{J} \right\} V_{gpr} \quad (2.6.2)$$

W_{gpr} は液相部からの蒸気流量， W_{rfpr} ， W_{svpr} は逃し弁，安全弁からの蒸気流量である。

W_{condpr} は気相部蒸気がスプレイにより凝縮される流量および液相部がサブクール状態の場合，この液相によって凝縮される流量の和である。即ち

$$W_{condpr} = W_{condsp} + W_{condlq} \quad (2.6.3)$$

$$W_{condsp} = K_{sp} \frac{h_f - h_{sp}}{h_{fg}} W_{sp} \quad (2.6.4)$$

$$W_{condlq} = K_{lq} \frac{h_f - h_{lq}}{h_{fg}} \quad (2.6.5)$$

K_{sp} ， K_{lq} は凝縮係数であり，スプレイ流量 W_{sp} は定常スプレイ W_{spn} と補助スプレイ W_{spaux} との和である。

$$W_{sp} = W_{spn} + W_{spaux} \quad (2.6.6)$$

液相部に質量，体積，エネルギーの保存則を適用してまとめると次式をうる。

$$\frac{h_{fg}}{v_{fg}} \left\{ v_f (W_{condpr} + W_{sp} - W_{sr}) - v_g W_{gpr} - \frac{dV_{lpr}}{dt} \right\} + Q_{pr} - D_{lq} \frac{dP_{pr}}{dt} = 0 \quad (2.6.7)$$

ここで

$$D_{lq} = \left\{ \left(\frac{\partial h_f}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_f}{\partial P} \right) M_{flq} + \left(\frac{\partial h_g}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_g}{\partial P} \right) M_{glq} - \frac{V_{lpr}}{J} \right\} SF_{pr} \quad (2.6.8)$$

SF_{pr} は飽和度を表わす係数で液相部のエンタルピ h_{lq} と比較して

$$\begin{aligned} SF_{pro} &= 1 : h_f \leq h_{lq} \\ &= 0 : h_f < h_{lq} \end{aligned} \quad (2.6.9)$$

実際には液相部全体の水がステップ状に飽和又は未飽和になることはないと考えられるところから一次遅れ時定数 τ_{pr} を用いて表わす。

$$SF_{pr} = \frac{1}{1 + \tau_{pr} S} SF_{pro} \quad (2.6.10)$$

ここで， S はラプラス演算子であり， τ_{pr} は液相部質量及び圧力変化率により決まると考えられる。

エンタルピは質量およびエネルギーバランス式より

$$M_{tlq} \frac{dh_{lq}}{dt} = (h_f - h_{lq})(W_{sp} + W_{condpr}) - h_{fg} W_{gpr} + (h_{sr} - h_{lq})W_{sr} + Q_{pr} \quad (2.6.11)$$

液相表面から離脱する蒸気流量 W_{gpr} は気泡の上昇速度 u_b と上昇する距離 L_b および蒸気質量 M_{glq} とから求める。

$$W_{gpr} = \frac{u_b}{L_b} M_{glq} \quad (2.6.12)$$

気泡の上昇速度はWilsonの相関式⁽⁶⁾を用いる。ボイド率を α 等価直径を D_e (m) とすると u_b (m/s) は

$$\begin{aligned} u_b &= u_{b1} : u_{b1} \geq u_{b2} \\ &= u_{b1} : u_{b1} < u_{b2} \end{aligned} \quad (2.6.13)$$

ここで

$$u_{b1} = \left(\frac{\alpha}{0.136 a b} \right)^{\frac{1}{1.78}} \left(g D_e b^{\frac{1}{0.19}} \right)^{0.5}$$

$$u_{b2} = \left(\frac{\alpha}{0.75 a b} \right)^{\frac{1}{0.78}} \left(g D_e b^{\frac{1}{0.19}} \right)^{0.5}$$

$$a = \left(\frac{\rho_g}{\rho_f - \rho_g} \right)^{0.32}$$

$$b = \left\{ \frac{1}{D_e} \left(\frac{\sigma}{\rho_f - \rho_g} \right)^{0.5} \right\}^{0.19}$$

$$\sigma = 1.240 \times 10^{-5} (668 - 1.8 T_{sat}) \text{ (kg/m)}$$

質量はマスバランス式から

$$\frac{dM_{glq}}{dt} = \dot{M}_{fg} - W_{gpr} \quad (2.6.14)$$

$$\frac{dM_{flq}}{dt} = W_{sp} + W_{condpr} - W_{sr} - \dot{M}_{fg} \quad (2.6.15)$$

\dot{M}_{fg} はフラッシングによる流量で次式で表わされる。

$$\dot{M}_{fg} = \frac{1}{h_{fg}} \left(\frac{\partial h_f}{\partial P} M_{flq} + \frac{\partial h_g}{\partial P} M_{glq} - \frac{V_{lq}}{J} \right) \frac{dP_{pr}}{dt} + \frac{Q_{pr}}{h_{fg}} \quad (2.6.16)$$

以上で述べた式の中で基礎となるのは(2.6.1), (2.6.7)式であり, これらの式から $\frac{dP_{pr}}{dt}$ を求め積分する。 $\frac{dP_{pr}}{dt}$ が求めれば他のパラメータは一意に決定される。

加圧器内水位の定常からのずれ ΔH_{mixpr} は

$$\Delta H_{mixpr} = \frac{V_{lqpr} - V_{lqpr}^*}{A_{pr}} \quad (2.6.17)$$

水位指示計は水頭であるから

$$\Delta H_{lqpr} = \frac{v_f M_{l1q}}{V_{lqpr}} \quad (2.6.18)$$

2.7 蒸気発生器の熱水力特性

蒸気発生器の解析モデルは2次側を5領域(加熱管部, ライザ部, 蒸気ドーム部, 上部ダウンカマ, 下部ダウンカマ)に分割し, 各々の領域で熱特性式を用いている。但し圧力は場所に依存しないものとしている。

2.7.1 加熱管領域

加熱管領域では軸方向にFig. 2.3のように i_{max} 等分し, 各領域に質量, 体積, エネルギーの保存則を適用してまとめると隣接ノードとの間に次式を得る。

$$(v_f + v_{fg} x_{hi})W_{hi} - (v_f + v_{fg} x_{hi-1})W_{hi-1} + \frac{v_{fg}}{h_{fg}} \left(D_{hi} \frac{dP}{dt} - Q_{hi} \right) SF_{hi} = 0 \quad (2.7.1)$$

ここで

$$D_{hi} = \left(\frac{\partial h_f}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_f}{\partial P} \right) M_{fhi} + \left(\frac{\partial h_g}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_g}{\partial P} \right) M_{ghi} - \frac{V_{hi}}{J} \quad (2.7.2)$$

SF_{hi} は飽和度を表わすファクターで, 飽和エンタルピ h_f と比較して次の(2.7.3)式で計算される。これを用いれば全ノードで(2.7.1)式を用いることができる。

$$\begin{aligned} SF_{hi} = 1 & \quad : \quad h_f \leq h_{hi}, h_{hi-1} \\ = \frac{h_{hi} - h_f}{h_{hi} - h_{hi-1}} & \quad : \quad h_{hi-1} \leq h_f < h_{hi} \\ = 0 & \quad : \quad h_{hi-1}, h_{hi} < h_f \end{aligned} \quad (2.7.3)$$

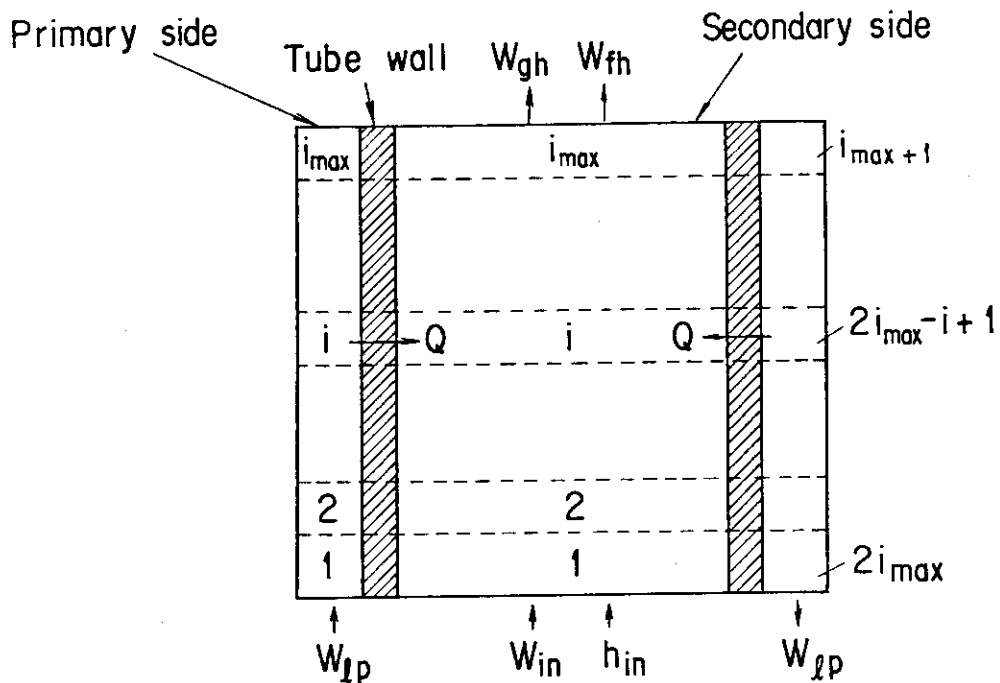


Fig. 2.3 Analytical model of SG heating section

エンタルピは質量及びエネルギーバランス式を各領域に適用することにより下式より求める。

$$M_{t\text{hi}} \frac{dh_{\text{hi}}}{dt} = W_{\text{hi}-1} (h_{\text{hi}-1} - h_{\text{hi}}) + Q_{\text{hi}} + S F_{\text{hi}} \frac{V_{\text{hi}}}{J} \frac{dP}{dt} \quad (2.7.4)$$

伝熱量 Q_{hi} は (2.5.6) 式の右辺第2項から

$$Q_{\text{hi}} = H_{u2} A_2 (T_{\text{ui}} + T_{u2\text{imax}-i+1} - 2T_{\text{hi}}) \quad (2.7.5)$$

各領域のボイド率 α_{hi} は質量保存則より次式で表わされる。

$$\alpha_{\text{hi}} = \frac{1}{V_{\text{hi}} \left(\frac{1}{v_f} - \frac{1}{v_g} \right)} \int (W_{\text{hi}} - W_{\text{hi}-1}) dt \quad (2.7.6)$$

ボイド率とクオリティとの関係は修正アルマンド式⁽⁷⁾から

$$\alpha_{\text{hi}} = \frac{(0.833 + 0.167 x_{\text{hi}}) x_{\text{hi}} v_g}{(1 - x_{\text{hi}}) v_f + x_{\text{hi}} v_g} \quad (2.7.7)$$

各領域の水及び蒸気の質量は

$$M_{f\text{hi}} = \frac{(1 - \alpha_{\text{hi}}) V_{\text{hi}}}{v_f} \quad (2.7.8)$$

$$M_{g\text{hi}} = \frac{\alpha_{\text{hi}}}{v_g} V_{\text{hi}} \quad (2.7.9)$$

$$M_{t\text{hi}} = M_{f\text{hi}} + M_{g\text{hi}} \quad (2.7.10)$$

領域の出口蒸気流量は

$$W_{g\text{hi}} = x_{\text{hi}} W_{\text{hi}} \quad (2.7.11)$$

(2.7.7) 式はボイドのスリップ比の相関式であり、冷却材の流速が遅くなると適用範囲を越えるので、スリップ速度の相関式を用いる。ここでは2.6節で述べたWilsonの相関による気泡離脱速度を用いる。気泡の離脱速度を u_{bi} 、気相及び液相の速度を u_{gi} 、 u_{fi} とすれば

$$u_{\text{gi}} = u_{\text{fi}} + u_{\text{bi}} \quad (2.7.12)$$

ノード出口での気相および液相流量は断面積を A_c とすれば

$$W_{g\text{hi}} = \frac{A_c}{v_g} \alpha_{\text{hi}} u_{\text{gi}} \quad (2.7.13)$$

$$W_{f\text{hi}} = \frac{A_c}{v_f} (1 - \alpha_{\text{hi}}) u_{\text{fi}} \quad (2.7.14)$$

(2.7.11), (2.7.12), (2.7.13) 式と $W_{\text{hi}} = W_{g\text{hi}} + W_{f\text{hi}}$ の関係より

$$W_{g\text{hi}} = \frac{v_f \alpha_{\text{hi}}}{v_g - \alpha_{\text{hi}} v_{fg}} \left\{ W_{\text{hi}} + \frac{u_{\text{bi}} A_c}{v_f} (1 - \alpha_{\text{hi}}) \right\} \quad (2.7.15)$$

(2.7.11) 式と (2.7.15) 式とは早い流速に対して前者を、遅いときに後者を用いる。

2.7.2 ライザ領域

ライザ領域は Fig. 2.4 に示すように加熱管の平均高さからスワールベーンの出口までとしている。

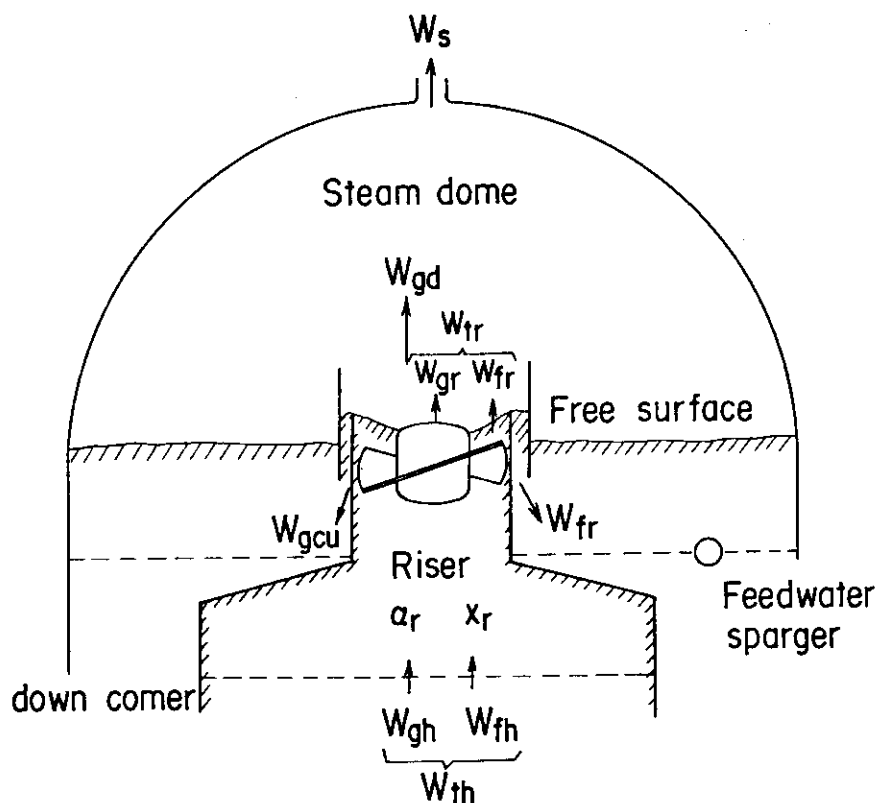


Fig. 2.4 Analytical model of SG upper region

この領域に質量，体積，エネルギーの各保存則を適用してまとめると次式をうる。

$$\frac{h_{fg}}{v_{fg}} \left\{ v_f (W_{th} - W_{tr}) + v_{fg} (W_{gh} - W_{gr}) \right\} - D_r \frac{dP}{dt} = 0 \quad (2.7.16)$$

ここで

$$D_r = \left(\frac{\partial h_f}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_f}{\partial P} \right) M_{fr} + \left(\frac{\partial h_g}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_g}{\partial P} \right) M_{gr} - \frac{V_r}{J} \quad (2.7.17)$$

\$W_{tr}\$ はライザ出口全流量で，蒸気，水の流量 \$W_{gr}\$, \$W_{fr}\$ との間に次の関係がある。

$$W_{gr} = x_r W_{tr} \quad (2.7.18)$$

$$W_{fr} = W_{tr} - W_{gr} \quad (2.7.19)$$

出口蒸気流量のうちキャリアンダされる流量 \$W_{gcu}\$ はキャリアンダクオリティを \$x_{cu}\$ とすれば

$$W_{gcu} = \frac{x_{cu}}{1 - x_{cu}} W_{fr} \quad (2.7.20)$$

ドーム領域への蒸気流量は

$$W_{gd} = \frac{W_{gr} - x_{cu} W_{tr}}{1 - x_{cu}} \quad (2.7.21)$$

全質量は質量保存則より

$$\frac{dM_{tr}}{dt} = W_{th} - W_{tr} \quad (2.7.22)$$

蒸気，水の質量はそれぞれ次式となる。

$$M_{gr} = \frac{V_r - v_f M_{tr}}{v_{fg}} \quad (2.7.23)$$

$$M_{fr} = M_{tr} - M_{gr} \quad (2.7.24)$$

これよりボイド率は

$$\alpha_r = \frac{v_g M_{gr}}{V_r} \quad (2.7.25)$$

平均クオリティ \bar{x}_r は (2.7.7) 式の修正アルマンド式を用いて求める。出口クオリティ x_r は通過時間 τ_r を考慮して

$$x_r = \frac{1}{1 + \tau_r S} \bar{x}_r \quad (2.7.26)$$

$$\tau_r = \frac{M_{tr}}{2 W_{tr}} \quad (2.7.27)$$

冷却材の流速が遅い場合には前節の場合と同様にボイドの浮力による上昇速度から蒸気流量を求め。気泡の離脱速度を u_{br} とすれば出口蒸気流量は

$$W_{gr} = \frac{v_f \alpha_r}{v_g - \alpha_r v_{fg}} \left\{ W_{tr} + \frac{u_{br} A_r}{u_f} (1 - \alpha_r) \right\} \quad (2.7.28)$$

