

高速実験炉「常陽」運転支援システムの開発

プラント状態予測機能の開発

1989年9月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布するものです。従って、その取扱いには十分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。

高速実験炉「常陽」運転支援システムの開発 プラント状態予測機能の開発

島田裕一* 杉江嘉彦* 深見明弘**
大山幸男** 井川健一**

要 旨

高速実験炉「常陽」では、「常陽」及び今後の高速炉の稼働率及び信頼性向上を目的に、計算機による運転支援の高度化として「運転支援システムの開発」を進めている。プラント状態予測はその中の機能の一つであり、安全確保上重要なパラメータを動特性モデルを用いて予測し、運転員に有用なデータとしてCRTに表示するものである。今回「常陽」データ処理装置(JOYDAS)の機能拡張として組み込むまでの検討が終了したため、ここに報告するものである。主要な結果は以下の通りである。

- (1) 異常時運転マニュアル等から対象となる事象及び信号を選定した。
- (2) その中から、炉容器Naレベルと崩壊熱を選び、予測モデルを作成した。
- (3) 炉容器Naレベルについては、一次主ポンプトリップ時のデータと比較をし妥当性の確認を行った。

* 大洗工学センター実験炉部技術課

** 原子力システム株式会社

**Development of JOYO Operation
Support System
Development of Plant
State Prediction Function**

Yuichi Shimada* Yoshihiko Sugie* Akihiro Fukami**
Yukio Oyama** Kenichi Igawa**

Abstract

In Experimental Fast Reactor "JOYO", "Development of Operation Support System" is continued as the enhancement of operation support by using computer, in order to improve the availability and reliability of "JOYO" and future fast reactors. Plant State Prediction is one of these systems, and its function is to predict important parameters with respect to the security of safety and to figure them as valid data on CRT. This report deals with the examinations to put this function into JOYDAS (JOYO Data Acquisition System).

Main results are as follows.

- (1) Objective phenomena and signals were selected from Emergency Procedure—Operation (EPO) and so on.
- (2) From these signals, sodium level in R/V and decay heat were selected and these prediction models were produced.
- (3) As for sodium level in R/V, its prediction model was compared with the data at Primary Main Pump Trip (1987-9-7) and this reasonability was confirmed.

* Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division OEC

** Nuclear Energy System Inc.

目 次

第 1 章	まえがき	1
第 2 章	系統設備の概要	3
2. 1	原子炉容器及び炉心	3
2. 2	主要系統	3
2. 3	J O Y D A S の構成	4
第 3 章	信号の選定にあたっての経緯と開発に先立つ考察	10
3. 1	開発の全体の流れ	10
3. 2	状態予測信号のサーベイ、選定について	10
3. 3	予測方式の選定	11
第 4 章	対象信号の選定について	13
第 5 章	原子炉容器 Na レベル予測計算モデルについて	14
5. 1	一次系液面挙動モデルの基本式について	14
5. 2	近似について	15
5. 3	簡略化したモデルについて	17
5. 4	モデルに使用する定数について	17
5. 5	モデルの評価	17
第 6 章	崩壊熱の状態予測計算の具体的手法について	21
6. 1	崩壊熱計算の近似式について	21
6. 2	計算手法について	22
6. 3	出力例	23
第 7 章	運転員とのインターフェースについて	25
7. 1	表示方法について	25
7. 2	表示時間について	25

第8章 今後の開発予定	29
第9章 参考文献	30
第10章 謝 辞	31

添付 1	原子炉入口温度模擬式について	32
添付 2	一次遅れモデルの補足説明	33
添付 3	出力変動を考慮した崩壊熱計算法	35
添付 4	NK-II 炉心における炉心崩壊熱曲線の変化	37
添付 5	炉容器 Na レベル予測モデルフローチャート	39
添付 6	炉容器 Na レベル予測モデル計算プログラム	41

1. まえがき

昭和54年3月に米国スリーマイル島で発生した原子力発電所の事故に端を発して、原子炉プラントのより一層の運転信頼性及び稼働率向上のための研究開発が世界各国で強力に進められている。高速実験炉「常陽」においても、運転支援システムの開発として技術課において、原子炉プラントのデータを計算機で処理及び監視を行うJOYDAS (JOYO Data Acquisition System) の拡充を行い、また、原子炉第一課では、AI手法を利用したJOYCAT (JOYO Consulting & Analysing Tool)の研究開発を進めている。いずれも最終的には、計算機を利用した安全運転及び運転の合理化を目指したものである。これらの運転支援システムについては、表1.1に示すように6項目に分けて開発を進めているが本報告書では、そのうちプラント状態予測についてJOYDASに組込む手前までの開発が完了したため報告するものである。

プラント状態予測の機能

原子炉保護系の作動を伴うようなプラント異常に対しては、原子炉停止後のプラントをより安全かつ安全な方向に収束させるための対応操作が不可欠である。本機能は、プラント状態を動特性モデルを用いて予測し運転員に有用なデータとしてCRTに表示するものである。

期待される効果

異常時におけるプラント動向の予測ができ、先行的にプラントの処置が可能となるとともに、運転員に対する精神的負担の軽減効果が期待される。また、予測値より大きくずれた時、別の異常検知に役立つ。

表1.1 運転支援システム機能一覧表

	機 能	内 容	備 考
1	異常時対処法表示	光ディスクに貯えられた異常時処置ブロック図や操作要領をCRT（ハードコピー）に表示する。	初期操作に最も必要な処置ブロック図を表示する。図は既に約500枚を用意している。
2	異常状況の集約表示	異常時における炉心およびプラント各部の状態をCRTまたはプリンタに集約表示する。	機器の系統毎の状況を示す系統別表示と異常時の事象毎に状況を示す事象別表示を実施する。
3	シーケンスモニタ	インターロックや自動起動が正常に作動しているかどうか監視する。	例えば電源喪失時やポンプトリップ時などの各機器の動作を監視する。
4	プラント異常早期検知	プラント変数が予め定められた値から、又は変数相互間の関係が規範モデルからずれにより異常を早期に検知する。	異常判定の規範はテーブルに貯えるか、代数的なモデルによる。
5	警報の第一原因表示	一度に多くの警報が発せられたとき第一原因の異常警報を識別し表示する。	トリップシーケンスと第一原因同定を含む。
6	プラント状態予測	簡単な動的モデルに基づいて、トリップ等の発生の一 定時間後におけるプラントの状態を予測する。	例えばスクラム後の炉容器レベルの推移や、オーバーフロー系の温度推移などを予測する。

2. 系統設備の概要

2.1 原子炉容器及び炉心

原子炉及び炉心は、原子炉容器及びその内部に配置した燃料集合体、制御棒、反射体、炉心構造物、炉心上部機構並びに原子炉容器上部に配置した回転プラグ、制御棒駆動機構等より構成されている。

1次冷却材は、原子炉容器下部に設けた冷却材入口ノズルから原子炉容器底部の下部プレナムに入り、炉心支持板高圧プレナムをへて燃料集合体に流入する。炉心支持板高圧プレナムに流入した1次冷却材の一部は炉心支持板低圧プレナムに流出し、制御棒及び反射体に流入する。

燃料集合体に流入した1次冷却材は、燃料要素の周囲を上昇しながら燃料要素が発生する熱エネルギーを吸収して高温となり、原子炉容器上部の上部プレナムで反射体等を通過してきた1次冷却材と混合したのち、原子炉容器胴上部に設けた冷却材出口ノズルをへて1次主冷却系の高温側配管へ送られる。(図2.1参照)