(2.7.17) 式と (2.2.27) 式とは前節と同様に使い分ける。

2.7.3 蒸気ドーム領域

蒸気ドーム領域の体積がダウンカマ自由水面の水位によって変化すること，冷却材が未飽和状態になったときスワールベーン出口で蒸気が凝縮されること，水位が低下して給水スパージャーが露出したとき給水により蒸気が凝縮されることを考慮して，この領域に質量，体積，エネルギーの各保存則を適用してまとめると次式をうる。

$$\frac{h_{fg}}{v_{fg}} \left\{ v_g (W_{gd} - W_s - W_{swcond} - W_{sfcond}) - \frac{dV_d}{dt} \right\} - D_d \frac{dP}{dt} = 0 \quad (2.7.29)$$

ここで

$$D_d = \left\{ \left(\frac{\partial h_g}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_g}{\partial P} \right) \frac{1}{v_g} - \frac{1}{J} \right\} V_d \quad (2.7.30)$$

$$W_{swcond} = K_{swcond} \frac{h_f - h_{sw}}{h_{fg}} W_{fr} \quad : h_f > h_{sw} \quad (2.7.31)$$

$$= 0 \quad h_f \leq h_{sw}$$

$$W_{sfcond} = K_{sfcond} \frac{h_f - h_{fw}}{h_{fg}} W_{fw} \quad (2.7.32)$$

W_{swcond} ， W_{sfcond} はそれぞれサブクール水による凝縮，給水による凝縮流量であり， K_{swcond} ，

K_{sfcond} は定数である。 V_d はドーム部体積で、主蒸気管部の動特性を考慮しないときはこの領域の体積に主蒸気管の体積 V_p を含める。但し主蒸気隔離弁閉のときは除くためその効果を表わす V_{iso} ((2.8.3)式を参照) を用いて次式で表わす。

$$V_d = V_{do} - V_{sr} - V_p \cdot V_{iso} \quad (2.7.33)$$

ここで V_{do} は給水スパージャー以上からタービン入口までの体積で、 V_{sr} は上部ダウンカマの自由水面領域の体積である。

2.7.4 上部ダウンカマ領域

自由水面から給水スパージャーまでの上部ダウンカマ飽和領域に質量、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。

$$\frac{h_{fg}}{v_{fg}} \left\{ v_f (W_{fr} - W_{tsr}) + v_g W_{gsr} - \frac{dV_{sr}}{dt} \right\} + D_{sr} \frac{dP}{dt} = 0 \quad (2.7.34)$$

ここで

$$D_{sr} = \left(\frac{\partial h_f}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_f}{\partial P} \right) M_{fsr} + \left(\frac{\partial h_g}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_g}{\partial P} \right) M_{gsr} - \frac{V_{sr}}{J} \quad (2.7.35)$$

質量は質量保存則より次式で与えられる。

$$M_{sfr} = \int (W_{fr} + W_{gcu} - W_{tsr}) dt \quad (2.7.36)$$

$$M_{gsr} = \frac{V_{sr} - v_f M_{tsr}}{v_{fg}} \quad (2.7.37)$$

$$M_{fsr} = M_{tsr} - M_{gsr} \quad (2.7.38)$$

クオリティは次式で定義する。

$$x_{sr} = \frac{M_{gsr}}{M_{tsr}} \quad (2.7.39)$$

出口蒸気流量 W_{gsr} は x_{sr} を用いて求めるが、この領域の体積が極めて小さく負になったときは W_{gcu} と等しいとする。

$$\begin{aligned} W_{gsr} &= x_{cu} W_{tsr} & : & V_{sr} > V_{sr1} \\ &= W_{gcu} & : & V_{sr} \leq V_{sr1} \end{aligned} \quad (2.7.40)$$

V_{sr1} は定常時の体積の5%以下の値を用いている。

ダウンカマ部の水位偏差 ΔH_{mix} は、給水スパージャーから自由水面までの高さを H_{mix} 、その初期値を H_{mix0} とすれば

$$\Delta H_{mix} - H_{mix0} \quad (2.7.41)$$

$$\int_0^{H_{mix}} A(H) dH = V_{sr} \quad (2.7.42)$$

$A(H)$ は各高さにおける断面積で、 V_{sr} はこの領域の体積である。水位計に指示される水位 ΔH_{liq} は水頭であるから

$$\begin{aligned} \Delta H_{liq} &= \frac{V_f M_{tsr}}{V_{sr}} H_{mix} - H_{liq0} & : V_{sr} \geq 0 \\ &= H_{mix} - H_{liq0} & : V_{sr} < 0 \end{aligned} \quad (2.7.43)$$

実際の水位計の過渡状態では、計測器の持つ特性から一次おくれ、むだ時間および利得を考慮して次式で表わす。

$$\Delta H_{meter} = G_m \frac{1}{H\tau_{m1}S} e^{-\tau_{m2}S} \Delta H_{liq} \quad (2.7.44)$$

2.7.5 下部ダウンカマ領域

給水スパージャー以下の下部ダウンカマ領域の冷却水は通常運転状態ではサブクールである。

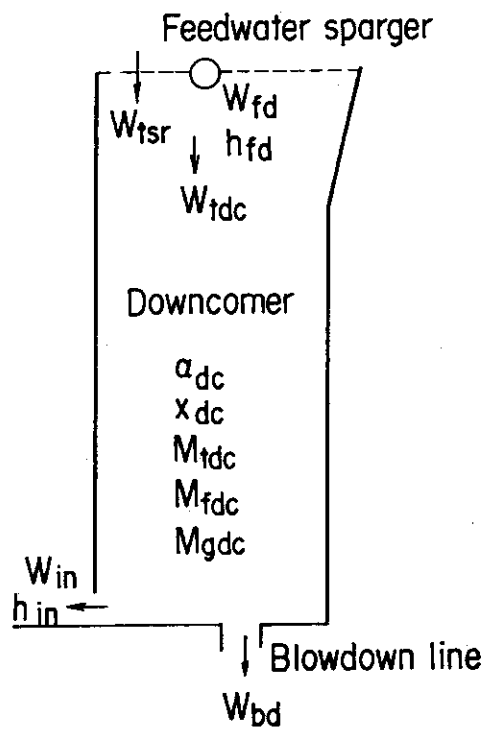


Fig. 2.5 Analytical model of SG downcomer

このときは加熱管領域の入口エンタルピ h_{in} はむだ時間を用いて表わす。給水混合後のこの領域の入口エンタルピを h_{dc} とすれば

$$h_{in} = e^{-\tau_{dc}S} h_{dc} \quad (2.7.45)$$

ここで

$$h_{dc} = \frac{W_{tsr} h_f + W_{gsr} h_g + W_{fd} h_{fd}}{W_{tdc}} \quad (2.7.46)$$

$$W_{tdc} = W_{tsr} + W_{fd} \quad (2.7.47)$$

$$\tau_{dc} = \frac{V_{dc}}{v_{dc} W_{tdc}} \quad (2.7.48)$$

比容積 v_{dc} は蒸気表から $v_{dc} = f(h_{dc})$ として求める。

次に給水流量の停止又は圧力の急激な低下が起こるとこの領域の冷却水は2相流となる。この場合に質量，体積，エネルギーの各保存則を用いてまとめると次式になる。

$$\frac{h_{ig}}{v_{fg}} \left\{ v_f (W_{tsr} + W_{fd} - W_{in} - W_{bd}) - v_{fg} (W_{gsr} - W_{gin}) \right\} - (h_f - h_{fd}) W_{fd} - D_{dc} \frac{dP}{dt} = 0 \quad (2.7.49)$$

ここで

$$D_{dc} = \left(\frac{\partial h_f}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_f}{\partial P} \right) M_{fdc} + \left(\frac{\partial h_g}{\partial P} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{\partial v_g}{\partial P} \right) M_{gdc} - \frac{V_{dc}}{J} \quad (2.7.50)$$

質量は質量保存則より

$$M_{tdc} = \int (W_{tsr} + W_{fd} - W_{in} - W_{bd}) dt \quad (2.7.51)$$

$$M_{gdc} = \frac{V_{dc} - v_f M_{tdc}}{v_{fg}} \quad (2.7.52)$$

$$M_{fdc} = M_{tdc} - M_{gdc} \quad (2.7.53)$$

平均のボイド率 α_{dc} は

$$\alpha_{dc} = \frac{v_g M_{gdc}}{V_{dc}} \quad (2.7.54)$$

気泡の上昇速度を u_{bdc} ，断面積を A_{dc} とすれば蒸気流量 W_{gdc} は

$$W_{gdc} = \frac{\{ v_f W_{in} - A_{dc} (1 - \alpha_{dc}) u_{bdc} \} \alpha_{dc}}{v_g - v_{fg} \alpha_{dc}} \quad (2.7.55)$$

W_{gdc} が正のときは下降流，負のときは上昇流であり，上部ダウンカム領域へ流出する。

クオリティは次式で定義する。

$$x_{dc} = \frac{M_{gdc}}{M_{tdc}} \quad (2.7.56)$$

出口流量はクオリティの分布を考慮して

$$W_{gin} = K_{dc} x_{dc} W_{in} \quad (2.7.57)$$

(2.7.55) と (2.7.57) 式の大きい方を用いる。

この領域が飽和又は未飽和の状態へ変化しつつある場合は (2.7.50) 式の D_{dc} に対し出入口エンタルピーより，飽和度を表わし，次式で計算される係数 SF_{dc} を用いる。

$$\begin{aligned}
 SF_{dc} = 1 & : \text{全領域が飽和} \\
 = \frac{h_{dc} - h_f}{h_{dc} - h_{in}} & : \text{ダウンコマ入口側が飽和} \\
 = \frac{h_{in} - h_f}{h_{in} - h_{dc}} & : \text{加熱領域入口側が飽和} \\
 = 0 & : \text{全領域が未飽和}
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} SF_{dc} = 1 \\ = \frac{h_{dc} - h_f}{h_{dc} - h_{in}} \\ = \frac{h_{in} - h_f}{h_{in} - h_{dc}} \\ = 0 \end{aligned}} \right\} (2.7.58)$$

(2.7.58)式の SF_{dc} を(2.7.50)式に剩じることにより、この領域の飽和水が圧力変化率に及ぼす効果を連続に表わすことができる。

2.7.6 冷却材の水力学特性

蒸気発生器2次側の自然循環流量は次のような方法で決定される。

加熱領域入口流量に注目し、この流量を中心に一点近似のモーメントバランス式を用い、他の場所では圧力損失のみを考慮する。

$$I \frac{dW_{in}}{dt} = g(P_{dh} - FR_{sg}) \quad (2.7.59)$$

ここで

$$I = \sum_i L_i / A_i \quad (2.7.60)$$

P_{dh} : 密度差による循環水頭

FR_{sg} : SG内の圧力損失の合計

2相流に対してはThomの圧損倍率⁽⁸⁾を用いている。圧力損失の計算には、ブラジウスの摩擦損失、拡大流、縮流によるもの、オリフィスによるもの及び加速圧力損失の5種類を用いている。

2.8 蒸気系統動特性

2.8.1 蒸気発生器より流出する蒸気流量

蒸気発生器から流出する蒸気流量は、タービン流量、蒸気ダンプ流量、逃し弁流量(大気放出)をそれぞれ W_{st} 、 W_{sd} 、 W_{srf} 、また系の熱損失を蒸気流量に換算した量を W_{loss} とすれば次式で表わされる。

$$W_s = W_{st} + W_{sd} + W_{srf} + W_{loss} \quad (2.8.1)$$

2.8.2 主蒸気管による圧力降下

圧力の伝播速度は極めて早いので主蒸気管内の圧力分布がただちに平衡に達すると仮定すればタービン入口圧力 P_t は圧力損失を考慮して

$$P_t = \{ V_{iso} (P_{sg} + 1) - 1 \} - K \Delta P_t^* (W_{st} + W_{sd})^2 \quad (2.8.2)$$

V_{iso} は主蒸気隔離弁の効果で

$$\left. \begin{aligned} V_{iso} = 1 & : \text{全開} \\ & = f_{iso}(t) : \text{閉進行中} \\ & = 0 : \text{全閉} \end{aligned} \right\} (2.8.3)$$

ΔP_i^* は定格出力時の主蒸気管による圧力降下であり、Kは定数である。

2.8.3 主蒸気管部の動特性

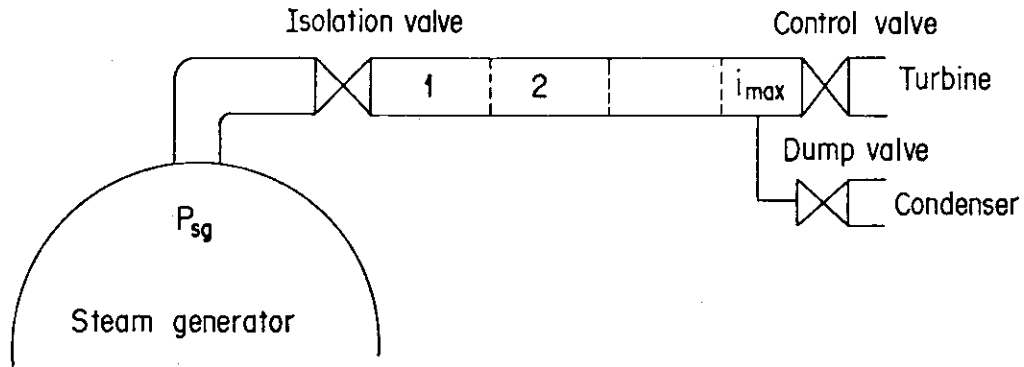


Fig. 2.6 Analytical model of steam line

蒸気発生器出口からタービン入口までの主蒸気管内の蒸気の挙動の蒸気発生器及び原子炉への効果を考慮する必要のあるときは次のモデルを取入れる。

蒸気発生器出口から主蒸気隔離弁までを一領域とし、そこからタービン入口制御弁までFig. 2.6のように i_{max} 等分する。また蒸気逃し弁の流量はドーム圧 P_{sg} を用いて計算し、蒸気ダンプ弁は最終領域に含めて取扱う。

質量保存則より

$$\frac{\partial M_{s,i}}{\partial t} = W_{s,i-1} - W_{s,i} \quad (2.8.4)$$

体積保存則より

$$v_g \frac{\partial M_{s,i}}{\partial t} + M_{s,i} \frac{\partial v_g}{\partial P} \frac{dP_i}{dt} = 0 \quad (2.8.5)$$

(2.8.4), (2.8.5) 式より

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{v_g}{\frac{\partial v_g}{\partial P} M_{s,i}} (W_{s,i} - W_{s,i-1})$$

領域間の蒸気流量は差圧の $1/2$ 乗に比例するとして

$$W_{s,i} = K_i \sqrt{P_{i-1} - P_i} \quad (2.8.6)$$

K_i は定数である。但し最終領域の蒸気流量は次節の方法により決定する。

2.8.4 タービン系統蒸気流量

タービン制御弁の開度と蒸気流量とは直線的であるものとし、同一開度では蒸気流量はタービンの入口圧力と背圧の差圧に比例するので

$$W_{st} = K_{st} V_{tcv} \frac{P_{to} + 1}{P_{to}^* + 1} \quad (2.8.7)$$

$$P_{to} = V_{tcv} (P_t + 1) - 1 \quad (2.8.8)$$

ここで K_{st} は定数、 V_{tcv} はタービン入口制御弁又は主塞止弁であり、 P_{to} は弁の下流側圧力である。

タービン制御弁開度は負荷の大きさにより自動制御されるので次式で表わす。

$$V_{tcv} = G_{tcv} \frac{1 + \tau_3 S}{(1 + \tau_1 S)(1 + \tau_2 S)} e^{-\tau_4 S} \text{ [G.L]} \quad (2.8.9)$$

[G.L] は発電機負荷であるが、本解析コードではタービン入口までしか取扱っていないのでタービンへの蒸気流量を用いて表わす場合と外部から入力する場合とを取扱う。

タービンへのバイパスである蒸気ダンプ弁は圧力又は一次冷却材平均温度により制御される。

$$W_{sd} = K_{sd} V_{sd} \quad (2.8.10)$$

K_{sd} は定数、 V_{sd} は圧力又は平均温度の関数である。

2.8.5 蒸気逃し弁流量

蒸気逃し弁（大気放出弁）からの蒸気流量は定格圧力を基準にして

$$W_{srf} = K_{srf} V_{srf} \frac{P_{sg} + 1}{P_{sg}^* + 1} \quad (2.8.11)$$

K_{srf} は定数で V_{srf} は圧力の関数で表わされる逃し弁開度である。

2.9 給水系統動特性

2.9.1 蒸気発生器給水流量制御系

蒸気発生器への給水流量は、蒸気流量、給水流量、水位の3要素により自動制御される。Fig. 2.7に給水制御系のブロックダイアグラムを示したが、これには2つのタイプを考慮している。1つは電気駆動による給水ポンプを一定速度で回転させ、弁開度により給水流量を制御する方式であり、他方は弁開度を一定とし、タービン駆動の給水ポンプを用いて回転数を変えることにより給水流量を制御する方式である。

2.9.2 給水エンタルピ

給水エンタルピは給水流量又は給水ヒーターへの蒸気流量が変化したときかわるが、その時定数が大きいいため次の形で表わす。

$$h_{fd} = \frac{1}{1 + \tau_1 S} e^{-\tau_2 S} h_{fd0} \quad (2.9.1)$$

ここで、 τ_1 、 τ_2 はそれぞれ給水ヒーターの熱容量、給水ヒーターから蒸気発生器までの輸送時間から決定される。 h_{fd} は定常状態における各出力レベルの給水エンタルピで給水流量の関数として表わされる。

2.10 原子炉自動制御系

原子炉自動制御系は一次冷却材平均温度を設定温度に保持させるために、設定温度との偏差信号の他、中性子束及びタービン第一段圧力との偏差の出力不一致信号とから制御棒を駆動させるシステムである。Fig. 2.8に制御系ブロックダイアグラムを示す。