炉心は、炉心燃料集合体及び特殊燃料集合体並びにそれらの周囲をとり囲む反射体等によって構成し、全体をほぼ円柱形とする。

炉心燃料領域の周囲に配置する反射材は、炉心内の中性子束分布を平坦化するとともに、外部機器への中性子照射量を軽減する。

炉心燃料集合体は、プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット、ステンレス鋼の上部反射体ペレット等をSUS316相当ステンレス鋼で被覆した127本の燃料要素を組み合わせたもので、機械的強度、除熱特性、密封性、耐食性、核特性等について必要な性能を満足させる。

炉心構造物は、支持構造物及びバレル構造物で構成し、燃料集合体、反射体等の炉心構成要素を下部及び側面より支持する。

2.2 主要系統

図2.2に系統図を示す。

原子炉を冷却する一次系は2つのループで構成されていて閉回路を形成している。一次系のNaは一次主ポンプによって原子炉に送りこまれ、原子炉の熱をとって500℃で出ていく。原子炉から出たNaは主中間熱交換器を介して2次系に熱を与える。2次系のNaは格納容器を出て主冷却器で熱を空気によって除去され、2次主ポンプによって再び主中間熱交換器に戻される。

原子炉内のNaの温度変化による体積膨張を吸収するために、オーバーフロー系が設けられている。ここではオーバーフロータンクのNaを常時炉容器に汲み上げて、溢れたNaはオーバーフロー戻り配管によってタンクに戻すことで炉容器の液面をなるべく一定に保っている。

2.3 JOYDAS (JOYO Data Acquisition System) の構成

JOYDASはHIDIC-V90/50システムとHIDIC-80Eシステムにより構成されている。

(図2.3、2.4に構成図を示す。)

各システムは、独自にプラントよりの信号を取り込み効率を考え役割を分担させ、必要に応じた処理を行っている。

(1) HIDIC-V90/50システム

PI/Oと呼ばれるプロセス入出力装置を持ち、プラントの温度、流量等の信号及び機器状態信号を取り込みCRTにトレンド表示やデジタル表示する。また、取り込んだデータをHIDIC-80E及びJOYCAT (JOYO Consulting & Analysing Tool)と称される警報処理診断システムへデータを送っている。

{	CPUメモリ	3 Mバイト
	ディスク容量	37.6 Mバイト
}		

(2) HIDIC-80Eシステム

PI/Oと呼ばれる分散型プロセス入出力装置とHIDIC-V90/50より、通信回線にてデータを取り込み主要な計算処理を行う。このデータを用いてCRTにプラント状況を表示するとともに、プラントの異常監視および磁気テープや磁気ディスクへプラントデータを収録している。

{	CPUメモリ	384 Kワード(768 Kバイト)
	ディスク容量	8.6 Mワード(17.2Mバイト)
}		

(3) プラントデータ

プラントデータは、プラント各部の温度、流量等のアナログ値及び機器状態のデジタル値をPI/OやDPI/Oで取り込むプラント信号と、プラント信号データを用いて計算処理を行った擬似アナログ値、擬似デジタル値、計算値さらにはキーボードより入力する定数値がある。これらの値はすべて入力点と呼ばれる番号が割り当てられており、ほぼ系統別に分けられている。入力点数を表2.1に示す。

表2.1 JOYDAS入力点点数表

アナログ値	核計装系	8点	デジタル値	原子炉系	101点
	原子炉系	12点		1次系	140点
	1次系	44点		2次系	151点
	2次系	35点		電源系	10点
	S/A 出口温度系	119点		84系	67点
	補助系	7点	擬似アナログ値		272点
	純化系	10点	擬似デジタル値		82点
	回転プラグまわり	101点	計算・定数値		340点
	その他	85点			