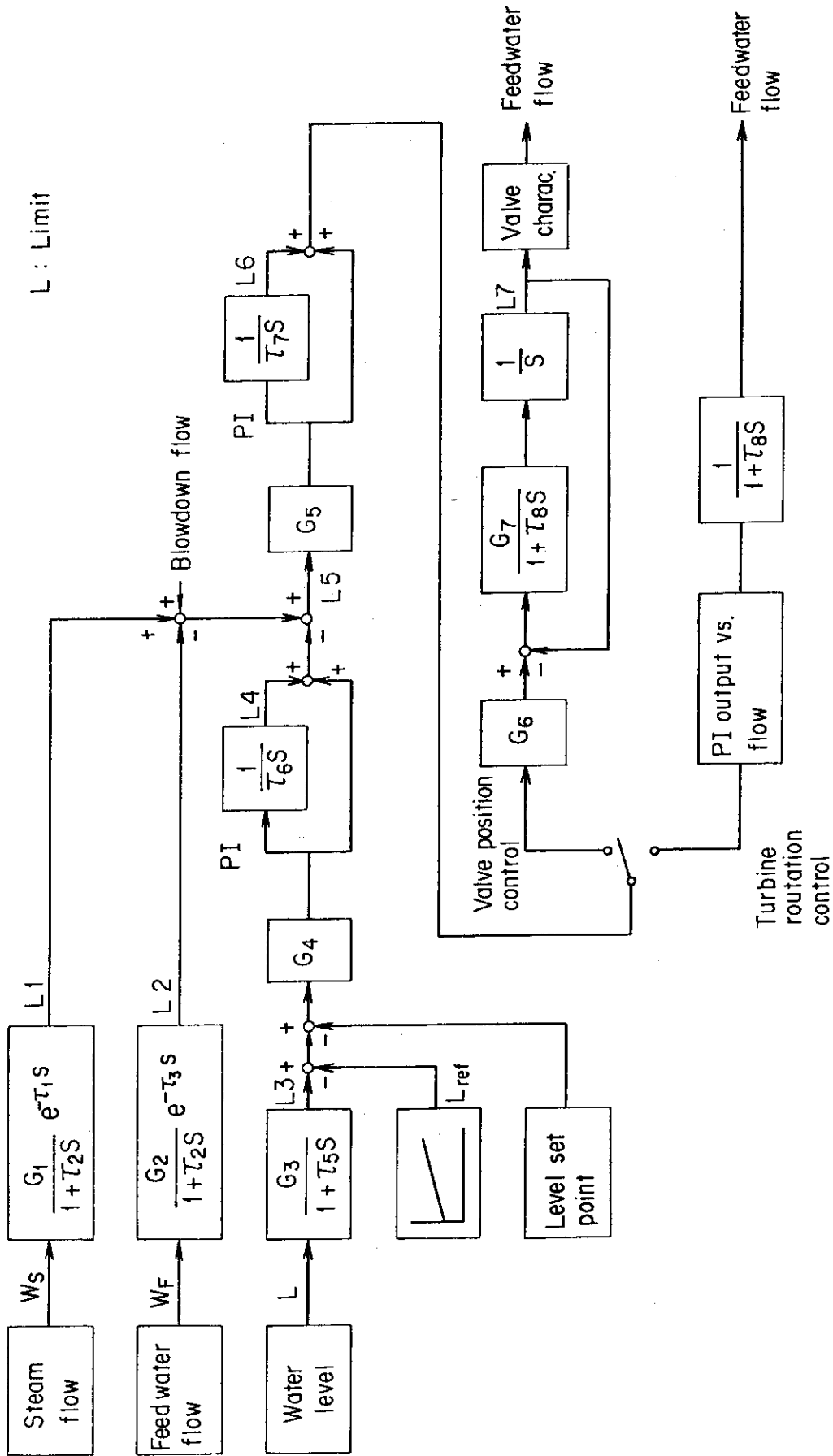


Fig. 2.7 Block diagram of feedwater control system

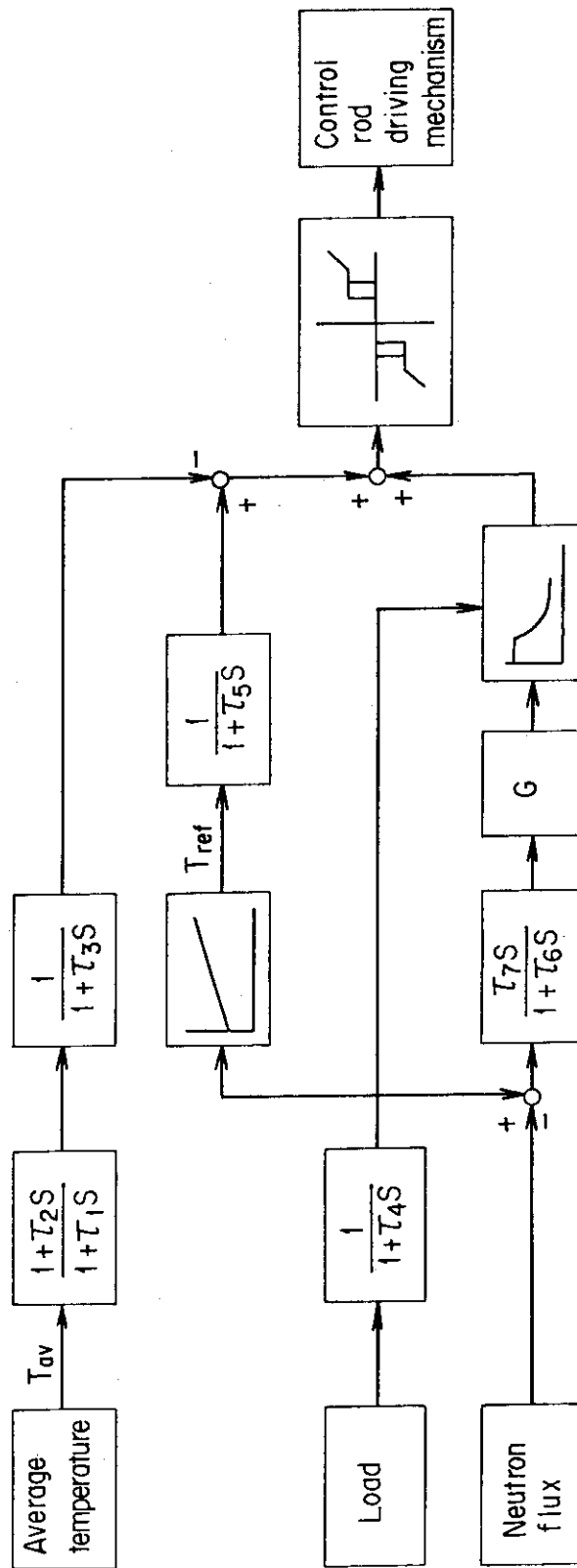


Fig. 2.8 Block diagram of reactor automatic control system

3. 数値解法

3.1 初期定常状態の計算

過渡解析に移る前に一次及び二次系のヒートバランスを整合させなければならない。まず、設定出力に対する炉心入口温度を設定し、次にSGへの伝熱量、SG内の2次冷却材自然循環流量を決定する。以下にこれらの決定法について述べる。

PWRでは各出力に対する一次冷却材の平均温度がプログラミングされていることから、この関係を満たす様に平均温度が決定されなければならない。このためには次の式が満足される必要がある。

$$T_{in} + T_{out} - 2T_{av} = 0 \quad (3.1.1)$$

$$h_{out}(T_{out}) - h_{in}(T_{in}) - \frac{Q}{W_c} = 0 \quad (3.1.2)$$

ここで出力 Q 、炉心流量 W_c 、平均温度 T_{av} は入力データから得られる。炉心の出入口エンタルピ h_{out} 、 h_{in} は出入口温度 T_{out} 、 T_{in} から蒸気表を用いて求められる。

(3.1.1)、(3.1.2)式を満たすために次の手順ではさみ打ち法により T_{in} を決定する。推定した値 T_{in} を用いて(3.1.1)式から求めた T_{out} ($=2T_{av} - T_{in}$)を、(3.1.2)式に代入して得られる値を相対値で表わすと

$$\Delta h = \frac{h_{out}(T_{out}) - h_{in}(T_{in})}{\frac{Q}{W_c}} - 1 \quad (3.1.3)$$

Δh が設定値 ϵ 以下になるように T_{in} を次式を用いて修正する。

$$T_{in}' = T_{in}(\Delta h \cdot R_t + 1) \quad (3.1.4)$$

ここで R_t は重みで $0 < R_t < 1$ である。4章の計算例ではくり返しは $\epsilon = 10^{-4}$ とし、 $R_t = 0.01$ を用いると12回で収束する。但し13回で $\Delta h = 6.77 \times 10^{-5}$ となり、これ以下の値にはならない。 $R_t = 0.05$ を用いると44回で収束し、47回で $\Delta h = 6.77 \times 10^{-5}$ 、48回で -4.53×10^{-5} となり、この2つの値が交互に表われ減少しない。また $R_t \geq 0.06$ では発散する。

次に原子炉出力とSGへの伝熱量とを等しくする。このときSG2次側温度も伝熱量の関数になっているので、2次側の熱バランスも同時に決定する必要がある。このためには次式を満足すればよい。

$$\sum_i Q_{hi} - Q = 0 \quad (3.1.5)$$

$$\sum_i Q_{hi} + h_{fd}W_{fd} - h_gW_s - h_{in}W_{bd} = 0 \quad (3.1.6)$$

ここで Q_{hi} は(2.7.5)式から計算され、(2.5.4)式の Q_i とは定常状態では $\sum Q_{hi} = \sum Q_i$ である。また $\sum Q_{hi}$ は加熱管領域の冷却材による除熱量に等しいから出口エンタルと h_{out} の和($= h_f + x_h h_{fg}$)を用いて次式が成立する。

$$\sum Q_{hi} = W_{in} (h_{out} - h_{in}) \quad (3.1.7)$$

ここで W_{in} , h_{in} , x_h の各変数はどれか1つの値が決定されると他の値も一意的に定まる。そこで(3.1.5), (3.1.6)式を満足させるために前者に対してはU字管の熱伝達係数 H_u を、後者に対しては自然循環流 W_{in} を決定する方式で行う。まず x_h に推定値を他のパラメータに入力データを用いて W_{in} を求める。

$$W_{in} = \frac{1 - x_{cu}}{x_h - x_{cu}} W_s \quad (3.1.8)$$

これより加熱管領域の入口エンタルピは次式となる。

$$h_{in} = \frac{(h_f + x_{cu} h_{fg})(W_{in} - W_{fd} + W_{bd}) + h_{fd} W_{fd}}{W_{in} + W_{bd}} \quad (3.1.9)$$

入口エンタルピの値から加熱管領域のクオリティ及びボイド分布が得られ、 x_h も修正される。これらの値を用いて圧力損失 P_{fr} , 密度差による駆動水頭 P_{dh} が求められ、相対誤差 ΔP が得られる。

$$\Delta P = \frac{P_{dh}}{P_{fr}} - 1 \quad (3.1.10)$$

一方加熱管領域のエンタルピ分布から蒸気表により温度分布を求める。その値から求めた伝熱量 $\sum Q_{hi}$ と Q との相対誤差は次式となる。

$$\Delta Q = \frac{Q}{\sum_i Q_{hi}} - 1 \quad (3.1.11)$$

(3.1.10), (3.1.11) 式の ΔP , ΔQ が設定値 ϵ 以下となるように次式を用いて(3.1.8)式からくり返し計算を行う。

$$W_{in}' = W_{in} (\Delta P \cdot R_p + 1) \quad (3.1.12)$$

$$H_u' = H_u (\Delta Q \cdot R_g + 1) \quad (3.1.13)$$

(3.1.13) 式ではU字管の熱伝導度から求めた熱伝達係数より小さい値が得られる。これは物理的には管壁と水との接触抵抗、管壁のよごれ係数の効果等による伝熱量の減少と解釈される。

R_p , R_g は重みであり、4章の計算例では $R_p = 0.7$, $R_g = 0.9$ を用いると ΔQ は22回、 ΔP は45回で $\epsilon < 10^{-4}$ となり、 ΔQ が27回、 ΔP が55回で $\epsilon < 10^{-5}$ となる。

3.2 主要パラメータの計算

蒸気発生器2次側の各領域の出入口流量、自由水面領域の体積の変化率、圧力の変化率を正確に求めるために W_{th} , W_{gh} , W_{fh} , W_{tr} , W_{gr} , W_{fr} , \dot{V}_{sr} , \dot{P} の8変数に係わる式を連立方程式と見なして解く。加熱管領域では一次元で取扱っているが、隣接領域との関係式を冷却材の流れが遅い場合のモデルも考慮して加えると飽和領域に関して一つの式が得られる。

$$\begin{aligned} v_f W_{in} - \{ v_f + v_{fg} x_{hi} K_{imax} + (1 - K_{imax}) C_{1imax} \} W_{himax} + C_{1imax} C_{2imax} \\ + \frac{v_{fg}}{h_{fg}} \left(\sum_i Q_i - \frac{dP_{sg}}{dt} \sum_i D_{hi} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.1.14)$$

ここで

$$C_{1i} = \frac{v_f \alpha_{hi}}{v_g + v_{fg} \alpha_{hi}} \quad (3.1.15)$$

$$C_{2i} = \frac{u_{bhi}}{v_f} A_h (1 - \alpha_{hi}) \quad (3.1.16)$$

$$\left. \begin{aligned} K_i &= 1 : x_{hi} W_{hi} \geq C_{1i} (W_{hi} + C_{2i}) \\ &= 0 : x_{hi} W_{hi} < C_{1i} (W_{hi} + C_{2i}) \end{aligned} \right\} (3.1.17)$$

8変数のうち W_{th} , W_{gh} , W_{fh} は i_{max} 領域の出口流量である。これらの連立方程式の解はサブルーチン「CROUT」⁽⁹⁾を用いて求める。

3.3 主なサブルーチン

本解析コードの中で用いているサブルーチンとファンクションをTable 3.1に示す。蒸気表⁽¹¹⁾に関するものはTSTEAM, FTHP, FVSPでありTSTEAMは飽和状態の圧力から温度, エンタルピ, 比容積とその圧力に対する変化勾配を求めている。計算法の特徴は圧力を1~185 kg/cm²・aの間で変化率を考慮して56点とり, これを18のグループに分割し, 各々のグループで圧力の3次式で近似し, その係数をDATA文で与える方式を用いているので, 高精度でかつ計算時間が短いことである。サブクール水のエンタルピから温度, 比容積を求めるファンクションFTHP, FVSPも同様の方式を用いている。但しFTHPではエンタルピから温度を求める場合と逆の場合と値が一致するように前者は2次式で近似し, その係数をDATA文で与え, 後者はそれを利用して根の公式から求めている。なおサブクール水の場合は圧力依存性が小さいので160 kg/cm² aの状態における値を用いており圧力の効果は無視している。

むだ時間についてはファンクションDELAY, DELAYSがあり前者はむだ時間 τ_d が長いかわり変化する場合で後者は τ_d が短く一定の場合である。これはDELAYSでタイムメッシュ毎に記憶させた値から τ_d だけ溯ったデータを用いる方式を用いているが, この方式では τ_d が時間依存の場合に物理的に無意味になることがあるため, 一次遅れの結合で近似する方式を用いたのがDELAYである。これは, 例えばエンタルピの輸送遅れにむだ時間を用いるとき, 流量がポンプトリップにより指数関数的に減少すると τ_d も同様に増加し, 計算時間 t より τ_d の方が大きくなる。この結果 $t < \tau_d$ ではエンタルピは常に初期値を用いることになり実際の現象と異ってくるからである。

積分及び一次遅れに関してはオイラー法を用いてファンクションINTGRL, REALPLで解いている。これらのファンクションを適当に組合せることにより制御系の模擬を容易に行うことができる。

Table 3.1 SUBROUTINES and FUNCTIONS of PWRDYN code

SUBROUTINE AND FUNCTION NAME		
1	MAIN	MAIN PROGRAM
2	CARDIN	WRITE INPUT DATA TO DISK
3	SREAD	DATA READING
4	STEADY	INITIAL CONDITION CAL.
5	FLUX	NEUTRON KINETICS
6	FTEMP	FUEL TEMPERATURE CAL.
7	RCORE	CORE THERMODYNAMICS
8	UTUBE	SG U-TUBE COOLANT THERMODYNAMICS OF PRIMARY LOOP
9	LPTEMP	PRIMARY LOOP TEMPERATURE DISTRIBUTION CAL.
10	PCFLOW	PRIMARY COOLANT DYNAMICS BEHAVIOR
11	PRIZER	PRESSURIZER THERMODYNAMICS
12	SUBACS	TAV CONTROL SYSTEM
13	SCRAM	SCRAM CONDITIONS AND REACTIVITY
14	SREACT	REACTIVITY CALCULATION
15	SGDYN	STEAM GENERATOR THERMODYNAMICS
16	CONVSG	NATURAL CIRCULATION FLOW CAL. OF SG
17	SUBWS	MAIN STEAM FLOW CAL.
18	SLINE	STEAMLINE DYNAMICS
19	SUBWF	FEEDWATER FLOW AND CONTROL SYSTEM
20	TSTEAM	STEAM TABLE UNDER SATURATED CONDITION
21	CHANGE	DISTURBANCE CAL.
22	CROUT	SOLUTION OF SIMULTANEOUS LINEAR EQUATIONS
23	SWRITE	PRINT OUT OF CALCULATION RESULTS
24	SPLIT	PRINTER PLOT OF MAIN VARIABLES
25	PRPLOT	SUBPROGRAM OF PRINTER PLOT (FRAME SET)
26	MAINB2	SUBPROGRAM OF PRINTER PLOT (PLOT POSITION CAL.)
27	NEAR	SUBPROGRAM OF PRINTER PLOT (SCALING)
28	MAXABS	SUBPROGRAM OF PRINTER PLOT (MAX. AND ABSOLUTE VALUE)
29	GRAPH	GRAPH OUTPUT
30	SECTIN	SUBPROGRAM OF GRAPH (FRAME SET)
31	STITLE	PRINT OUT OF TITLE, DATE, PAGE
FUNCTIONS		
32	FWILSN	BUBBLE RISE VELOCITY USING WILSON'S CORRELATION
33	FSLIP	VOID OR QUALITY CAL. ARMAND, BANKOFF, CONST.SLIP MODEL
34	FTHOM	TWO PHASE MULTIPLIER USING THOM'S CORRELATION
35	COLBUN	HEAT TRANSFER COEFFICIENT CAL. BY COLBURN EQ.
36	ROSNOW	HEAT TRANSFER COEFFICIENT CAL. BY ROHSENOW EQ.
37	FTHP	SUBCOOLED ENTHALPY VS. TEMPERATURE CAL.
38	FVSP	SUBCOOLED ENTHALPY VS. SPECIFIC VOLUME CAL.
39	FRICT	FRICTION LOSS CAL.
40	FUNHWF	FEEDWATER ENTHALPY CAL.
41	FUNCEX	COMPARING DATA READ AND STORE
42	FUNCNX	NORMARIZATION OF AXIAL POWER DISTRIBUTION
43	FUNCFX	INTERPOLATION AND EXTRAPOLATION
44	INTGRL	INTEGRATION USING EULER METHOD
45	REALPL	FIRST ORDER LAG USING EULER METHOD
46	LIMIT	LIMITATION OF MAX. AND MIN. VALUE
47	DELAY	DEAD TIME OF VARIABLE TIME
48	DELAYS	DEAD TIME OF CONSTANT TIME
49	SECOND	FITTING BY USING QUADRATIC EXPRESSION