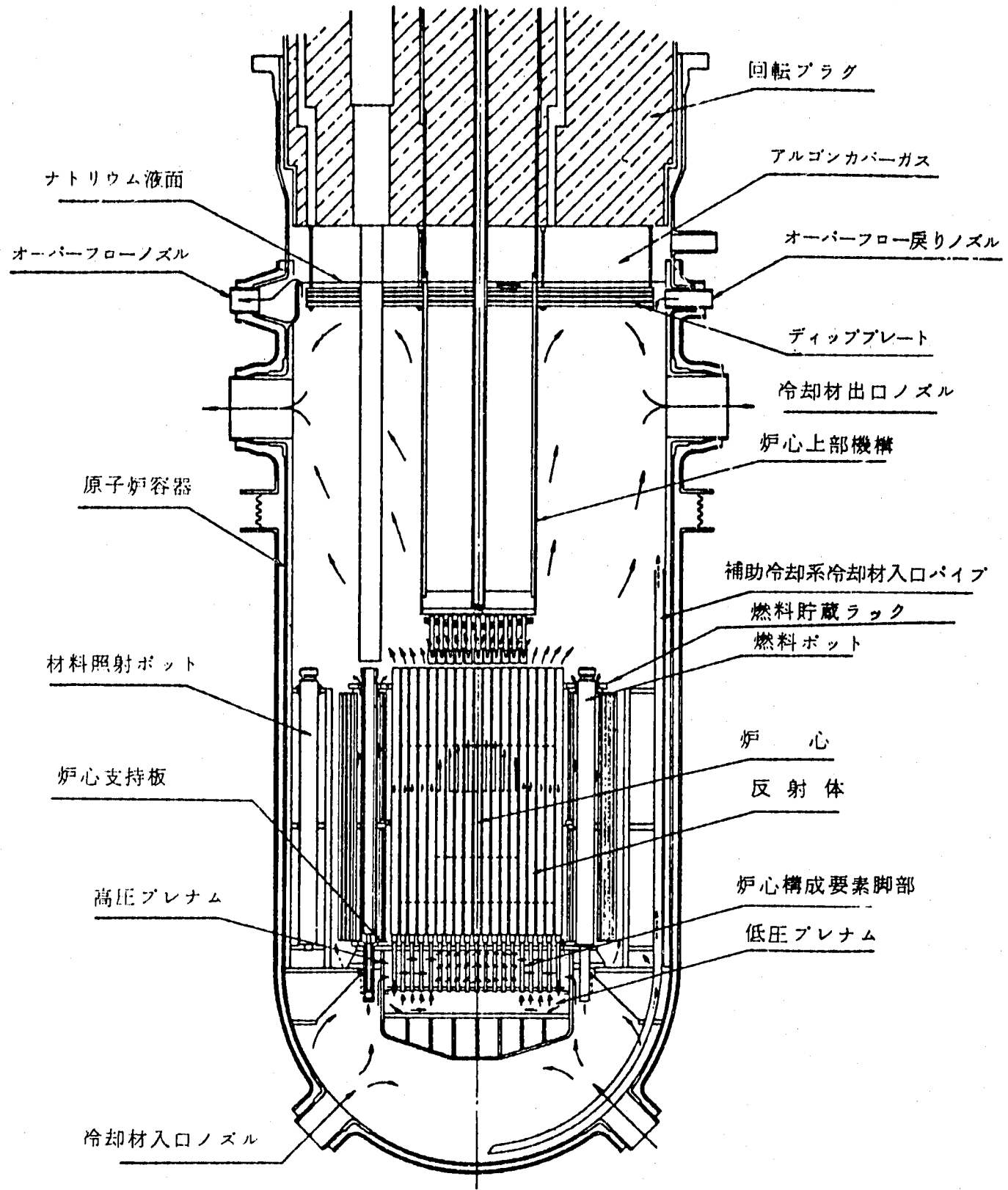


図 2.1 炉内ナトリウム流路図
Fig. 2.1 In-core Sodium Flow Pass

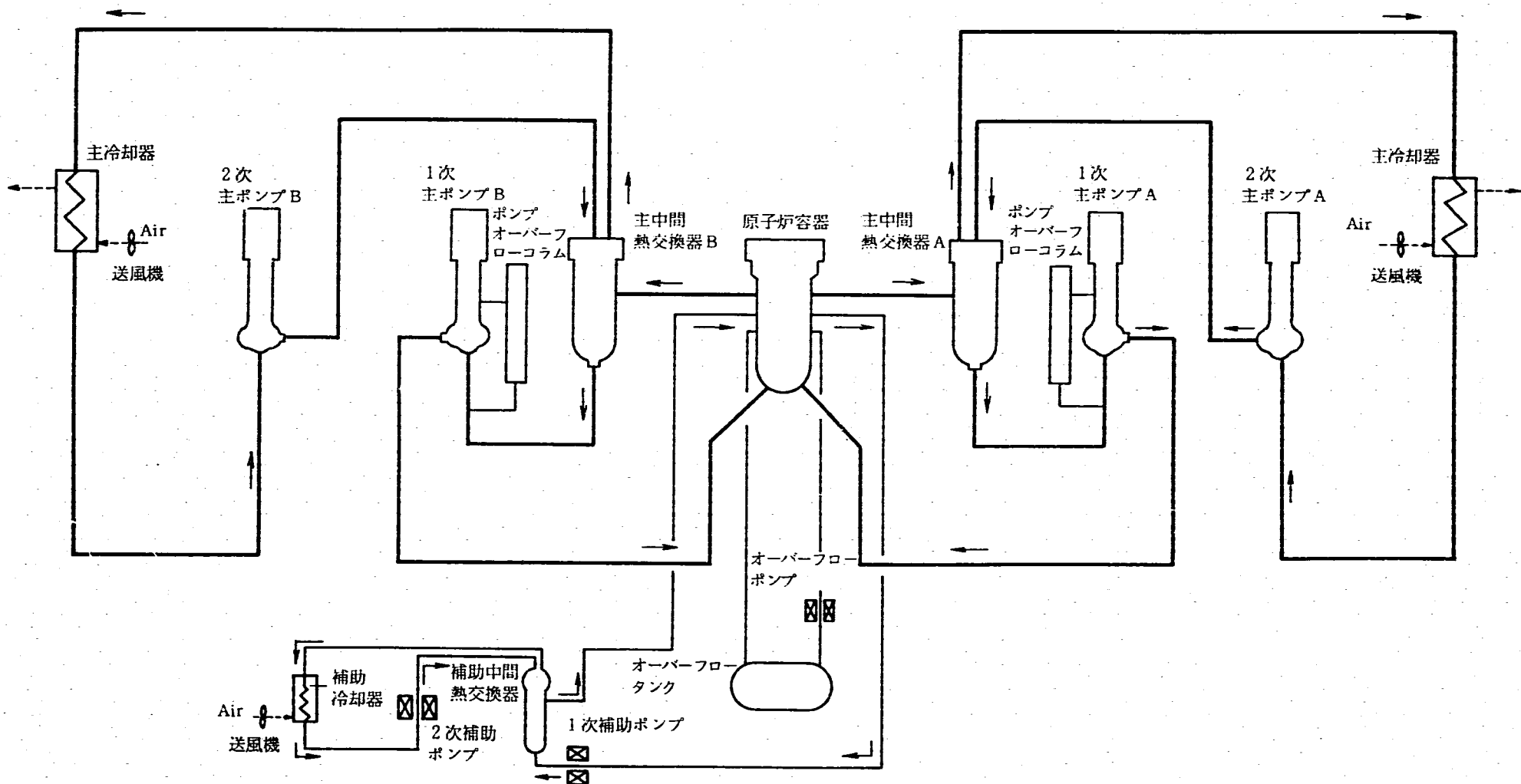


図 2.2 高速実験炉「常陽」系統図

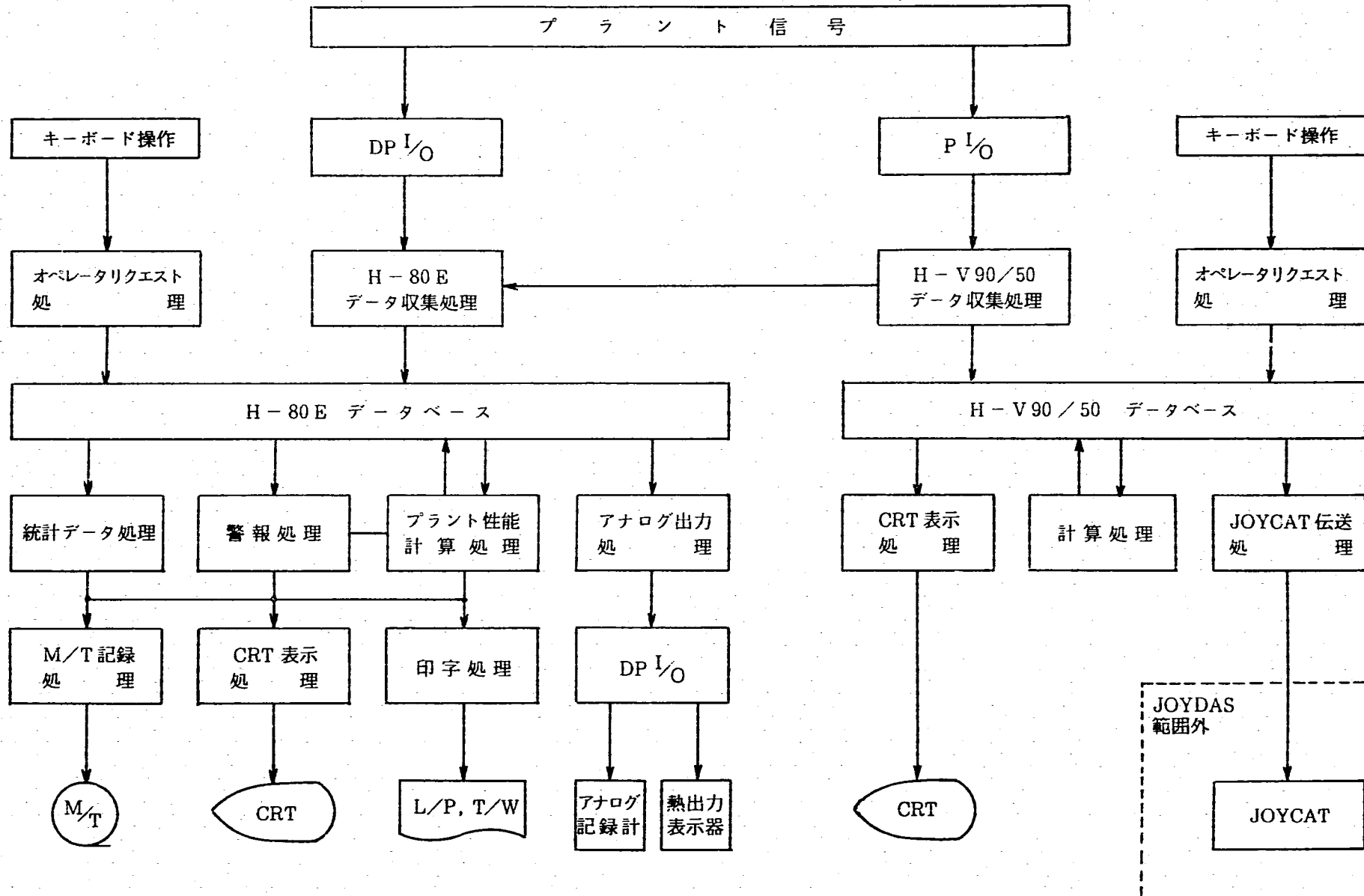


図 2.3 JOYDASソフトウェア構成図

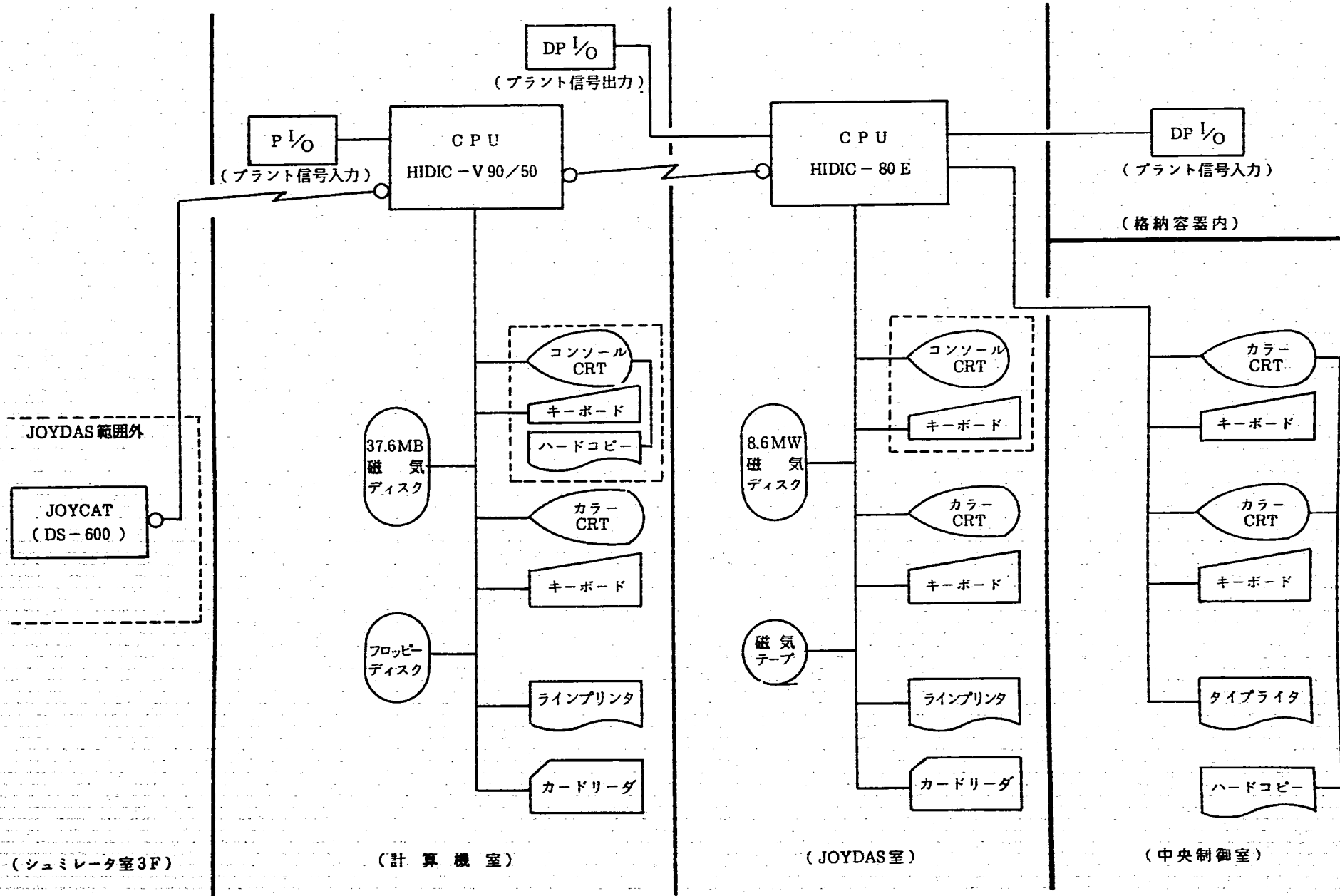
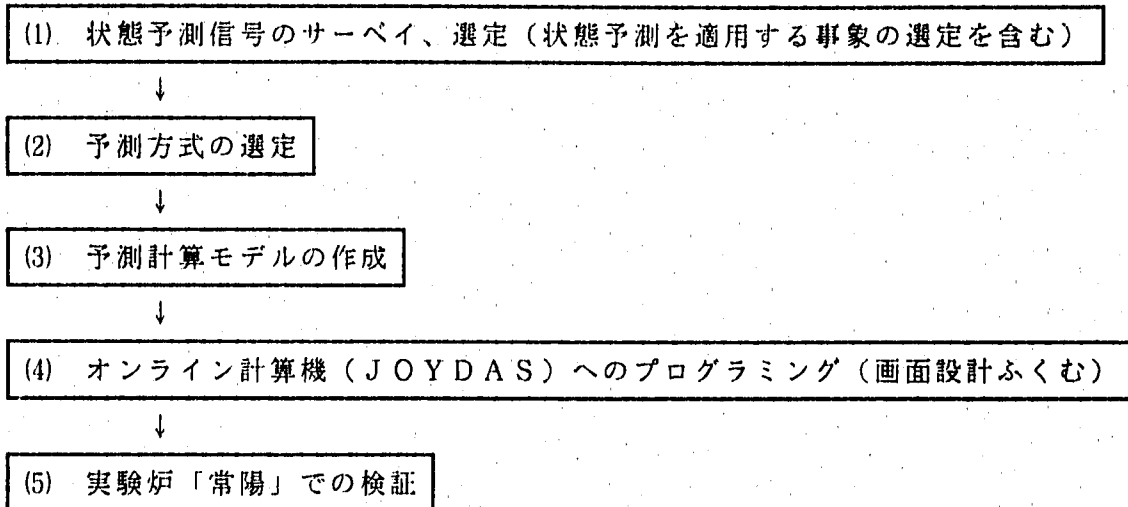


図 2.4 JOYDAS ハードウェア構成図

3. 信号の選定にあたっての経緯と開発に先だつ考察

3.1 開発の全体の流れ

開発の全体の流れについて以下に示す。



本報告書では(1)～(3)と(4)の計画まで示す。

3.2 状態予測信号のサーベイ、選定について

(1) 状態予測を適用する事象の選定

原子炉設置許可申請書より重大、仮想事故及び、異常時運転マニュアル (EPO) 等より技術的に起こり得る反応度事故、機械的事故をサーベイした。このうち重大及び仮想事故については事故後の安全評価を目的として設定されているものであり、その事故がおこる経緯及び事故後の展開が極めて複雑である上確率的にもほぼ起こり得ない事象であるため、当面はEPOを中心として選定することとした。

(2) 信号のサーベイ、選定について

- ・上記で選定した事象以降変化する信号のうち、運転員に対し事態を安定かつ安全に収束させる操作の助勢となるものを選定することとした。この時対応する信号にのみ着目するのではなく、その信号に関連する信号も含めて実際の時系列的变化も調査する必要がある。

……(7)

- ・また事故後の対応が複雑ではなく、事象の推移の予測をあまり必要としないものは基本的に除外するが、直接的に運転員の助勢とはならなくとも、運転員に対しその後の操作等に有益な情報を与えるものについては考慮の対象とした。

……(1)

- ・表 3.1 に状態予測信号の候補として、異常時運転マニュアル（EPO）等から選んだものを上げる。

3.3 予測方式の選定

予測方式としては次の3つが考えられる。

- (1) 予測演算式をJOYDASに組み込み、on-line で取り込まれるデータを基に予測曲線を描く。
- (2) あらかじめ動特性モデルを用いて求めた予測曲線、あるいは過去の実験等の実データによる曲線を数パターンについてJOYDAS内に組み込み、事象の状況に応じて表示すべきパターンを判別し表示させる。
- (3) AR（自己回帰）法を用いた予測を考える。

これらの方式のうち(3)のAR法を用いた方式については、現時点での適用可能な範囲が定常あるいは準定常状態に限られるため、異常時の状態予測に採用するには困難が多く、(1)、(2)を考慮の範囲とした。

どちらの方式を採用するとしても、適切な動特性モデルの選定が問題となるが、(1)では計算周期及び予測目標期間を適切に決めないと計算機の処理能力に影響を与え、(2)の場合は事象の状況を判別する診断機能が別途必要となる。

この場合、信号の種類に応じ効率的な予測方式の選択が必要である。事象の状況が多少変わっても動向があまり変化しないものについては(2)が適切であり逆の場合は(1)が適切となる。

今回は後の章に述べる通り、(1)の方法を採用した。

表 3.1 状態予測信号例（異常時運転マニュアル等より）

対 象 事 象	信 号 名
手動スクラム 制御棒一本落下 手動制御棒一斉挿入 一次主ポンプトリップ 一次主ポンプスティック事故 二次主ポンプトリップ 主冷却器プロアトリップ O/FEMPトリップ 外部電源喪失事故	主冷却器入口Na温度 (7) 炉容器Naレベル (7) 原子炉出・入口温度 (4) O/Fタンク温度 (4) O/F系配管（戻り側）温度 (4) 崩壊熱 (4)
アイソレーション	上記信号以外として 床上、床下圧力・温度 (4) 安全容器、リークジャケット、一次系 (4) カバーガスの圧力

・*)(7),(4)は3-2(2)項で述べた分類である。

4. 対象信号の選定について

4.1 状態予測信号の選定について

(1) 前項において、異常時運転マニュアル等から選定した信号例を列挙したが、当初はその中から下記の2信号について検討をし、組み込む事とした。

- ① 炉容器Naレベル
- ② 崩壊熱

(2) 上記2信号を選定する理由は以下の通りである。

- ・①については、一次主ポンプトリップにより原子炉がスクラムした場合、崩壊熱除去手段の確保が重要となり、特にオーバーフロー系運転不能時は補助系の自動起動時期及びポンプモータの運転限界時期を把握することを考えると、運転員の負担軽減となり得る。
- ・②については熱発生 of 監視という点で選定した。
- ・プラント状態予測は今回初めての試みであり、特に一回目の開発を考えるに当たってはその信号の重要性だけでなく、信頼性を有するモデルがすでに存在しているかあるいは比較的容易に手段により検証されるものであることが望ましい。上記2信号については後述するようにこの条件を満たす。
- ・この2信号以外に、スクラム時における主冷却器ブロー停止のタイミングの目安を与えらるという点に着目して、主冷却器入口Na温度を当初候補にあげたが、予測を必要とする時間があまりに短くて表示する意味が弱いという点で除外した。

5. 原子炉容器Naレベル予測計算モデルについて

ここでは、まず系統の挙動を考察してモデルを求め、その後モデルのプログラムとその出力を示す。また、1987-9-7に起きた一次主ポンプトリップ時のデータとの比較を示す。

一次系各部の自由液面の挙動の取扱については、リーク時を除いては一次系の流動状態、温度変化による冷却材容積の変化、オーバーフロー系の運転状況が影響しあって生ずるが、ここではまずそれらを各々評価し、液面の変動の厳密式を立てた上で、近似をおこなっていく。

予測計算はポンプトリップの一分後をもって開始とする。

5.1 一次系液面挙動モデルの基本式について

炉容器Naレベル L_R は次式で表される。

$$L_R = L_0 + \Delta L_v + \Delta L_{of} + \Delta L_w$$

L_0 : 原子炉基準液位

ΔL_v : 冷却材温度変化による変動分

ΔL_{of} : オーバーフロー系運転条件による変動分

ΔL_w : 一次系流動条件による変動分

(1) ΔL_{of} について

オーバーフロー系の運転条件による液面の変動は、汲上流量(W_{01})と戻り流量(W_{02})との差から求められる。

$$\Delta L_{of} = \int \frac{(W_{01} - W_{02})}{A_R} dt$$

A_R : 炉容器自由液面断面積

(2) ΔL_w について

一次系流動条件による変動分については次の様な式となる。

冷却材が循環している状況においては、各自由液面(炉容器: L_R , IHX: L_I , ポンプ: L_P)には液位差がついており、これらは各液面間の圧力損失に比例すると考えられるから、次の式が成り立つ。