4. 性能評価計算例

PWRDYN の性能評価計算例として原子力船「むつ」プラントの動特性解析を行った。「むつ」は出力 36 MWt の船用 PWR で、2 つの冷却ループを有しており、Fig. 4.1 にフローシケンスの概念図を示す。また「むつ」と商業用 PWR の主要パラメータの比較を Table 4.1 に示す。

PWRDYN による計算結果の妥当性を評価するため、RETRAN を用いて計算した結果と比較した。(RETRAN による「むつ」解析の詳細は文献 (11) 参照。) 実測データを用いなくて 2 つのコードを比較する場合、解析モデルの違い、入力データの違い (特にチューニングパラメータ等) などから一概に良否の判定はできないので、ここでは小幅な外乱でかつ熱水力モデルのみの比較のため制御系を手動モードにしたケースを選んだ。Fig. 4.2 では反応度を 0.2 \$, Fig. 4.3 では負荷を 10% 変化させ、いずれも外乱の平均値が零となるように入力した。その結果図の如く (実線が PWRDYN, Δ 印が RETRAN による結果を示す), 中性子束, 炉心出口温度, 加圧器圧力, SG 二次側の圧力, 液体水位について PWRDYN と RETRAN の結果はほぼ一致している。

計算時間を比較すると FACOM-M200 を用いた場合、PWRDYN は 60 sec までの事象変化を計算するのにタイムステップ数は 1201 (タイムメッシュ 50 m sec) で、所用計算時間は 8.5 sec CPU 時間であるのに対し、RETRAN は 53.7 sec までの計算で 8305 タイムステップ (平均のタイムメッシュ 6.5 m sec), 3577 sec CPU 時間であり、同一事象経過時間を解析するに要する CPU 時間は PWRDYN の 470 倍, 1 タイムステップ当りの CPU 時間は 61 倍である。しかし RETRAN のモデルが 2 ループであるので 1 ループ計算をすればこれらの数値は約半分となる。RETRAN が長時間の CPU 時間を要するのは、緒言で述べたように初期の目的が LOCA 解析など極めて大幅な変動を解析対象にしているため、モーメントの式を場所依存で厳密に解いていることによる。従って、目的の異なる 2 つのコードの計算時間を比較することは無意味かもしれない。しかし、ここで示した計算例の如く小幅変動に対しては場所依存のモーメントの式を用いない場合でも精度はそれ程落ちない。むしろ一次ループに関しては、冷却材が 2 相流になる場合を除けばほとんど用いる必要はないものと考えられる。その意味で RETRAN に場所依存のモーメントの式を用いるか否かのオプションがあれば、小幅変動の過渡応答に対し、より実用的な解析コードとなると考えられる。

PWRDYN は、制御系の評価、運転モードの変更時の応答等比較的小幅な外乱で、しかも多ケースを要する解析を対象に開発されたものであり、解析可能な計算ケースは、後述の注意点を留意して次の通りである。(5章の CARD - 45 ~ 54 の入力説明参照)

- I. ポンプの停止, 故障
 - ① 主冷却ポンプの停止
 - ② 給水ポンプの停止及び再起動
- II. 弁の開閉, 故障

- ① 主蒸気隔離弁
- ② タービン制御弁
- ③ タービン主塞止弁（タービン又は発電機トリップ）
- ④ 大気放出弁
- ⑤ 主蒸気ダンプ弁
- ⑥ 加圧器逃し弁
- ⑦ 加圧器スプレイ弁

Ⅲ. 制御系の特性, 故障

- ① 給水制御系水位設定点変更
- ② 原子炉自動制御系温度設定点変更
- ③ 加圧器備後ヒータフェイルオン

Ⅳ. その他

- ① 反応度挿入
- ② 給水エンタルピの変更
- ③ 主冷却水流量の変更

以上の項目の過渡応答のうちケースにもよるが、最小限①一次冷却水が未飽和であること②SG二次側の自然循環流量が連続であること、の2点を満足していることが評価精度を維持するために必要である。従って今後はこれら2点を改良すると同時に一次ループを多ループにすること及び小破断のモデルをとり入れることにより、SG細管破断等の各種事故の解析も可能となる。またこのようなモデルの改良により、事故発生時に事故の進展を予測するための高速計算コードとしての機能も設わるものと考えられる。しかし、高速計算コードの具備すべき主要条件としては、①大、中LOCA以外の事象の解析がある程度の精度内で可能なこと②計算時間が実時間の約1/10であることの2項目が要求されると考えられる。このうち①については前述の改良を行うことによりほど満たされると考えられるが、②については現在のモデルで実時間の約1/7であるから、これをさらに短縮するためには、パラメータ間の相関を用いるとか伝達関数で横擬するなどの工夫が必要であると考えられる。

Table 4.1 Comparison of Mutsu plant design parameter with commercial PWR

Item	Mutsu	Ikata-1	Takahama-1	Ohi-1
Reactor power	36	1657	2440	3423
Pressurizer pressure	(MWt)			
	110	157	157	157
Steam generator pressure	(kg/cm ² .g)			
	40	58	54	54
Core inlet temperature	(°C)	271	288	289
Core exit temperature	(°C)	285	323	325
Number of primary loop		2	2	3
Core coolant flow rate	(T/H)	1800	30000	45000
Core coolant flow per power	(T/H/MWt)	50.0	17.5	18.4
Core height	(m)	1.04	3.66	3.66
Core diameter	(m)	1.44	2.46	3.03
Number of assemblies		32	121	157
Rod arrangement		11x11	14x14	15x15
Steam flow rate per SG	(T/H)	30.6	1620	1600

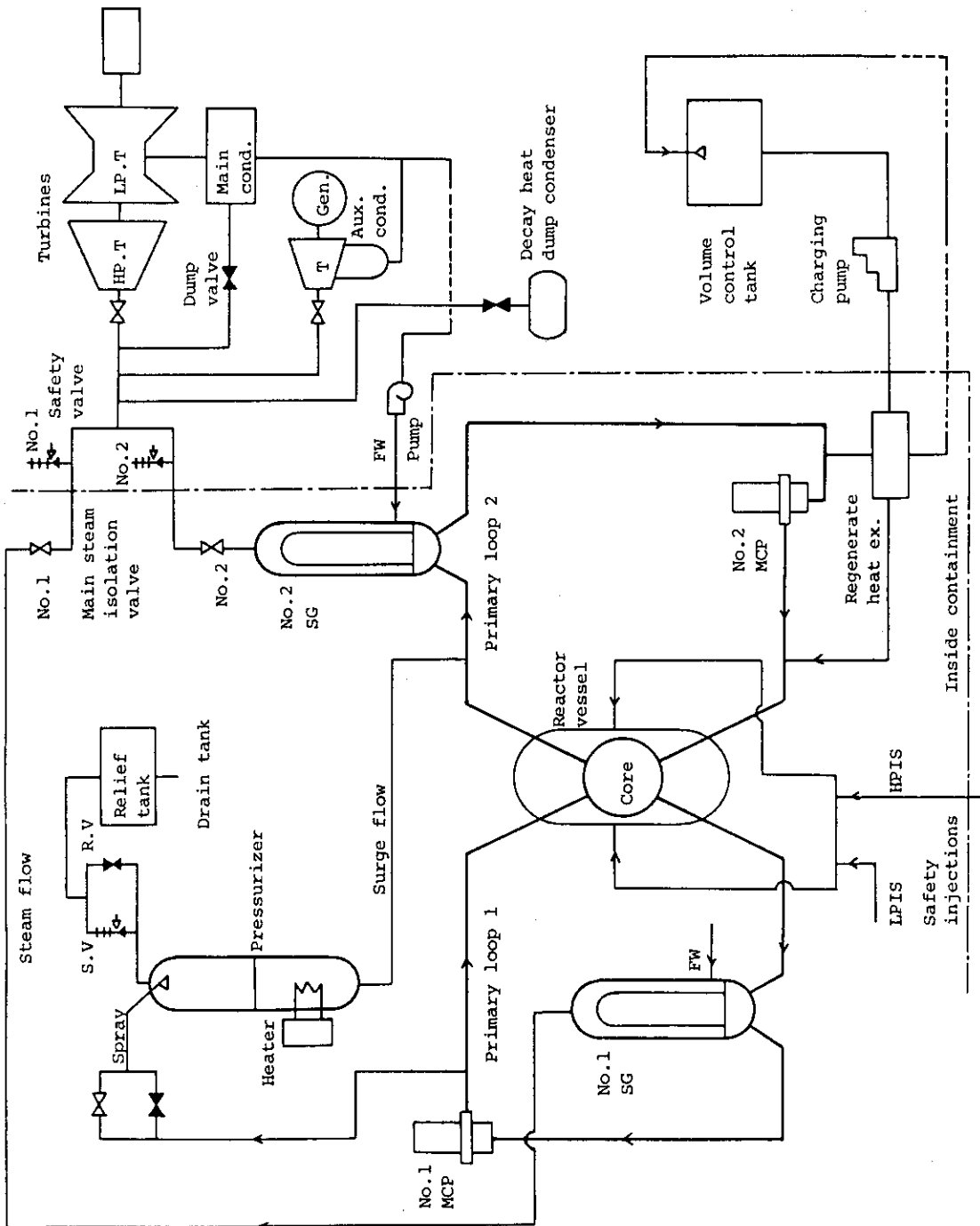


Fig.4.1 Schematic flow diagram of "Mutsu" plant

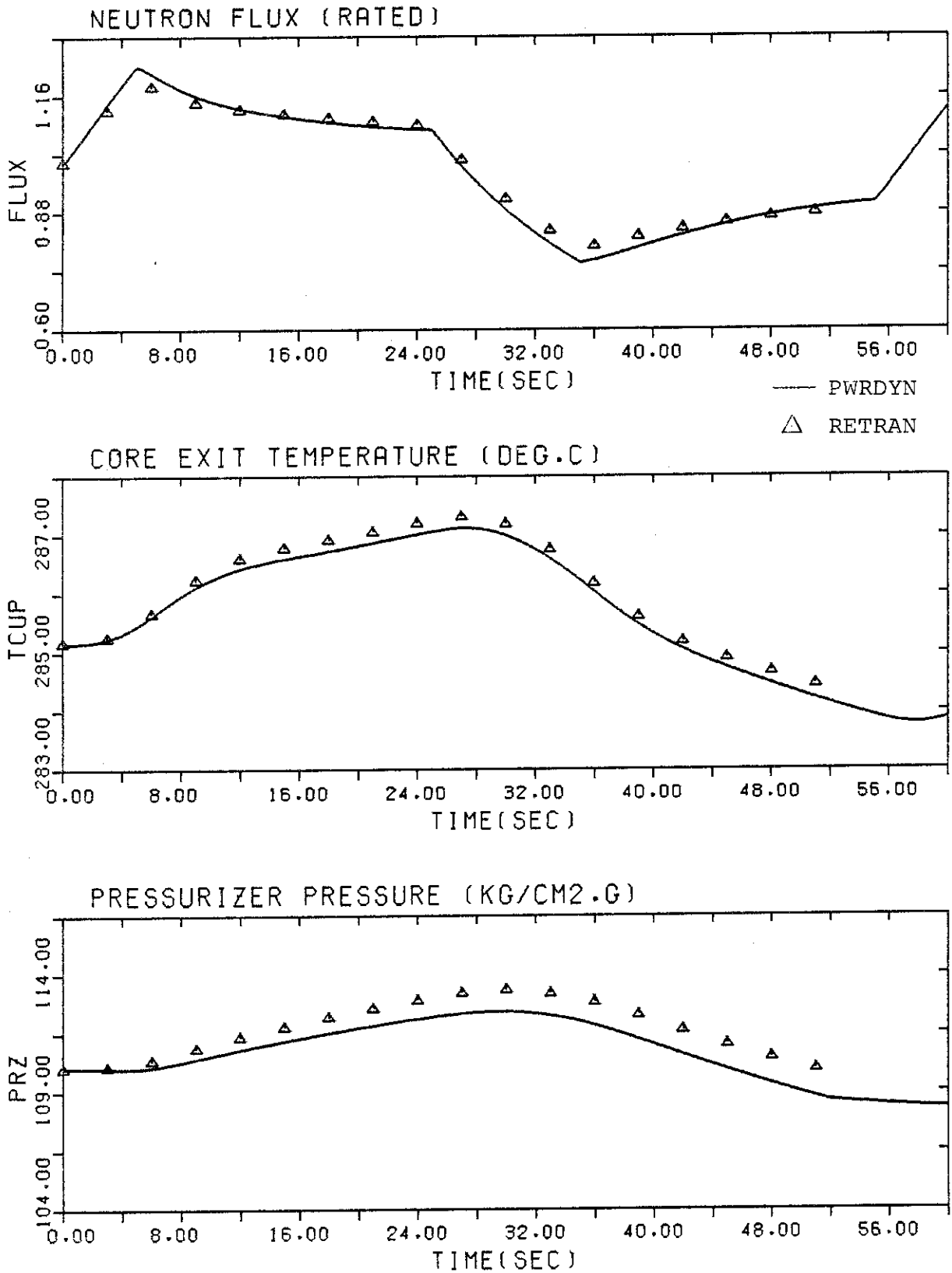


Fig.4.2.a Comparison of calculated results using PWRDYN with RETRAN in the case of reactivity insertion 20 cents

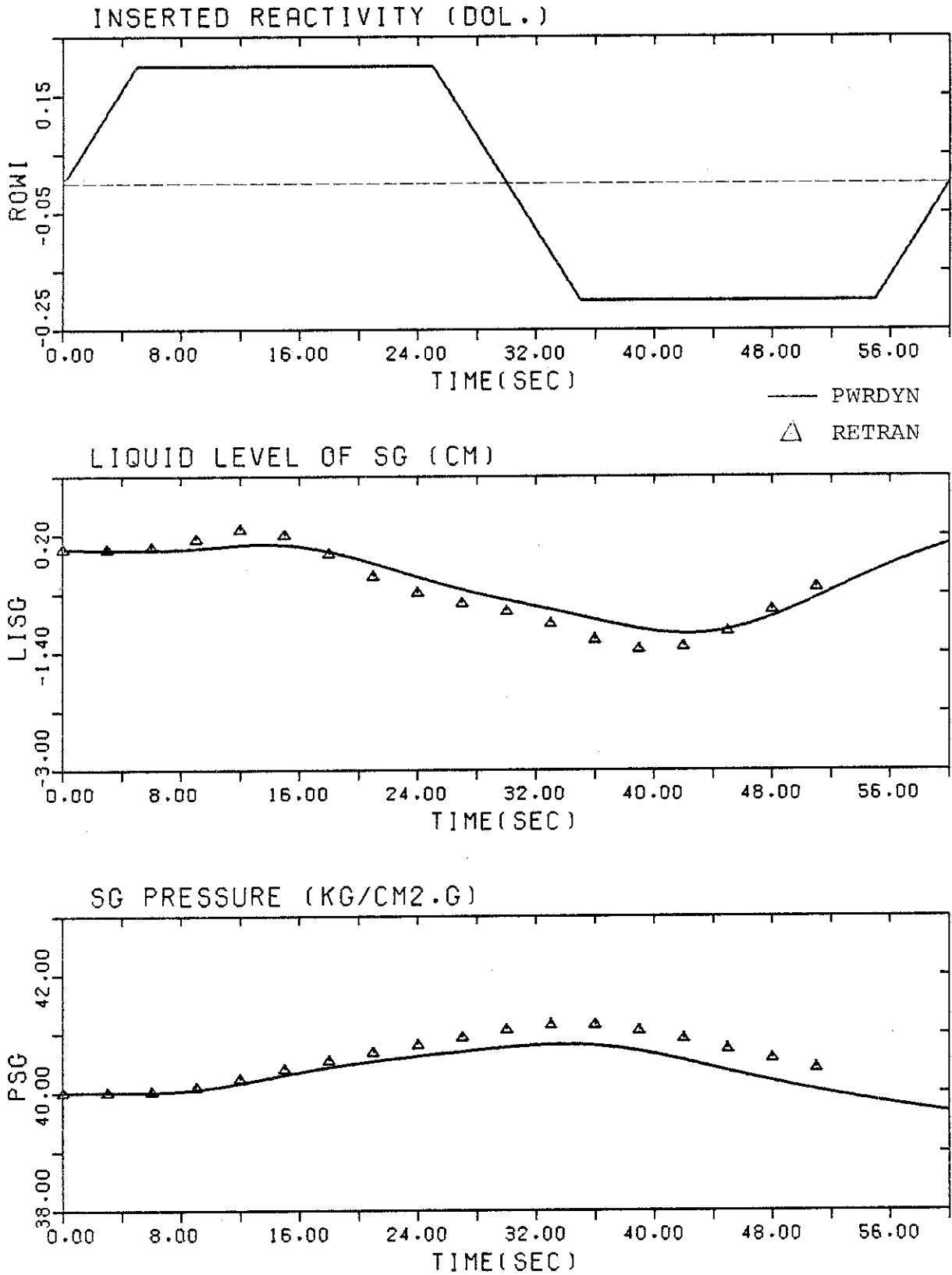


Fig.4.2.b Comparison of calculated results using PWRDYN with RETRAN in the case of reactivity insertion 20 cents

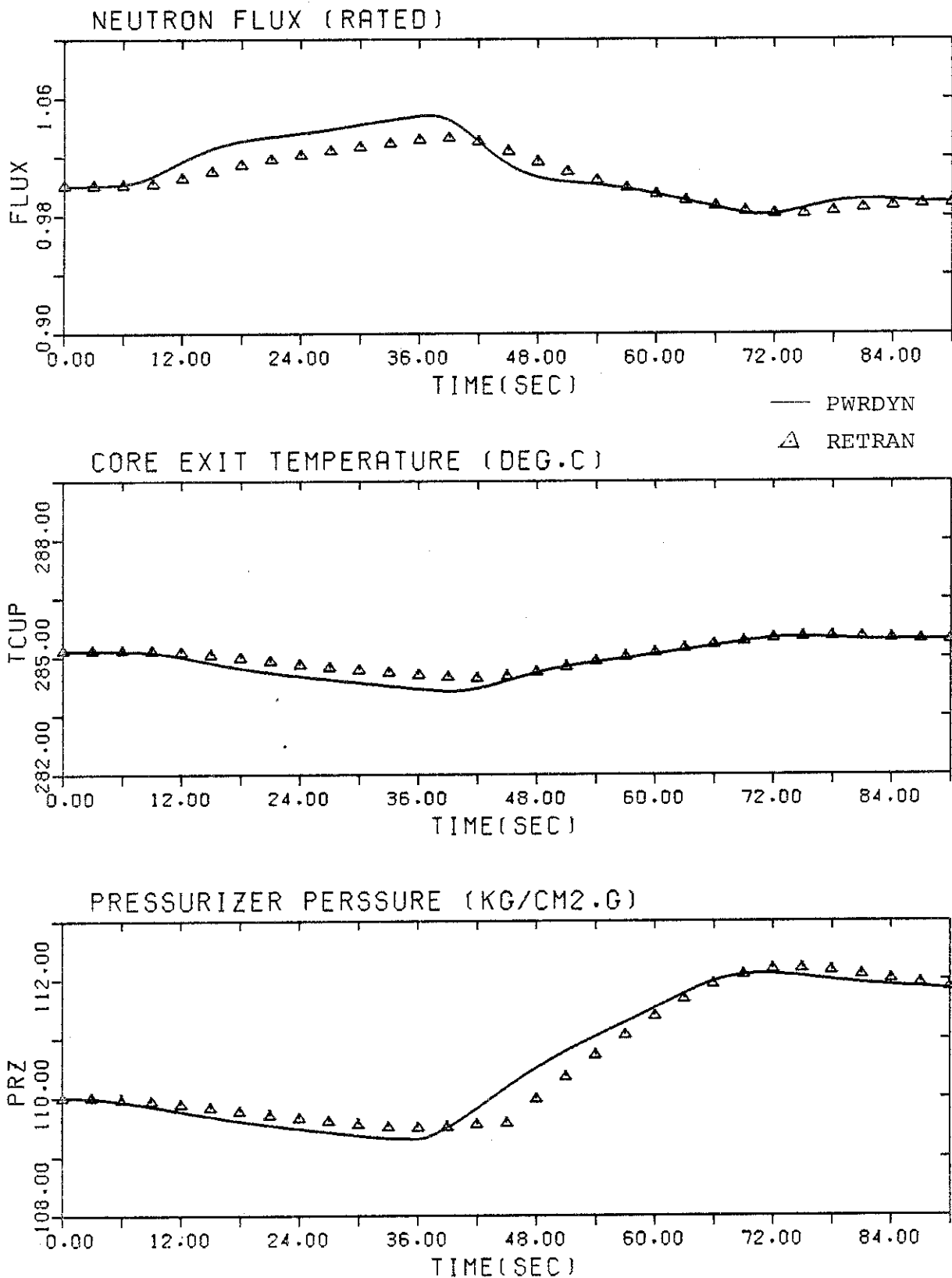


Fig.4.3.a Comparison of calculated results using PWRDYN with RETRAN in the case of load change 10%

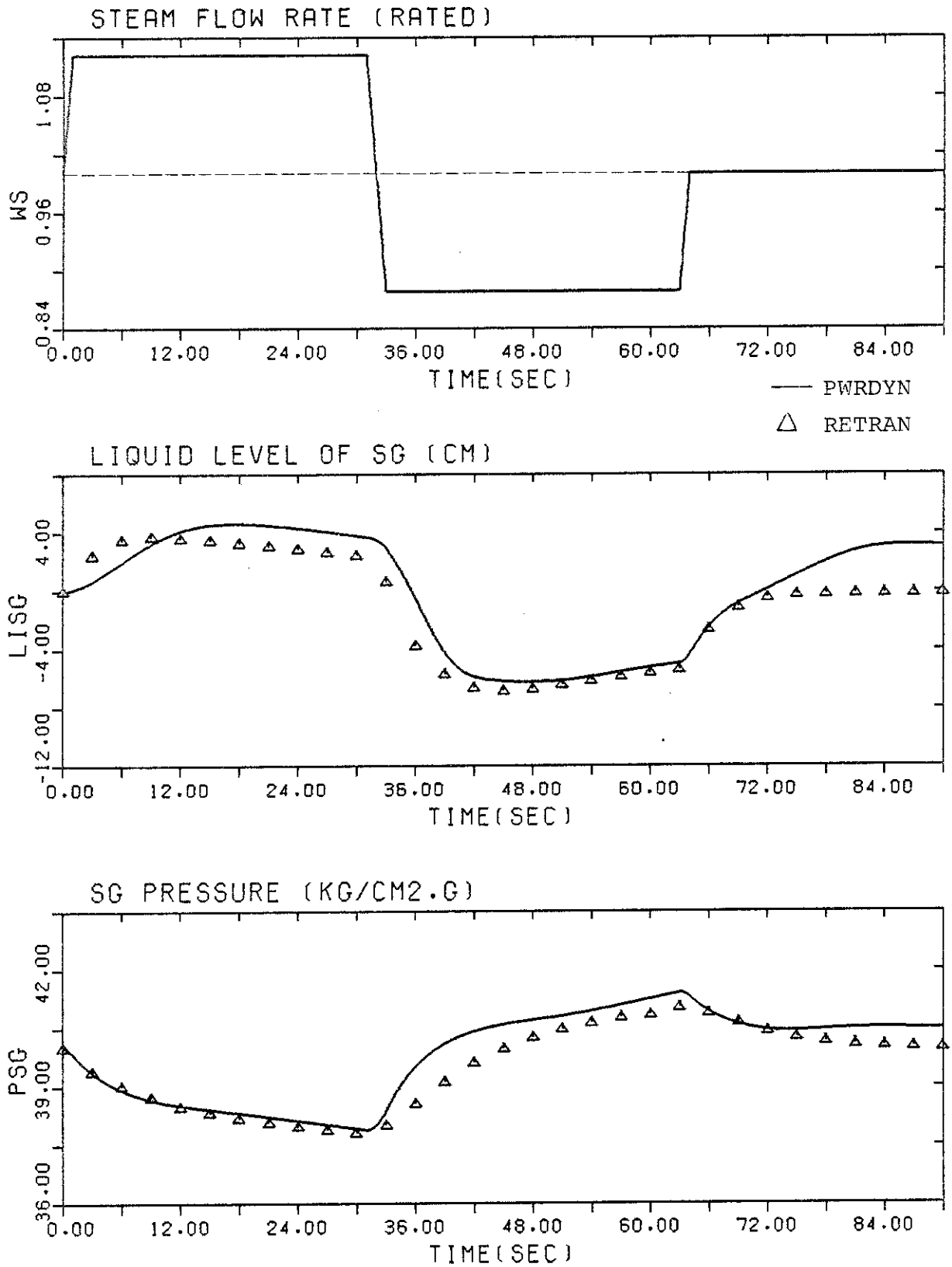


Fig.4.3.b Comparison of calculated results using PWRDYN with RETRAN in the case of load change 10%

5. データ入力形式

入力データのうち主にプラントの定数に関するものがCARD-1~CARD-43であり、以降は出力レベル、外乱の種類等の計算条件である。入力は大別すると11項目ある。

入力形式は実数型がE 10. 0 (但し1行当りの入力変数は7)、整数型がI 5である。但し、これと異なる場合はその都度入力形式を示してある。なお第1カラムに*印を書けばコメントカードとみなす。

I プラントの熱バランスに関するデータ

CARD-1

TITLE タイトル (18A4)

CARD-2

KREAD 1ケース目は不要、2ケース目から0又は1を入力する。1のときはCARD-3~CARD-43は不要、0のときはCARD-1から順に入力する。

CARD-3

1 POWER 熱出力 (MWt)
2 RQF 燃料棒内発熱割
3 RQCC チャンネル内発熱割合
4 RQCL 炉心バイパス領域発熱割合
5 RQDH 崩壊熱の出力に占める割合

CARD-4

1 WCI 炉心入口全流量 (kg/s)
2 WSI SG1基の主蒸気流量 (kg/s)
3 WFI SG1基の主給水流量 (kg/s)
4 TAVI 一次冷却材平均温度 (°C)
5 PRZI 加圧器圧力 (kg/cm²g)
6 PSGI SG圧力 (kg/cm²g)
7 PSGO 無負荷時のSG圧力 (kg/cm²g)
8 PTI タービン入口圧力 (kg/cm²g)
9 XCUI SG2次側再循環流量のキャリーアンダー (%)
10 WLOSS 系の熱損失

以上のうち7以外はすべて定格値である。

CARD-5

1 LOOP 一次冷却ループ数
2 KETA 炉心入口流量配分の入力組数 (≤ 10)
3 KPLANT 通常0

CARD - 6

- | | | |
|---|-----------------------|--------------------|
| 1 | ETAW(I), I = 1, KETA | 炉心入口流量 (-) |
| 2 | ETA E(I), I = 1, KETA | ETAWに対応する流量配分率 (-) |

II 反応度および組定数に関するデータ

CARD - 7

- | | | |
|---|--------------------|--------------------------------|
| 1 | RAMDA(I), I = 1, 6 | 遅発中性子崩壊定数 (sec ⁻¹) |
| 2 | ALIFE | 中性子寿命 (sec) |
| 3 | BETA(I), I = 1, 6 | 遅発中性子割合 (-) |
| 4 | BETA EF | 実効遅発中性子割合 (-) |

CARD - 8

- | | | |
|---|--------|-----------------------------|
| 1 | KRMOD | 減速材温度変化による反応度係数の入力組数 (≤ 10) |
| 2 | KRTF | 燃料棒温度変化による反応度係数の入力組数 (≤ 10) |
| 3 | KRP | 圧力変化による反応度係数の入力組合 (≤ 10) |
| 4 | KSCOND | スクラム条件の種類 (≤ 10) |
| 5 | KSCR | スクラム時の時間対挿入反応度の組数 (≤ 10) |

CARD - 9

- | | | |
|---|-----------------------|---------------------------------------|
| 1 | ATM(I), I = 1, KRMOD | 減速材温度 (°C) |
| 2 | ARTM(I), I = 1, KRMOD | 温度に対応する減速材温度係数 (Δk/k/°C) |
| 3 | ATF(I), I = 1, KRTF | 燃料温度 (°C) |
| 4 | ARTF(I), I = 1, KRTF | ATFに対応する燃料温度係数 (Δk/k/°C) |
| 5 | AP(I), I = 1, KRP | 炉心部冷却材圧力 (kg/cm ² g) |
| 6 | ARP(I), I = 1, KRP | APに対する圧力係数 (Δk/k/kg/cm ²) |

CARD - 10

- | | | |
|---|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | RODSC | スクラム時の挿入反応度 (Δk/k) |
| 2 | SCR(I), I = 1, KSCOND | スクラム設定値を次の順序で入力する。 |
| | I = 1 | 中性子高 (定格で1.0) |
| | 2 | 一次冷却水温度 (°C) |
| | 3 | 加圧器圧力高 (kg/cm ² g) |
| | 4 | 加圧器圧力低 (kg/cm ² g) |
| | 5 | 加圧器水位高, 初期値からの変化分 (cm) |
| | 6 | 一次冷却水流量低 (定格で1.0) |
| | 7 | SG水位低, 初期値からの変化分 (cm) |
| | 8 | タービン発電機トリップ |

CARD - 11

- | | | |
|---|---------------------|---|
| 1 | TSC(I), I = 1, KSCR | スクラム時の挿入時間, スクラム信号ONを0秒とする。 |
| 2 | RSC(I), I = 1, KSCR | TSCに対応する挿入反応度, 但し 0 ≤ RSC ≤ 1
0: 全挿入 1: 挿入前 |

III 燃料および炉心に関するデータ

CARD-12

1	RF	燃料ペレット半径 (m)
2	RCI	被覆管内側半径 (m)
3	RCO	被覆管外側半径 (m)
4	HROD	燃料棒有効長 (m)
5	FUELN	燃料棒総数
6	HTGAP	ギップ熱伝達係数 ($Kcal/m^2 s^{\circ}C$)

CARD-13

1	JMAX	燃料半径方向分割メッシュ数 (≤ 5)
2	KMAX	燃料軸方向分割メッシュ数 (≤ 25)
3	NFA(I), I = 1, 2	軸方向出力分布入力点数 I = 1 : 平均チャンネル I = 2 : ホットチャンネル (≤ 30)
4	FPEAK	平均チャンネルとホットチャンネルとの出力比 (-)

CARD-14

(FNA(I, J), I = 1, NFA(J), J = 1, 2) 軸方向出力分布を等間隔で入力する。(任意単位)
 J = 1 : 平均チャンネル J = 2 : ホットチャンネル

CARD-15

1	VCC	炉心部体積 (m^3)
2	VCL	炉心バイパス領域の体積 (m^3)
3	AC	炉心の流路断面積 (m^2)
4	HDCO	炉心チャンネルの等価直径 (m)

IV 一次ループに関するデータ

CARD-16

1	KLP 1	炉心出口からSG入口プレナムまでのノード数
2	KLP 2	SG出口プレナムから主冷却ポンプまでのノード数
3	KLP 3	主冷却ポンプから炉心入口までのノード数

CARD-17

1	LP (I)	ノード番号
2	VLP(I)	各ノードの体積 (m^3)
3	HLP(I)	各ノードの高さ, 通常運転時に上昇流となるノードは負の値, 下降流となるノードには正の値を入力する。(m)
4	VSTAG(I)	滞留水又は構造材の体積
5	ASTAG(I)	VSTAGの伝熱面積 (m^2)
6	GNOTE(I)	各ノードに対するコメント

以上の6項目を入力形式 (I 5, 4E 1 0.0, 5A 4) で1枚のカードに, 合計KLP枚入力する。但し $KLP = KLP 1 + KLP 2 + KLP 3$ ($KLP \leq 30$)

CARD-18

1	SUMIR	原子炉内流路のL/Aの合計 (m^{-1})
2	SUMIP	一次ループ流路のL/Aの合計 (m^{-1})
3	FRICR	定格出力時の原子炉内流路圧力損失の合計 (kg/m^2)
4	PPI	主冷却ポンプ揚程 (kg/m^2)
5	NPI	主冷却ポンプ定格回転数 (rpm)
6	GD ²	主冷却ポンプのはずみ車効果 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
7	ELOSS	主冷却ポンプの電氣的損失 (kW)

CARD-19

1	APQ(I), I = 1, 3	主冷却ポンプの流量 (m^3/s)
2	APH(I), I = 1, 3	APQに対応する揚程 (m) これらはポンプの流量対揚程の関係を2次式で模擬するために使用する。

V 加圧器に関するデータ

CARD-20

1	QPRZI	加圧器ヒータ出力 (MWe)
2	RQPRZ	加圧器通常ヒータの割合 (-)
3	VFPRZ	加圧器液相部の体積 (m^3)
4	VGPRZ	加圧器気相部の体積 (m^3)
5	APRZ	加圧器気断面積 (m^2)
6	HPLV	加圧器水位計取出し位置 (定常水位を基準) (cm)
7	WPRCND	(2.6.5) 式で用いる凝縮係数 (-)

CARD-21

1	WPRFI	加圧器逃し弁流量 (定格圧に対して) (kg/s)
2	PRZRF 1	加圧器逃し弁吹出し圧 ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$)
3	PRZRF 2	加圧器逃し弁吹止り圧 ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$)
4	WPSVI	加圧器安全弁流量 (定格圧に対して) (kg/s)
5	PRZSV 1	加圧器安全弁吹出し圧 ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$)
6	PRZSV 2	加圧器安全弁吹止り圧 ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$)
7	WSPAI	加圧器補助スプレイ流量 (kg/s)

CARD-22

1	KHN	加圧器通常ヒータの作動特性データ組数
2	KHBU	加圧器備後ヒータの作動特性のデータ組数
3	KSPB	加圧器補助スプレイの作動特性データ組数
4	KPRLV	加圧器水位設定値のデータ組数 以上いずれも組数は10以下である。

CARD-23

1	PHN(I), I = 1, KHN	加圧器圧力 ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$)
---	--------------------	---

2	PHN(I), I = 1, KHN	PHNに対応する通常ヒータの作動状況 $0 \leq RHN \leq 1$ (-)
3	PHBU(I), I = 1, KHBU	加圧器圧力 (kg/cm ² g)
4	RHBU(I), I = 1, KHBU	PHBUに対応する備後ヒータの作動状況 $0 \leq RHBU \leq 1$ (-)
5	PSPB(I), I = 1, KSPB	加圧器圧力 (kg/cm ² g)
6	RSPB(I), I = 1, KSPB	PSPBに対応する補助スプレイの作動状況 $0 \leq RSPB \leq 1$ (-)
7	POWS(I), I = 1, KPRLV	主蒸気流量の規格化した値 (-)
8	PRLV(I), I = 1, KPRLV	POWSに対応する水位 (%)