$$\gamma_a (L_R - L_I) = a (W/W_D)^2$$

$$\gamma_b (L_I - L_P) = b (W/W_D)^2$$

γ_a : IHX ~ 炉容器までのNa密度

γ_b : ポンプ ~ IHXまでのNa密度

a, b : 比例定数

W : 流量

故に L_I 、 L_P は各々次式となる。

$$L_I = L_R - (a / \gamma_a) (W / W_D)^2$$

$$L_P = L_I - (b / \gamma_b) (W / W_D)^2$$

基準流量における各自由液面レベルを L_{I0} 、 L_{P0} とすると、液位変動は IHX、及びポンプオーバーフローコラムにおいて、下式で与えられる。

$$\Delta L_I = L_{I0} - L_I$$

$$\Delta L_P = L_{P0} - L_P$$

これらの変動による L_R の変動 ΔL_R は次式で与えられる。

$$\Delta L_R = \frac{\Delta L_I A_I + \Delta L_P A_P}{A_R}$$

A_I 、 A_P : IHX、ポンプの自由液面断面積

(3) ΔL_v について

冷却材温度変化に対する液位変動は、一次冷却系各部の温度変化による変動を考慮して次式で与えられる。

$$\Delta L_v = \frac{\Sigma \Delta V}{A_R + 2(A_I + A_P)}$$

ここで $\Sigma \Delta V$ は各部の冷却材温度変動による体積変動の総和である。 ΔV は次の様に与えられる。

$$\Delta V = V_0 (\gamma_0 / \gamma_t - 1)$$

V : 各部の容積

γ_0 : 基準温度における冷却材密度

γ_t : 時刻 t における冷却材密度

ここで $\gamma_t = 950.1 - 0.22977 T(t)$

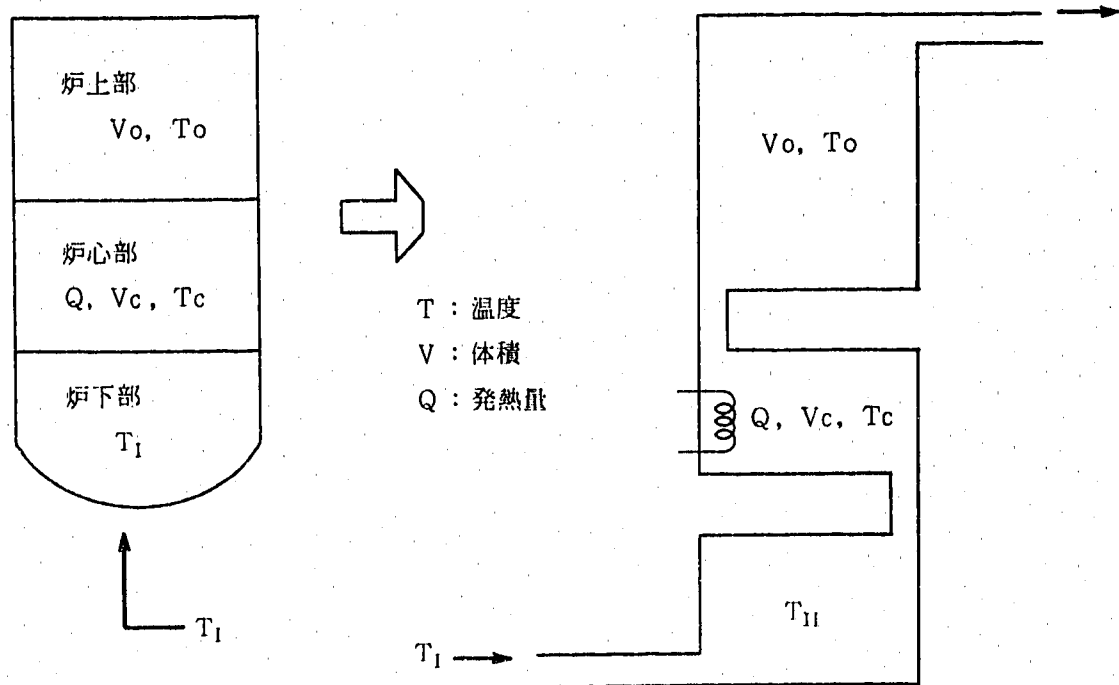
$T(t)$: 各部の代表温度

5.2 近似について

L_R を求めるモデルの基本式については前節で述べた様に与えられるが、ここで計算を簡単にするために以下に述べる様な仮定を置き、近似をする。

- (1) オーバーフロー系については戻り流量を 0 とし、汲上流量を一定 (11t/hr) とする。オーバーフロー系起動不能時は汲上流量を 0 とする。
- (2) 一次冷却材流量については、主ポンプトリップ後一分程度でポニーモータの流量に落ち着くため、ポニーモータによる流量と等しくおき一定とする。それ故 1-(2) で述べた ΔL_R は 0 と置く。

- (3) 原子炉入口温度は過去の実績、解析結果から得られる曲線で入力する。ここでは1987-9-7の主ポンプトリップ時のデータを使用した。(添付1参照)
- (4) 炉容器以外の体積変動の評価については個別に評価せず、炉容器の体積変化のみを考える。
- (5) 炉容器内の温度変動については、炉容器を炉下部、炉心部、炉上部の3部分に分け、各部の温度(それぞれ T_i , T_c , T_o)を次の様な三つのコンパートメントのモデルで模擬を行う。この時各コンパートメントに入ってくる冷却材が、コンパートメント内の冷却材と混合する効果を一次遅れで考慮する。この物理的意味は、添付2にて示す。
- (6) 炉心部における発熱は崩壊熱によるものであり、その評価は6章にて説明する。



$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{\tau_1} (T_{11} - T_1)$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{\tau_2} (T_1 - T_c) + \frac{Q}{\rho_1 V_1 C}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\tau_3} (T_c - T_0)$$

ρ : 冷却材の密度

τ : 時定数

C : 比熱

5.3 簡略化したモデルについて

以上をまとめると、次の様になる。

$$\Delta L = \frac{\Delta V_{total}}{A_R} + \frac{W_{o1} t}{A_R}$$

$$\Delta V_{total} = \Delta V_1 + \Delta V_c + \Delta V_o$$

$$\Delta V = V (\gamma_o / \gamma_T - 1)$$

$$\gamma_T = 950.1 - 0.229T$$

5.4 モデルで使用する定数について

A_R : 炉容器液面断面積	10.18	m ²
W_{o1} : オーバーフロー系汲上流量	11.0	t/hr
V_1 : 原子炉下部プレナム部体積	12.21	m ³
V_c : 炉心部体積	27.48	m ³
V_o : 原子炉上部プレナム部体積	34.51	m ³
C : Na の比熱	0.316	kcal/ kg °C
W : 一次冷却材流量	330.0	t/hr (ポンプモーター流量)
τ_3 : 上部プレナムの時定数	320.0	sec

τ_1 、 τ_2 については τ_3 を各々の体積比倍することで求めた。

V_1 、 V_c 、 V_o 、 τ_3 の値については添付2で示す。

5.5 モデルの評価

図5.1に1987-9-7の一次主ポンプトリップ時における炉容器Naレベルの変動と本モデルによる計算結果を示す。オーバーフロー系自動停止レベル(-5cm)に至る時

間が実測値に比べおよそ一分程度遅れているが、この様に簡略化したモデルとしては予測精度は悪くないと思われる。FORTRAN による本プログラムを添付 6 に示す。

自動停止レベルへの復帰が遅れるということは、温度変動による熱収縮をやや過大に評価していることになるが、炉容器 Na レベルを監視する目的（冷却機能の確保）から言えば厳しめに評価していることになる。

図 5. 2 に混合効果の時間遅れ時定数を 320 秒から 400 秒に変えた時の結果を示す。かなり実測値に近づくことが判る。予測機能として組み込むにあたっては、更に精度の高い計算モデルを考慮するよりも、このモデルの中の時定数を調整すること等で対応することが現実的であろう。

本モデルは 100MW 定格運転を基本として考えたものであるが、他の出力運転の時も、出力による相違は原子炉出口温度の値として考慮されるので、崩壊熱の影響を除いては大きなずれは現れないと考える。

現在のところ予測精度を評価するデータとしてはこの 1 ケースしかないが、基本的にこの方向で本内容を JOYDAS に組み込むこととし、適宜調整していくこととする。