VI 蒸気発生器に関するデータ

CARD - 24

1	DUO	U字管外径	(m)
2	DUI	U字管内径	(m)
3	VTN	SG 1基当りのU字管本数	(-)
4	HLUAV	U字管平均長さ	(m)
5	JSMAX	U字管の高さ方向分割ノード数	(≤ 10)

CARD - 25

1	VHR	加熱領域体積	(m ³)
2	VR	ライザ及びスワールベーン領域体積	(m ³)
3	VSR	上部ダウンカマ飽和水領域体積	(m ³)
4	VD	蒸気ドーム領域体積	(m ³)
5	VDC	下部ダウンカマ (給水スパージャー以下) 領域体積	(m ³)
6	VPIN	SG 出口から主蒸気隔離弁までの体積	(m ³)
7	VPOUT	主蒸気隔離弁からタービン入口までの体積	(m ³)
8	AHR	加熱領域流路断面積	(m ²)
9	AR	ライガ領域流路断面積	(m ²)
10	ASR	上部ダウンカマ飽和水領域断面積	(m ²)
11	ADC	下部ダウンカマ領域流路断面積	(m ²)
12	HIUAV	加熱領域高さ (U字管平均高さ)	(m)
13	HR	ライザ部高さ	(m)
14	HDC	下部ダウンカマ高さ	(m)
15	HDHR 0	加熱領域等価直径	(m)
16	HDR 0	ライザ領域等価直径	(m)
17	HDSR 0	ダウンカマ上部飽和領域等価直径	(m)
18	HDDC 0	下部ダウンカマ領域等価直径	(m)

CARD-26

1	GDHM	}	SG狭域水位計の特性 (2.7.44) 式参照
2	TAUHM1		
3	TAUHM2		
4	HMLOW		SG狭域水位計の下限値, 定常水位を基準とする。(cm)
5	HDC LV		SG広域水位計の下方取出位置, 定常水位を基準とする (cm)
6	RSCOND		(2.7.30) 式の凝縮係数 (-)
7	RFCOND		(2.7.31) 式の凝縮係数 (-)

CARD-27

KLEVEL SGダウンコマ水位計算のための高さ対体積の入力組数 (≤ 10)

CARD-28

1	HL(I), I = 1, KLEVEL	給水スパージャーを中心とした高さ (m)
2	VL(I), I = 1, KLEVEL	HLに対する体積 (m ³)

CARD-29

1	DBUF	バッファプレートの流路孔の直径 (m)
2	DSP	スワールベーン部の流路直径 (m)
3	DRR	ライザ内径 (m)
4	SUMIDC	ダウンコマ部 L/A の合計 (m ⁻¹)
5	SUMISW	スワールベーン部の L/A の合計 (m ⁻¹)
6	AFRICT	全圧力損失に掛る係数, 通常 1.0

CARD-30

1	NBUF	バッファプレートの数
2	NDBUF	バッファプレートの流路孔の数
3	NSP	スワールベーンの数

CARD-31

HBUF(I), I = 1, NBUF 2次側下端を基準としたバッファプレートの位置 (m)

VII 蒸気系統に関するデータ

CARD-32

1	TAUTCV(I), I = 1, 4	タービン入口制御弁時定数 (sec)
2	GTCV	" 利得
3	TCVUP	" 開度上限 (-)

CARD-33

1	WSDI	蒸気ダンプ弁流量 (kg/sec)
2	WRFI	SG蒸気逃し弁流量 (kg/sec)
3	KSDV	蒸気ダンプ弁動作特性入力組数
4	KRFV	蒸気逃し弁動作特性入力組数

CARD-34

- | | | |
|---|----------------------|---------------------------------------|
| 1 | TSDV(I), I = 1, KSDV | 平均温度 (°C) 又は圧力 (kg/cm ² g) |
| 2 | WSDV(I), I = 1, KSDV | TSDVに対応する流量 (-) |
| 3 | PRFV(I), I = 1, KRFB | 逃し弁動作圧力 (kg/cm ² g) |
| 4 | WRFV(I), I = 1, KRFB | PREVに対応する流量 (-) |

VIII 給水系統に関するデータ (Fig. 2.7参照)

CARD-35

- | | | |
|---|--------|--|
| 1 | KWFTYP | 給水流量弁開度制御のとき 0, タービン回転数制御のとき 1 |
| 2 | KWFCV | KWFTYP = 1 のときは弁開度対流量の入力組数,
KWFTYP = 2 のときはPI出力対流量の入力組数 (≤10) |
| 3 | KLSET | 負荷対水位設定値の入力組数 (≤10) |

CARD-36

- | | | |
|---|--------------------|-----------|
| 1 | GWF(I), I = 1, 7 | 利得 |
| 2 | TAUWF(I), I = 1, 8 | 時定数 (sec) |

CARD-37

- | | | |
|---|----------------------|---|
| 1 | LIMITWF(I), I = 1, 7 | 制限値を設定するとき 1, しないとき 0 |
| 2 | CWF(I), I = 1, 14 | LIMITWF = 1 のとき下限値, 上限値を入力,
LIMITWF = 0 のときは 0.0 を入力 |

CARD-38

- | | | |
|---|------------------------|--|
| 1 | WFL(I), I = 1, KWFCV | KWFTYP = 1 のときは弁開度,
KWFTYP = 2 (-) のときはRI出力 |
| 2 | WFCV(I), I = 1, KWFCV | WFLに対応する流量 (%) |
| 3 | WLSET(I), I = 1, KLSET | 負荷 (-) |
| 4 | HLSET(I), I = 1, KLSET | WLSETに対応する水位設定値 (cm) |

CARD-39

- | | | |
|---|-------|-----------------------|
| 1 | THWF1 | 給水エンタルピの一次遅水時定数 (sec) |
| 2 | THWF2 | 給水エンタルピのむだ時間 (sec) |
| 3 | KHWF | 給水流量対エンタルピの入力組数 (≤10) |

CARD-40

- | | | |
|---|----------------------|----------------------------|
| 1 | HWFH(I), I = 1, KHWF | 給水流量 (-) |
| 2 | HWFH(I), I = 1, KHWF | HWFHに対応する給水エンタルピ (Kcal/kg) |

IX 原子炉自動制御系, Fig. 2.8参照

CARD-41

- | | | |
|---|--------|----------------------------|
| 1 | GACS | 利得 |
| 2 | RODW | 制御棒反応度 ($\Delta k/k/cm$) |
| 3 | RSPEED | 制御棒速度 (cm/sec) |
| 4 | KHACS | ヒステリシスの数, Y軸対称として正側のみ (≤5) |
| 5 | KRACS | 誤差信号対制御棒駆動信号の組数, (≤10) |

CARD - 42

TAUACS(I), I = 1, 7 時定数 (sec)

CARD - 43

- 1 EHS(I), I = 1, 2 KHACS
- 2 EI(I), I = 1, KRACS 制御棒挿入方向の誤差信号 (°C)
- 3 RI(I), I = 1, KRACS EIに対応する制御棒駆動信号 (-)
- 4 EW(I), I = 1, KRACS 制御棒引抜方向の誤差信号 (°C)
- 5 RW(I), I = 1, KRACS EWに対応する制御棒駆動信号 (-)

X 計算条件に関するデータ

CARD - 44

Q 規格化出力 (-)

CARD - 45

- 1 KTCV タービン入口圧力制御モード 0:自動 1:手動
- 2 KACS 原子炉自動制御系 0:自動 1:手動
- 3 KSCRAM スクラムモード 0:スクラムなし 1:条件に従ってスクラム 2:手動スクラム
- 4 KWF 給水制御系 0:自動 1:手動 2:給水ポンプトリップ 3:給水ポンプトリップ及び再起動
- 5 KPTRIP 主冷却水ポンプを停止させるとき1, 通常0
- 6 KRFP R 加圧器逃し弁の作動計算条件, 通常0, 条件に達しても作動させないとき1, 特定の時間だけ作動させるときはその時間の入力個数を入力する。(2 ≤ KRFP R ≤ 10)
- 7 KRFSG SG逃し弁の作動計算条件, 通常0, 条件に達しても作動させないとき1, 特定の時間だけ作動させるときはその時間の入力個数を入力する。(2 ≤ KRFSG ≤ 10)
- 8 KS DSG 蒸気ダンプ弁の作動計算条件, 通常0, 条件に達しても作動させないときは1, 特定の時間だけ作動させるときはその時間の入力個数を入力する。(2 ≤ KS DSG ≤ 10)
- 9 KSATDC SGダウンカマ領域に2相流モデルを用いるとき1, 通常0
- 10 KSPIPE 主蒸気管の動特性モデルを用いるとき, 管の分割ノード数を入力する。(≤ 10) 但し用いないときは0
- 11 KHOT ホットチャンネルの計算をするとき1, 通常0

CARD - 46

KSCRAM = 2のとき不要

TIMSC 手動スクラムさせる時間 (sec)

CARD - 47

KWF ≤ 1のとき不要

- 1 TWF 1 給水ポンプトリップ開始から停止までの時間 (sec)
- 2 TWF 2 給水ポンプトリップ開始から再起動開始までの時間 (sec)
- 3 TWF 3 再起動開始から通常状態になるに要する時間 (sec)

- 4 TFWPLS 給水ポンプトリップ開始時間 (sec)
- 5 WFP 1 給水ポンプトリップ後の流量 (規格化した値)(-)
- 6 WFP 2 再起動後の流量 (-)
- CARD-48 KPTRIP = 0 のとき不要
- 1 TMCPLS 主冷却水ポンプトリップ時間 (sec)
- 2 PNSET トリップ後保持させたいポンプ回転数 (規格化した値) (-)
- CARD-49 KRFP ≤ 1 のとき不要
- TRFPR(I), I = 1, KRFP 加圧器逃し弁の開閉時間 (sec)
- CARD-50 KRFSG ≤ 1 のとき不要
- TRFV(I), I = 1, KRFSG SG 逃し弁の開閉時間 (sec)
- CARD-51 KS DSG ≤ 1 のとき不要
- TSDV(I), I = 1, KS DSG 蒸気ダンプ弁の開閉時間 (sec)
- CARD-52
- KCHANG(I), I = 1, 9 外乱を与えるとき 1, 与えないとき 0 (I の内訳は後述) 同時に複数の外乱を与えることができる。
- CARD-53 KCHANG(I)=0 のとき不要
- KSET(I) 外乱の時間対変化幅の組数 (≤ 10)
- CARD-54
- 1 TSP (J, I), J = 1, KSET(I) 外乱の時間変化 (sec)
- 2 ASP (J, I), J = 1, KSET(I) TSP に対応する変化幅
- ここで I の内訳と変化幅の単位を示す。
- 1 : タービン主塞止弁開度, タービン又は発電機トリップのとき使用, 2 を入力するとタービン制御弁開度が, 3 を入力すると発電機負荷が, 4 を入力すると蒸気流量が変更される (-)
 - 2 : 原子炉自動制御系温度設定点変更 (°C)
 - 3 : 加圧器備後ヒーター出力の変更 (-)
 - 4 : 反応度挿入 (\$)
 - 5 : 給水制御系水位設定点の変更 (cm)
 - 6 : 主蒸気隔離弁閉 (-)
 - 7 : 主冷却流量の変更 (-)
 - 8 : 給水エンタルピの変更 (Kcal/kg)
 - 9 : 加圧器スプレイ弁の開閉 (-)
- CARD-55
- 1 DT タイムメッシュ (sec)
- 2 DT 1 途中で変えるときのタイムメッシュ (sec)
- 3 TIMAX 計算時間 (sec)
- 4 TIMDT 1 タイムメッシュを DT から DT 1 に変えるときの時間 (sec)

CARD - 56

- | | | |
|---|---------|----------------------------------|
| 1 | DPRNT | 計算結果を詳細に書出すときの時間々隔 (sec) |
| 2 | DPRNT 1 | 途中で変えるときの書出し間隔 (sec) |
| 3 | TIM RT | DPRNT から DPRNT 1 に変えるときの時間 (sec) |

CARD - 57

- | | | |
|---|---------|----------------------------------|
| 1 | DWRIT | 主要パラメータを連続に書出すときの時間々隔 (sec) |
| 2 | DWRIT 1 | 途中で変えるときの書出し間隔 (sec) |
| 3 | TIMWRT | DWRIT から DWRIT 1 に変えるときの時間 (sec) |

XI 図形出力に関するデータ

CARD - 58

- | | | |
|---|---------|------------------------------------|
| 1 | DPLOT 1 | 図形出力のときのプロット間隔 (sec) |
| 2 | DPLOT 2 | 途中で変えるときのプロット間隔 (sec) |
| 3 | TPLOT | DPLOT 1 から DPLOT 2 へ変えるときの時間 (sec) |
| 4 | DPRPRT | プリンタプロットさせるときの時間々隔 (sec) |
| 5 | NPLOT | 計算値と比較するデータを入力するとき 1, 通常 0 |
| 6 | KGH | グラフを書かせるとき 1, 書かせないとき 0 |

CARD - 59

KGH = 0 のとき不要

- | | | |
|---|---------|---|
| 1 | HIGHT | Y 軸の長さ (mm) |
| 2 | XLENG | X 軸方向のグラフの間隔 (mm) |
| 3 | YLENG | Y 軸方向のグラフの間隔 (mm) |
| 4 | FCTR | グラフの大きさのスケーリング, 実寸大のとき 1.0 |
| 5 | KFIG | 1 シートに書くグラフの数, 1, 2, 3, 6 のどれかを入力する。
Fig. 4.3 は KFIG = 3 の場合である。 |
| 6 | JGMAX | グラフの数 (≤ 20) |
| 7 | JGMAX 1 | プロット変数の総数, $JGMAX 1 \geq JGMAX$, 不等号は 1
つのグラフに複数個プロットするとき。 |

CARD - 60

KGH = 0 のとき不要

次の変数は同一カード上に入力し, それを JGMAX 1 枚グラフの順番に入力する。但し 3 ~ 5 は JGMAX までで良い。

- | | | |
|---|-----------|---|
| 1 | JGH(I) | グラフの順番を 1 から順に入力する。同じグラフに複数の変数
を書かせるときは JGMAX の後へ入力する。(付録の入力例
参照) |
| 2 | TT(I) | 変数名 |
| 3 | YSLOW(I) | } グラフの Y 軸の最小値と最大値, 0 を入力すると任意のスケー
リングになる。 |
| 4 | YSHIGH(I) | |
| 5 | GNAME(I) | グラフの変数名の説明 |

これらの変数の入力形式は (I 4, 1X, A 4, 2E 10.0, 4A 8) である。なお, 変数名 TT には次の記号の中から入力する。

FLUX	中性子束 (-)	PSG	SG 圧力 (kg/cm ² g)
TCIN	炉心入口温度 (°C)	WS	蒸気流量 (-)
TCOT	炉心出口温度 (°C)	WF	給水流量 (-)
TAV	ループ平均温度 (°C)	LISG	SG 液体水位 (cm)
PRZ	加圧器圧力 (kg/cm ² g)	MISG	SG 混合水位 (cm)
LIPR	加圧器液体水位 (cm)	MESG	SG メーター水位 (cm)
MIPR	加圧器混合水位 (cm)	XHR	SG 加熱管領域出口クオリティ (%)
TF AV	燃料平均温度 (°C)	ALFH	SG 加熱管領域平均ボイド率 (%)
QFS	燃料表面熱流束 (%)	QSG	SG への伝熱量 (%)
THL	ホットレグ温度 (°C)	WIN	SG 再循環流量 (-)
TCL	コールドレグ温度 (°C)	DHS	SG 加熱管部入口サブクール度 (Kcal/kg)
TAVM	一次側質量平均温度 (°C)	E	原子炉自動制御系の誤差信号 (°C)
WC	炉心流量 (-)	RODL	原子炉自動制御系の制御棒移動距離 (cm)
ROWI	外部からの挿入反応度 (\$)		

CARD -61 NPLOT = 0 のとき不要

TEXPR(I), I = 1, 10 計算値と比較又は代入して計算に用いる変数名,
前述の記号を用いる。入力形式は(10(1XA 4))
である。

CARD -62 NPLOT = 0 のとき不要

MEXPR(I), I = 1, 10 実測データを計算結果のグラフに書き込むとき 1,
実測データを計算に使用するとき 2 又は 3 (直納
内外挿のとき 2, 2 次式を用いるとき 3), その
他は 0, CARD -50 の入力と対応させること。

CARD -63 MEXPR(I)=0 のとき不要

- | | | |
|---|----------|----------------------|
| 1 | CX(I) | 比較データの時間のスケールファクター |
| 2 | CY(I) | 比較データの変数のスケールファクター |
| 3 | JEMAX(I) | CX と CY の組数 (≤ 200) |
| 4 | TX(I) | 比較データと計算との時間調整 (sec) |

CARD -64 MEXPR(I)=0 のとき不要

- | | | |
|---|------------------------|-----------|
| 1 | AX(J), J = 1, JEMAX(I) | 比較データの時間項 |
| 2 | AY(J), J = 1, JEMAX(I) | 比較データの変数項 |

AX, AY の単位は任意で CX, CY で調整する。入力形式は (12F 6.2) である。

本解析コードは、カード枚数約 4000 枚、使用記憶容量は図形出力を含めて約 130 kW である。標準のタイムメッシュは 0.05 秒であり、FACOM-M200 で 100 秒まで計算すると約 14 秒の CPU タイムを要する。但し Fig. 4.2 のようなレーザープリンタの図形出力を含めるとさらに約 13 秒を要する。