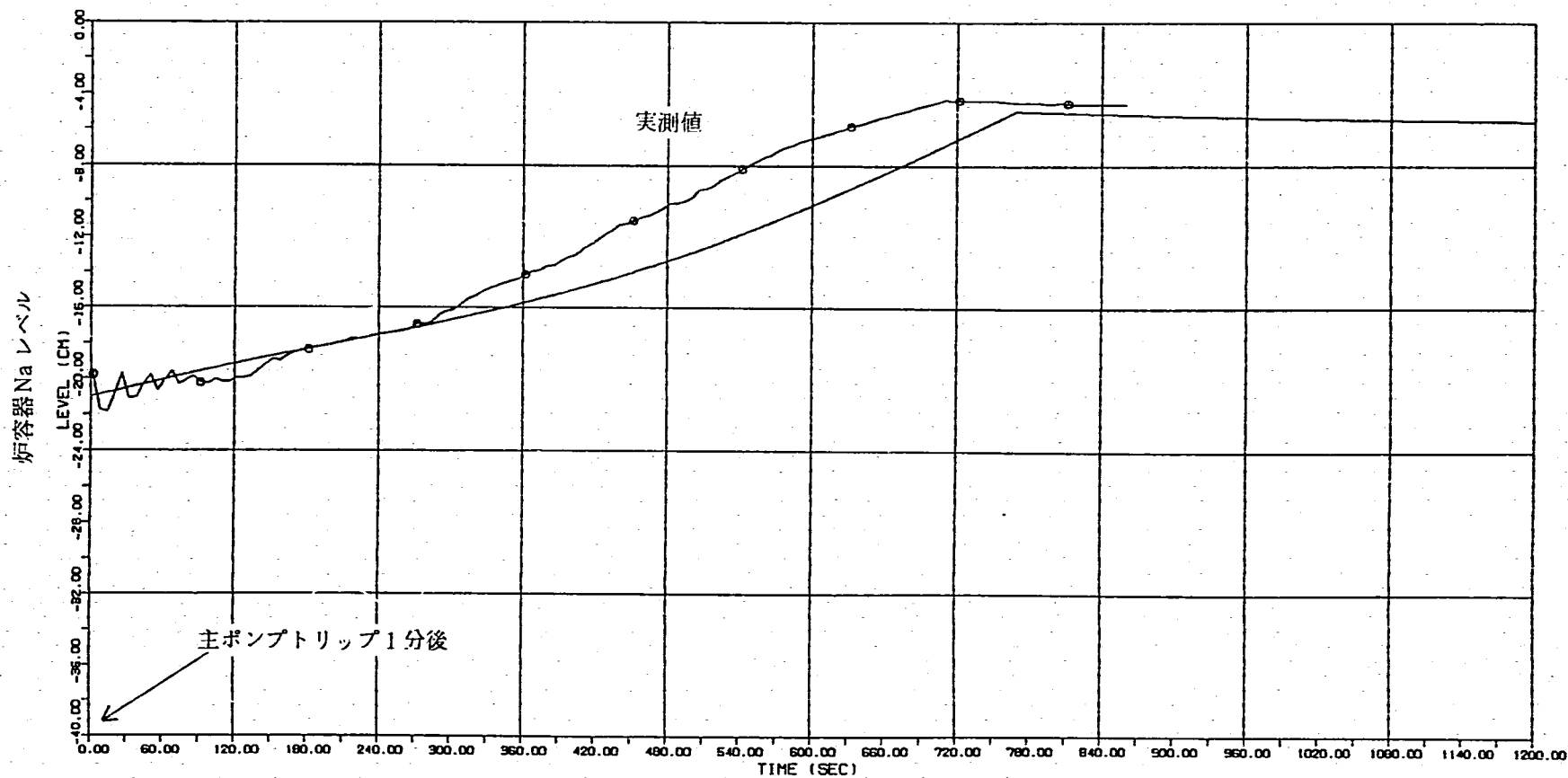


図5.1 1987-9-7主ポンプトリップ時のデータと予測モデルによる計算例 (時定数320秒)

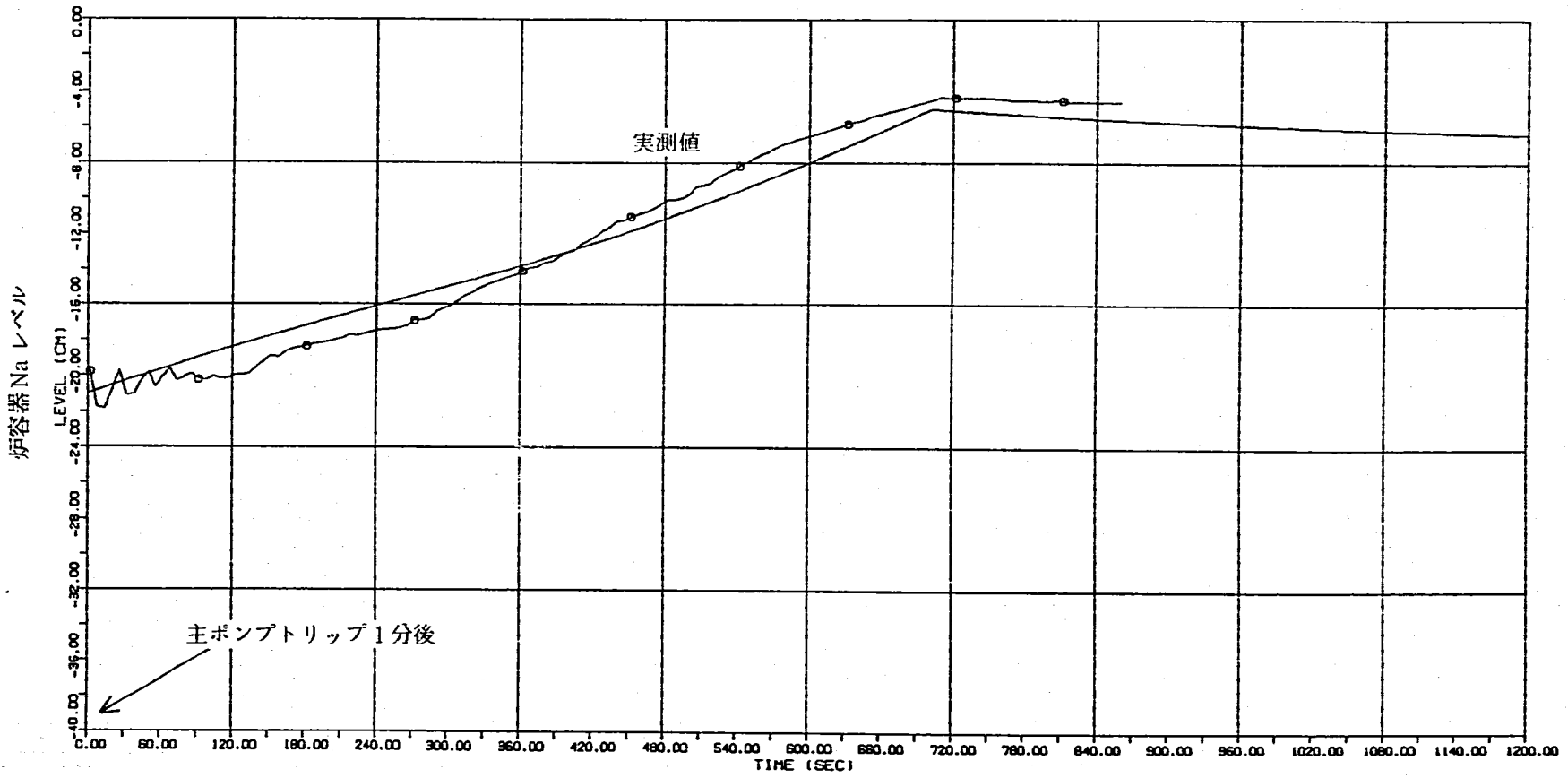


図5.2 1987-9-7主ポンプトリップ時のデータと予測モデルによる計算例 (時定数400秒)