計算のフローチャートを Fig. 5.1 に示す。また入力データおよび計算結果の一部を付録に示す。

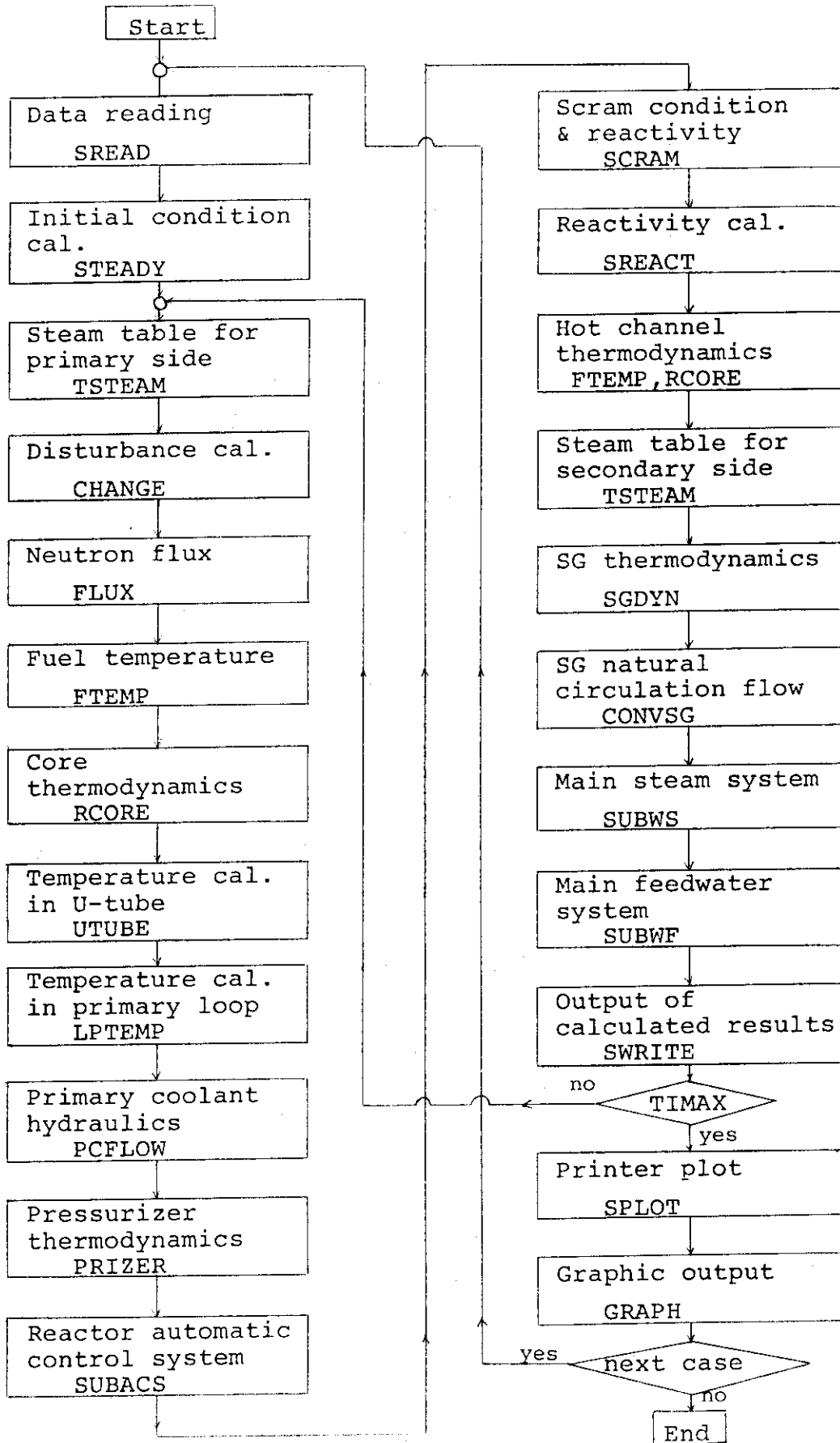


Fig.5.1 Flow chart of PWRDYN code

6. 結 論

本解析コードはPWRプラントの動特性解析のうち、運転モードの変更時の過渡応答、制御系の応答性能の評価等比較的小幅な外乱に対する過渡解析を目標に開発されたものである。

性能評価の計算例としてRETRANコードの計算結果を負荷10%変動、反応度20¢変動のケースについて比較したところ良好な結果が得られた。このことから次の事が言える。

PWRDYNは一次系、二次系共に圧力は一点近似であるが小幅変動に対しては現実的な評価精度は落ちないと考えられる。従ってPWRDYNはモーメントの式は一点近似であり、場所に関してはエネルギーバランスのみを解くことになり計算時間が実時間の約1/7と極めて短いことから事故発生時に事故進展の予測計算も行う高速計算コードの基本となるコードになりうる。

そのためには今後次の点について改良を加える必要がある。

- 1) 多ループにし、かつ一次冷却材の2相流モデルを取入れる。
- 2) SG二次側の自然循環流量が不連続になったときのモデルを取入れる。

上記2項目の改良により大、中のLOCAを除く多くの解析が可能となるが、その場合も計算時間の増大を防ぐために、モデルの改良をパラメータ間の相関を用いるなど実効的な形で行い現実的な計算時間とある程度の評価精度を維持するべきである。また現在のモデルも含めて、実測データとの比較を行うことが重要である。

謝 辞

本解析コードの開発に当っては内藤倭孝室長をはじめとする原子炉データ解析室の方々の協力をえた。特に藤木和男氏にはRETRANによる「むつ」の解析について多くの協力を得た。

また「むつ」の解析に関しては日本原子力船研究開発事業団の二村嘉明技術部長の協力を得た。動力試験炉部の大和田稔氏にはFUNCTIONの作成について協力を得た。

安全性コード開発室の秋元正幸氏には原稿の校閲をして頂いた。

なお、計算に当っては計算センターの方々の協力を得た。

以上の方々に対し深甚なる謝意を表する。

6. 結 論

本解析コードはPWRプラントの動特性解析のうち、運転モードの変更時の過渡応答、制御系の応答性能の評価等比較的小幅な外乱に対する過渡解析を目標に開発されたものである。

性能評価の計算例としてRETRANコードの計算結果を負荷10%変動、反応度20¢変動のケースについて比較したところ良好な結果が得られた。このことから次の事が言える。

PWRDYNは一次系、二次系共に圧力は一点近似であるが小幅変動に対しては現実的な評価精度は落ちないと考えられる。従ってPWRDYNはモーメントの式は一点近似であり、場所に関してはエネルギーバランスのみを解くことになり計算時間が実時間の約1/7と極めて短いことから事故発生時に事故進展の予測計算も行う高速計算コードの基本となるコードになりうる。そのためには今後次の点について改良を加える必要がある。

- 1) 多ループにし、かつ一次冷却材の2相流モデルを取入れる。
- 2) SG二次側の自然循環流量が不連続になったときのモデルを取入れる。

上記2項目の改良により大、中のLOCAを除く多くの解析が可能となるが、その場合も計算時間の増大を防ぐために、モデルの改良をパラメータ間の相関を用いるなど実効的な形で行い現実的な計算時間とある程度の評価精度を維持するべきである。また現在のモデルも含めて、実測データとの比較を行うことが重要である。

謝 辞

本解析コードの開発に当っては内藤淑孝室長をはじめとする原子炉データ解析室の方々の協力をえた。特に藤木和男氏にはRETRANによる「むつ」の解析について多くの協力を得た。

また「むつ」の解析に関しては日本原子力船研究開発事業団の二村嘉明技術部長の協力を得た。動力試験炉部の大和田稔氏にはFUNCTIONの作成について協力を得た。

安全性コード開発室の秋元正幸氏には原稿の校閲をして頂いた。

なお、計算に当っては計算センターの方々の協力を得た。

以上の方々に対し深甚なる謝意を表す。

References

- 1) Yokobayashi, M. and Ishizuka, M. et al.: JAERI-M 8010 (1978)
- 2) Wagner, R. J., et al.: EGG-2070 (1980)
- 3) Moore, K. V., et al.: EPRI CCM-5 Vol.1 (1978)
- 4) JSME: Heat Transfer Engineering Data (1978)
- 5) Tong, L. S.: J. Nuclear Energy, Parts A and B (1967)
- 6) Wilson, J. F., et al.: ANS Trans. 5[1] (1962)
- 7) Armand, A. A.: AERE Trans. 828 (1959)
- 8) Thom, J. R. S.: J. Heat Mass Transfer, 7 (1964)
- 9) Fujimura, T. and Horigami, K., et al.: JAERI-M 7102 (1977)
- 10) JSME: Steam Table (1968)
- 11) Fujiki, K. and Asaka, H.: JAERI-M 9398 (1981)

Nomenclature

A	Cross section	m^2
C_i	Delayed neutron concentration	—
C_p	Specific heat	kcal/kg °C
D	Denominator of pressure rate equation	kcal/kg/cm ²
FR	Friction loss	kg/m ²
g	Acceleration of gravity	m/sec ²
H	Heat transfer coefficient	kcal/m ² sec °C
	{ Hight	m
Hd	Hydraulic diameter	m
ΔH_{mixpr}	Mixture level of pressurizer	cm
ΔH_{liqpr}	Liquid level of pressurizer	cm
ΔH_{Mix}	Mixture level of SG	cm
ΔH_{liq}	Liquid level of SG	cm
ΔH_{meter}	Meter level of SG	cm
h_f	Saturated mater enthalpy	kcal/kg
h_g	Saturated steam enthalpy	kcal/kg
h_{fg}	Heat of vaporization	kcal/kg
h_{fd}	Feedwater enthalpy	kcal/kg
I_c	L/A in reactor flow path	m^{-1}
I_{lp}	L/A in primary loop	m^{-1}
J	Joule constant	kgm/kcal
K	Constant value	—
k	Heat conductivity	kcal/m sec °C
λ	Prompt neutron lifetime	sec
L	Length	m
M_c	Core total mass	kg
M_{tlqpr}	Total mass of pressurizer liquid phase	kg
M_{glqpr}	Steam mass of pressurizer liquid pahse	kg
M_{flqpr}	Liquid mass of pressurizer liquid pahse	kg
M_{qpr}	Steam mass of pressurizer steam phase	kg
M_{fg}	Flashing rate of pressurizer liquid pahse	kg/sec
M_{th}	Heating section total mass of SG	kg
M_{gh}	Heating section steam mass of SG	kg
M_{fh}	Heating section liquid mass of SG	kg
M_{tr}	Riser total mass of SG	kg
M_{gr}	Riser steam mass of SG	kg

M_{fr}	Riser liquid mass of SG	kg
M_{tsr}	Upper downcomer total mass of SG	kg
M_{gsr}	Upper downcomer steam mass of SG	kg
M_{fsr}	Upper downcomer liquid mass of SG	kg
M_{tdc}	Lower downcomer total mass of SG	kg
M_{gdc}	Lower downcomer steam mass of SG	kg
M_{fdc}	Lower downcomer liquid mass of SG	kg
n	Neutron density	—
N_p	Main coolant pump rotation	rpm
P_{pr}	Pressurizer pressure	kg/cm ² g
P_{sg}	Steam generator pressure	kg/cm ² g
P_t	Turbine inlet pressure	kg/cm ² g
P_p	Main coolant pump head	kg/m ²
P_{dh}	Driving head due to difference density	kg/cm ²
q	Heat flux	—
Q	Heat generation rate	kcal/sec
R	Weighting factor	—
r	Radius	m
s	Laplace transform variable	sec ⁻¹
SF	Saturation factor	—
T	Temperature	°C
t	Time	sec
Δt	Time mesh	sec
u_b	Bubble rise velocity	m/sec
v_f	Specific volume of saturated liquid	m ³ /kg
v_g	Specific volume of saturated steam	m ³ /kg
v_{fg}	$v_g - v_f$	m ³ /kg
v_s	Specific volume of subcooled liquid	m ³ /kg
V	{ Volume	m ³
	{ Valve lift position	—
V_c	Core volume	m ³
V_{gpr}	Pressurizer steam phase volume	m ³
V_{lpr}	Pressurizer liquid phase volume	m ³
V_h	Heating section volume of SG	m ³
V_r	Riser volume of SG	m ³
V_d	Steam dome volume of SG	m ³
V_{sr}	Upper downcomer volume of SG	m ³
V_{dc}	Lower downcomer volume of SG	m ³

W_c	Core inlet flow rate	kg/sec
W_{cc}	Core channel flow rate	kg/sec
W_{cl}	Core leakage flow rate	kg/sec
W_{lp}	Primary loop flow rate	kg/sec
W_{sp}	Pressurizer spray flow rate	kg/sec
W_{sr}	Pressurizer surge flow rate	kg/sec
W_{gpr}	Steam flow rate from liquid to steam of pressurizer	kg/sec
W_{condpr}	Condensate flow rate of pressurizer	kg/sec
W_{condsp}	Condensate flow rate due to spray of pressurizer	kg/sec
W_{condlq}	Condensate flow rate due to subcooled liquid of pressurizer	kg/sec
W_{rfpr}	Steam flow entering relief valve of pressurizer	kg/sec
W_{svpr}	Steam flow entering safety valve of pressurizer	kg/sec
W_{in}	Heating section inlet flow rate of SG	kg/sec
W_{th}	Heating section total flow rate of SG	kg/sec
W_{gh}	Heating section steam flow rate of SG	kg/sec
W_{fh}	Heating section liquid flow rate of SG	kg/sec
W_{tr}	Riser exit total flow rate of SG	kg/sec
W_{gr}	Riser exit steam flow rate of SG	kg/sec
W_{fr}	Riser exit liquid flow rate of SG	kg/sec
W_{gd}	Steam flow rate from swirl vane to dome of SG	kg/sec
W_{gcu}	Carryunder steam flow rate of SG	kg/sec
W_{tsr}	Upper downcomer total flow rate of SG	kg/sec
W_{gsr}	Upper downcomer steam flow rate of SG	kg/sec
W_{tdc}	Lower downcomer inlet total flow rate	kg/sec
W_{gdc}	Lower downcomer steam flow rate	kg/sec
W_{fdc}	Lower downcomer liquid flow rate	kg/sec
W_{bd}	Blowdown flow rate	kg/sec
W_{fd}	Feedwater flow rate	kg/sec
W_s	Total steam flow rate	kg/sec
W_{st}	Turbine steam flow rate	kg/sec
W_{sd}	Steam dump line flow rate	kg/sec
W_{srf}	Steam flow entering relief value of SG	kg/sec
X_f	Heating section exit quality of SG	kg/sec
X_r	Riser exit quality of SG	kg/sec
X_{sr}	Upper downcomer exit quality of SG	kg/sec
X_{dc}	Lower downcomer average quality of SG	kg/sec
X_{cu}	Carryunder quality of SG swirl vane	kg/sec

α	Void fraction	—
β	Delayed neutron fraction	—
σ	Surface stress	kg/m
η	Flow distribution rate of core inle	—
μ	Viscosity	kg/m ²
τ	Time constant	sec
ρ	{ Reactivity	$\Delta k/k$
	{ Density	kg/m ³
λ	Decay constant of delayed neutron	sec ⁻¹

Subscript

o	Initial value
c	Core
d	Dome
dc	Downcomer
fd	Feedwater
f	Fuel or saturated liquid
g	Saturated steam
h	Heating section
i	I-th node
lp	Primary loop
lq	Liquid
pr	Pressurizer
r	Riser
stg	Stagnant
s	Steam or subcooled
sr	Upper downcomer

付録 PWRDYNの入力及び出力例

```

LOAD CHANGE WITH TAV CONTROL SYSTEM
* POWER   RQC      RQCC      RQCL      RQDH
36.0      0.96      0.022     0.018     0.06
* WCI     WSI      WFI      TAVI      PRZI      PSGI      PSGO
500.0     8.5      8.5833   278.0     110.0     40.0     59.4
* PTI     XCUI     WLOSS
37.5      0.2      0.
* LOOP    KETA  KPLANT
      2      3      3
* ETAW
0.0      0.1      1.0      0.02     0.02     0.105
* RAMDA
0.0124   0.0305   0.1110   0.3010   1.130    3.000
* BETA
0.030    0.209    0.1910   0.3950   0.1290   0.0460
      ALIFE  1.70E-5
      BETAEF 6.9 E-3
*
* REACTIVITY DATA -----
*
* KRMOD  KRTF  KRP  KSCOND  KSCR
      6      7      2      6      10
* ATM(I) & ARTM(I)
100.    200.    220.    240.    260    280.
-1.20E-4 -2.40E-4 -2.80E-4 -3.30E-4 -4.00E-4 -5.00E-4
* ATF(I) & ARTF(I)
600.    700.    800.    900.    1000.    1200.
-2.67E-5 -2.50E-5 -2.35E-5 -2.20E-5 -2.10E-5 -1.83E-5
* AP(I) & ARP(I)
100.    200.
3.50E-5 3.50E-3
* SCRAM CONDITION
* SCR.REA  FLUX      TEMP      PRZ      LEV.P      FLOW      LEV.SG
0.109    1.15    305.    91.    75.    0.72    -82.9
* TSC(I)
0.0      0.124   0.224   0.275   0.339   0.444   0.554
0.664    0.774   0.864
* RSC(I)
1.0      1.0     0.91    0.83    0.70    0.42    0.19
0.08     0.01    0.0
*
* FUEL AND CORE DATA -----
*
* RF      RCI      RCO      HR0D      FUELN      HGAP
4.8 E-3  4.865E-3  5.265E-3  1.04     3584.     0.4
* JMAX  KMAX  NFA(1) NFA(2) FPEAK
      4    15    16    16    1.3
*
* AVERAGE CHANNEL POWER DISTRIBUTION  FNA(I,1)
0.42    0.83    1.17    1.53    1.58    1.95    1.44
1.31    1.16    1.01    0.87    0.76    0.60    0.51
0.42    0.18
*
* HOT CHANNEL POWER DISTRIBUTION  FNA(I,2)
0.2352  0.2718  0.3924  0.5447  0.7066  0.8545  0.9670
1.0276  1.0276  0.9670  0.8545  0.7066  0.5447  0.3924
0.2718  0.2352
* VCC      VCL      AC      HDCC
0.537     0.0414  0.516   0.01612
*
*
* PRIMARY LOOP DATA -----
* KLP1  KLP2  KLP3
      6      4      6

```


*LP(I)	VLP(I)	HLP(I)	VSTAG(I)	ASTAG(I)	GNOTE(I)		
*						00006300	
*						00006400	
1	0.90775	-1.616	1.05	2.1	CORE UPPER PLENUM	00006500	
2	0.45332	0.73	0.0	0.0		00006600	
3	0.08164	2.237	0.0	0.0		00006700	
4	0.05050	1.212	0.0	0.0		00006800	
5	0.04380	-1.032	0.0	0.0		00006900	
6	0.20061	-0.542	0.0	0.0	SG INLET PLENUM	00007000	
7	0.13811	0.542	0.0	0.0	SG EXIT PLENUM	00007100	
8	0.05050	1.00	0.0	0.0		00007200	
9	0.06253	-1.582	0.0	0.0		00007300	
10	0.16059	-0.620	0.0	0.0	M.C.PUMP REGION	00007400	
11	0.04307	0.954	0.0	0.0		00007500	
12	0.08239	-2.169	0.0	0.0		00007600	
13	0.13278	0.121	0.0	0.0		00007700	
14	0.44782	2.260	0.28	2.4	RV. DOWNCOMER	00007800	
15	0.40685	0.941	0.0	0.0	CORE LOWER PLENUM	00007900	
16	0.12960	-1.366	0.71	2.4	CORE GUIDE TUBE	00008000	
*						00008100	
* SUMIO	SUMIP	FRICO	PPI	NPI	GD2	ELOSS	00008200
20.95	591.1	1.0	3.20E+04	1750.	16.0	25.	00008300
* APQ(I)			APH(I)				00008400
0.278	0.333	0.389	46.	40.	33.		00008500
*							00008600
* PRESSURIZER DATA							00008700
*							00008800
* QPRZ	RQPRZ	VFPRZ	VGPRZ	APRZ	HPLV	WPRCND	00008900
0.13	0.125	1.10	1.52	0.9195	1.088	0.1	00009000
* WPRF1	PRZRF1	PRZRF2	WPSV1	PRZSV1	PRZSV2	WSPAI	00009100
0.6944	125.	122.	1.9722	139.4	142.0	1.94	00009200
* KHN	KHBU	KSPB	KPRLV				00009300
4	4	4	4				00009400
* PHN(I) & RHN(I)							00009500
100.	108.	112.	120.				00009600
0.125	0.125	0.0	0.0				00009700
* PHBU(I) & RHBU(I)							00009800
100.	105.0	105.01	120.0				00009900
0.875	0.875	0.0	0.0				00010000
* PSPB(I) & RSPB(I)							00010100
100.0	114.0	119.0	130.				00010200
0.	0.	1.0	1.0				00010300
* PDWS(I) & PRLV(I)							00010400
0.0	0.2	0.8	1.0				00010500
55.	55.	43.6	43.6				00010600
*							00010700
* STEAM GENERATOR DATA							00010800
* DUO	DUI	UTN	HLUAV	JSMAX			00010900
0.01905	0.01625	406.	5.812	5			00011000
* VHR	VR	VSR	VD	VDC	VPIN	VPOUT	00011100
1.387	0.415	0.62	1.357	0.405	0.0743	1.110	00011200
* AHR	AR	ASR	ADC	HIUAV	HR	HDC	00011300
0.4954	0.466	1.145	0.1208	2.875	0.89	2.8	00011400
* HDCRO	HDRO	HDSRO	HDDCO				00011500
0.0408	0.489	0.365	0.038				00011600
* GDHM	TAUHM1	TAUHM2	HML0W	HDCLV	RSCOND	RFCOND	00011700
1.0	0.5	0.5	-60.9	-200.	0.2	1.0	00011800
* KLEVEL							00011900
7							00012000
* HL(I)							00012100
-3.35	-0.935	-0.405	-0.265	0.345	0.665	1.265	00012200
* VL(I)							00012300
-0.931	-0.640	-0.452	-0.304	0.395	0.86	1.426	00012400

```

* DBUF   DSP       DRR       SUMIDC   SUMISW   AFRICT           00012500
0.013   0.489     0.962     21.3    3.748    2.0              00012600
* NBUF   NDBUF   NSP           00012700
3      800      1           00012800
* HBUF(I)           00012900
0.85    1.70     2.55           00013000
*           00013100
* MAIN STEAM SYSTEM DATA -----00013200
* TAUTCV(I)           GTCV     TCVUP           00013300
1.0     0.0       0.0     0.1     1.0     1.2              00013400
* WSDI   WSRFI     KSDV    KRFV           00013500
5.0     8.5       -4      4           00013600
* TSDV(I) & WSDV(I)           00013700
50.0    59.0     61.0    70.0           00013800
0.0     0.0       1.0     1.0           00013900
* PRFV(I) & WRFV(I)           00014000
50.0    68.7     70.0    80.0           00014100
0.0     0.0       1.0     1.0           00014200
*           00014300
* FEEDWATER CONTROL SYSTEM DATA -----00014400
* GWF(I)           00014500
0.0325  0.0325   0.5     0.333    1.0     1.0     1.0           00014600
* TAUWF(I)           00014700
0.5     2.0     0.5     2.0     2.0     33.3    20.0           00014800
1.0           00014900
* LIMIT(I)           00015000
0       0       0       0       0       0       0           00015100
* CWF(I)           00015200
0.0     0.0           00015300
0.0     0.0           00015400
* KWFTYP KWFCV KLSET           00015500
0       2       2           00015600
* WFL(I) & WFCV(I)           00015700
0.0     100.0           00015800
0.0     38.0           00015900
* WLSET(I) & HLSET(I)           00016000
0.0     1.0           00016100
0.0     0.0           00016200
* THWF1  THWF2     KHWF           00016300
50.0    10.0     2           00016400
* HWWF(I) & HWWF(I)           00016500
0.0     1.0           00016600
161.8   161.8           00016700
*           00016800
* TAV AUTOMATIC CONTROL SYSTEM -----00016900
* TAUACS(I)           00017000
2.0     22.0     1.8     0.1     0.1     40.0     40.0           00017100
* GACS   RODW     RSPEED   KHACS  KRACS           00017200
0.3     4.25E-5  0.1333   2     10           00017300
* EHS(I)           00017400
1.2     1.1     5.0     4.7           00017500
* EI(I) & RI(I)           00017600
-10.0   -4.7     -4.699   -1.1    -1.099   1.199   1.2           00017700
4.999   5.0     10.0           00017800
2.0     2.0     1.0     1.0     0.0     0.0     1.0           00017900
1.0     2.0     2.0           00018000
* EW(I) & RW(I)           00018100
-10.0   -5.0     -4.999   -1.2    -1.199   1.099   1.1           00018200
4.699   4.7     10.0           00018300
2.0     2.0     1.0     1.0     0.0     0.0     1.0           00018400
1.0     2.0     2.0           00018500
*           00018600

```

```

*
* CALCULATION CONDITION INPUT ----- 00018700
* Q 00018800
* 1.0 00018900
* KTCV KACS KSCRM KWF KPTRI KRFP KRFS KSDS KSAT KSPI KHOT 00019000
* 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 00019100
* KCHANG(I) 00019200
* TCV TREF PRZH ROW LSET ISO RCF HWF 00019300
* 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 00019400
* STEAM FLOW CHANGE DATA 00019500
* 3 00019600
* 0.0 5.0 30.0 00019700
* 0.0 -0.1 -0.1 00019800
* DT DT1 TIMAX TIMDT1 00019900
* 0.05 0.05 150.0 8.0 00020000
* DPRNT DPRNT1 TIMPRT 00020100
* 20.0 50.0 35.0 00020200
* DWRIT DWRIT1 TIMWRT 00020300
* 2.0 4.0 20.0 00020400
* 00020500
* 00020600
* PLOTTER DATA ----- 00020700
* DPLOT DPLOT1 TIMPLT DPRPRT NPLOT KGH 00020800
* 0.2 0.2 80.0 2.0 0 1 00020900
* HIGHT XLENG YLENG FCTR KFIG JGMAX JGMAX1 00021000
* 50.0 30.0 25.0 1.0 3 12 14 00021100
* JDH TT YSLOW YSHIGH GNAME 00021200
* 00021300
* 1 PRZ 0.0 0.0 PRESSURIZER PRESSURE (KG/CM2.G) 00021400
* 2 TCOT 0.0 0.0 CORE EXIT TEMPERATURE (DEG.C) 00021500
* 3 FLUX 0.0 0.0 NEUTRON FLUX & STEAM FLOW(RATED) 00021600
* 4 PSG 0.0 0.0 SG PRESSURE (KG/CM2.G) 00021700
* 5 LISG 0.0 0.0 LIQUID LEVEL OF SG (CM) 00021800
* 6 WF 0.0 0.0 FEEDWATER FLOW RATE (RATED) 00021900
* 7 TAV 0.0 0.0 SG PRESSURE (KG/CM2.G) 00022000
* 8 RODL 0.0 0.0 C.ROD MOVED LENGTH (CM) 00022100
* 9 E 0.0 0.0 ERROR SIGNAL OF TAV ACS (DEG.C) 00022200
* 10 THL 0.0 0.0 HOT LEG TEMPERATURE (DEG.C) 00022300
* 11 TCL 0.0 0.0 COLD LEG TEMPERATURE (DEG.C) 00022400
* 12 QFS 0.0 0.0 HEAT TRANSFER TO CORE & SG (%) 00022500
* 3 WS 0.0 0.0 POWR 00022600
* 12 QSG 0.0 0.0 POWR 00022700

```

PWRDYN LOAD CHANGE WITH TAV CONTROL SYSTEM

*** MAIN NUMERICAL VALUE AT NORMAL OPERATION ***

----- PRIMARY SYSTEM -----

POWER 8600.00 KCAL/SEC (36.0 MWT)
 PRESSURE 110.00 KG/CM2.G (1578.8 PSIA)
 TOTAL COOLANT FLOW (2 LOOPS) 500.00 KG/SEC (1800.0 T/H)
 TEMPERATURE OF CORE INLET 270.84 DEG.C (283.49 KCAL/KG)
 OUTLET 285.16 DEG.C (300.69 KCAL/KG)
 AVERAGE 278.00 DEG.C (292.00 KCAL/KG)

----- STEAM GENERATOR -----

PRESSURE 40.00 KG/CM2.G (583.2 PSIA)
 STEAM FLOW 8.47 KG/SEC (30.48 T/H)
 FEEDWATER FLOW 8.55 KG/SEC (30.78 T/H)
 ENTHALPY 161.80 KCAL/KG (159.71 DEG.C)
 RECIRCULATION FLOW 50.34 KG/SEC (181.24 T/H)
 INLET ENTHALPY OF HEAT.R. 244.09 KCAL/KG (236.60 DEG.C)
 INLET SUBCOOLING OF HEAT.R. 15.99 KCAL/KG (14.04 DEG.C)

----- FLOW DISTRIBUTION OF SG (KG/SEC) -----

INLET	HEATING SECTION	RISER	SWIRL VANE	SAT. REG.
WIN= 5.0344E+01	OUTLET			
	WTHR= 5.0344E+01	WTR= 5.0344E+01	WGD = 8.4672E+00	WTSR= 5.0427E+01
	WFHR= 4.1793E+01	WFR= 4.1793E+01	WGSV= 8.3753E-02	WFSR= 5.0427E+01
	WGHR= 8.5509E+00	WGR= 8.5509E+00	(XCU= 0.20)	WGSR= 0.0
	(XHR= 16.98)	(XR= 16.98)		(XSR= 0.0)

----- STEAM TABLE AT NORMAL PRESSURE -----

PRESSURE	(KG/CM2.G)	P	110.00	40.00
TEMPERATURE	(DEG.C)	TSAT	317.26	250.64
ENTHALPY	(KCAL/KG)	HF	345.32	260.08
		HG	647.63	668.83
		HFG	302.31	408.75
SPECIFIC VOLUME	(M3/KG)	VF	0.001484	0.001253
		VG	0.016223	0.049487
		VFG	0.014738	0.048234

PWRDYN LOAD CHANGE WITH TAV CONTROL SYSTEM

TIME= 0.0 (SEC)

----- CORE -----

POWER (NEUTRON FLUX) 100.00 %
 (HEAT FLUX) 100.00 %
 COOLANT FLOW RATE 100.00 %
 TEMPERATURE OF CORE INLET 270.84 DEG.C
 (283.49 KCAL/KG)
 OUTLET 285.16 DEG.C
 (300.69 KCAL/KG)
 AVERAGE 278.00 DEG.C
 (292.00 KCAL/KG)

----- PRESSURIZER -----

PRESSURE 110.00 KG/CM2.G
 SPRAY FLOW RATE 0.03 KG/SEC
 SURGE FLOW RATE 0.03 KG/SEC
 WATER LEVEL (METER) 0.0 CM
 (MIXT.) 0.0 CM
 HEATER 6.25 %

----- CORE AVERAGE CHANNEL -----

REGION	POWER (W/CM)	FUEL.C	TEMPERATURE CLAD	COOLANT	ENTHALPY
1	48.38	470.45	289.31	271.39	284.14
2	90.85	673.79	305.98	272.43	285.37
3	122.64	844.86	319.02	273.83	287.04
4	141.27	953.38	327.43	275.44	288.95
5	160.34	1070.27	336.19	277.26	291.12
6	153.98	1033.79	335.60	279.01	293.21
7	124.91	865.85	326.39	280.42	294.90
8	112.19	797.15	322.99	281.67	296.42
9	98.57	725.93	319.09	282.77	297.76
10	85.39	659.60	315.20	283.71	298.91
11	74.04	604.50	311.85	284.53	299.92
12	61.78	546.88	308.02	285.21	300.75
13	50.42	495.39	304.39	285.77	301.44
14	42.24	459.52	301.84	286.23	302.01
15	27.25	395.58	296.61	286.53	302.38

----- U TUBE TEMP. -----

REGION	ENTHALPY	C.TEMP.	TUBE TEMP.
1	298.47	283.35	264.92
2	296.38	281.63	264.27
3	294.41	280.01	263.65
4	292.55	278.46	263.06
5	290.81	277.00	262.50
6	289.16	275.62	261.97
7	287.61	274.32	261.47
8	286.16	273.09	260.99
9	284.78	271.93	260.54
10	283.49	270.84	260.11

PWRDYN LOAD CHANGE WITH TAV CONTROL SYSTEM

TIME= 0.0 (SEC)

----- LOOP TEMP. DISTRIBUTION -----

REGION	ENTHALPY	TEMP.	NOTE
1	300.69	285.16	CORE UPPER PLENUM
2	300.69	285.16	
3	300.69	285.16	
4	300.69	285.16	SG INLET PLENUM
5	300.69	285.16	
6	300.69	285.16	
7	283.49	270.84	SG EXIT PLENUM
8	283.49	270.84	
9	283.49	270.84	M.C.PUMP REGION
10	283.49	270.84	
11	283.49	270.84	
12	283.49	270.84	RV. DOWNCOMER
13	283.49	270.84	
14	283.49	270.84	
15	283.49	270.84	CORE LOWER PLENUM
16	283.49	270.84	

----- STEAM GENERATOR -----

HEAT TRANSFER TO SG	100.00 %	40.00 KG/CM2.G
HEAT.R INLET FLOW RATE	50.35 KG/SEC	STEAM FLOW RATE 100.00 %
ENTHALPY	244.09 KCAL/KG	FEEDWATER FLOW RATE 100.00 %
(236.60 DEG.C)		ENTHALPY 161.80 KCAL/KG
SUBCOOLING	15.99 KCAL/KG	WATER LEVEL (METER) 0.0 CM
(14.04 DEG.C)		(LMIX= 0.0)
BOILING BOUNDARY	0.53 M	(LLIQ= 0.0)
TOTAL VOID VOLUME	1.10 M3	TOTAL MASS 1.42 TON

----- HEATING SECTION OF SG -----

REGION	POWER (KCAL/S)	ENTHAL. (KCAL/KG)	TEMP. (DEG.C)	QUALITY (%)	VOID (%)	FLOW (-)
1	555.1	261.54	250.64	0.357	10.327	1.0000
2	523.0	278.74	250.64	4.566	54.973	1.0000
3	492.6	295.76	250.64	8.730	67.021	1.0000
4	463.8	312.67	250.64	12.865	72.942	1.0000
5	436.7	329.50	250.64	16.985	76.652	1.0000

----- NORMALIZED FLOW DISTRIBUTION OF SG -----

HEATING SECTION		OUTLET		RISER		SWIRL VANE		SAT. REG.	
WIN= 1.0000E+00	WTHR= 9.9990E-01	WTHR= 9.9990E-01	WTR= 9.9987E-01	WFR= 9.9987E-01	WFR= 9.9987E-01	WFR= 9.9999E-01	WFSR= 1.0000E+00	WFSR= 1.0000E+00	WFSR= 1.0000E+00
	WFHR= 9.9990E-01	WFHR= 9.9990E-01	WFR= 9.9987E-01	WFR= 9.9987E-01	WFR= 9.9987E-01	WGD = 9.9999E-01	WFSR= 1.0000E+00	WFSR= 1.0000E+00	WFSR= 1.0000E+00
	WGHR= 9.9990E-01	WGHR= 9.9990E-01	WGR= 9.9987E-01	WGR= 9.9987E-01	WGR= 9.9987E-01	WGSV= 1.0000E+00	WFSR= 1.0000E+00	WFSR= 1.0000E+00	WFSR= 1.0000E+00
	(XHR = 16.98)	(XHR = 16.98)	(XHR = 16.98)	(XHR = 16.98)	(XHR = 16.98)	(XSR= 0.0)	WGSR= 0.0	WGSR= 0.0	WGSR= 0.0
	(CALFH= 56.38)	(CALFH= 56.38)	(CALFH= 56.38)	(CALFH= 56.38)	(CALFH= 56.38)	(XCU= 0.20)	(XSR= 0.0)	(XSR= 0.0)	(XSR= 0.0)