6. 崩壊熱の状態予測計算の具体的手法について

6.1 崩壊熱計算の近似式について

崩壊熱計算の近似式についてSN241 80-19 LMFBRの崩壊熱エネルギー評価式に関する解析により次の様に与えられている。

$$\ell_n f(t_n, t) = A(t_n) + B(t_n)(\ell_n t)^2 + C(t_n) \cdot (\ell_n t)^3 + D(t_n)(1_n t)^3 \quad \text{①}$$

$$A(t_n) = a_0 + a_1 t_n + a_2 t_n^2 + a_3 t_n^3$$

$$B(t_n) = b_0 + b_1 t_n + b_2 t_n^2 + b_3 t_n^3$$

$$C(t_n) = c_0 + c_1 t_n + c_2 t_n^2 + c_3 t_n^3$$

$$D(t_n) = d_0 + d_1 t_n + d_2 t_n^2 + d_3 t_n^3$$

$f(t_n, t)$: 崩壊熱発生割合 (% : 対定格運転出力)

t : 冷却時間 (秒)

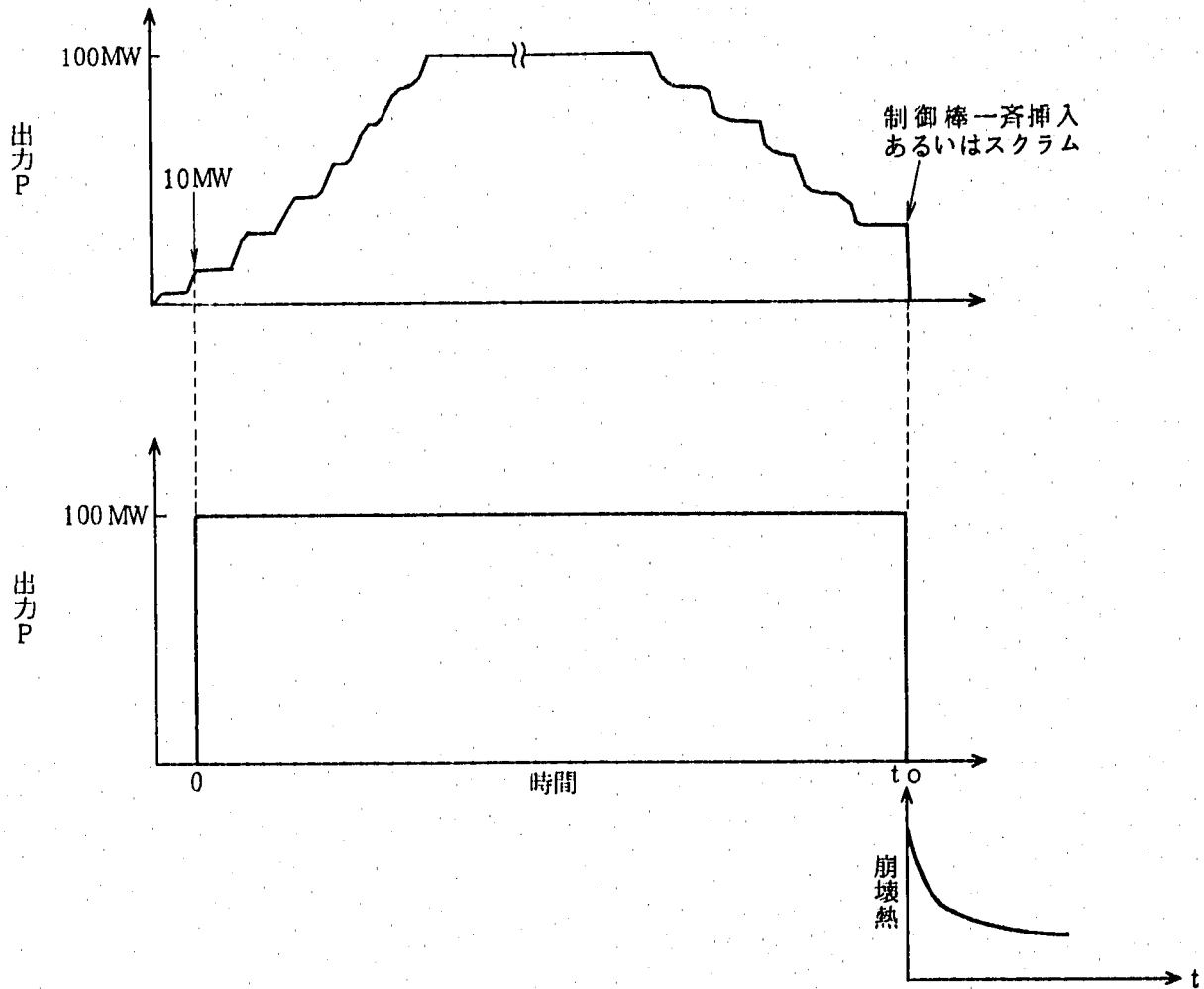
t_n : 運転時間 (日)

添字	0	1	2	3
a	1.560	0.3176×10^{-3}	-0.5395×10^{-6}	0
b	-0.2887×10^{-1}	-0.5750×10^{-4}	0.2195×10^{-6}	-0.2819×10^{-9}
c	0.7946×10^{-3}	0.6242×10^{-5}	-0.2347×10^{-7}	0.3001×10^{-10}
d	-0.7033×10^{-8}	0.3265×10^{-11}	0	0

上記評価式で与えられる $f(t_n, t)$ は t_n 日間一定運転した後、停止した後 t 秒後の崩壊熱の発生割合を示す。

6.2 計算手法について

プラント停止後における崩壊熱を計算するにあたっては、出力上昇、下降時及び定格運転中の出力変動を考慮に入れることを考えると、添付3に示す様な手法をとることが望ましい。しかし①で示される評価式は45日の様なday単位の計算に対し最小2乗法でfittingしたものであるため時間単位の評価に対しては適切とはいえない。(例えば①において $t \rightarrow 0$ としても0にはならない)そこで下記に示す方式をとる。



具体的には、10MWに到達した段階で時間の積算を開始し、制御棒一斉挿入信号あるいはスクラム信号により①による崩壊熱計算を始める。

表示についてはこの計算結果を配列にストックし、運転員のファンクションキー操作により表示させる。

その間は、100MW一定で運転し続けたと仮定する。この仮定は実際には出力変動があるため、崩壊熱の値を全体として高めに見積もることになるが、より厳しめの評価ということで許容する。

この方法は、スクラム信号により停止した場合は精度が高いが、通常停止の様に段階的に下げていった場合は、2倍程度高く見積もることになると思われる。

将来的には、添付で評価する様な出力変動を考慮した方法を採用することが望ましいが、状態予測の目的から言って、高い精度を要求する類のものではないため、本手法でも問題はないと思われる。

ただし、式①における係数 $a_0 \sim d_0$ までの値はMK-II炉心第1～第7サイクルまでのデータに対する評価値であり、J1燃料からJ2燃料による炉心に移りつつある現時点(MK-II炉心第19サイクル)においては厳密には正しくないが、最大でも7%程度の差しか存在しないため(添付4参照)、この係数を採用しても大きな問題はない。

将来J2燃料による平衡炉心に到達した段階で見直すことで充分と考える。

6.3 出力例

図6.1に本評価式による、10日間100%出力運転した時の結果を示す。

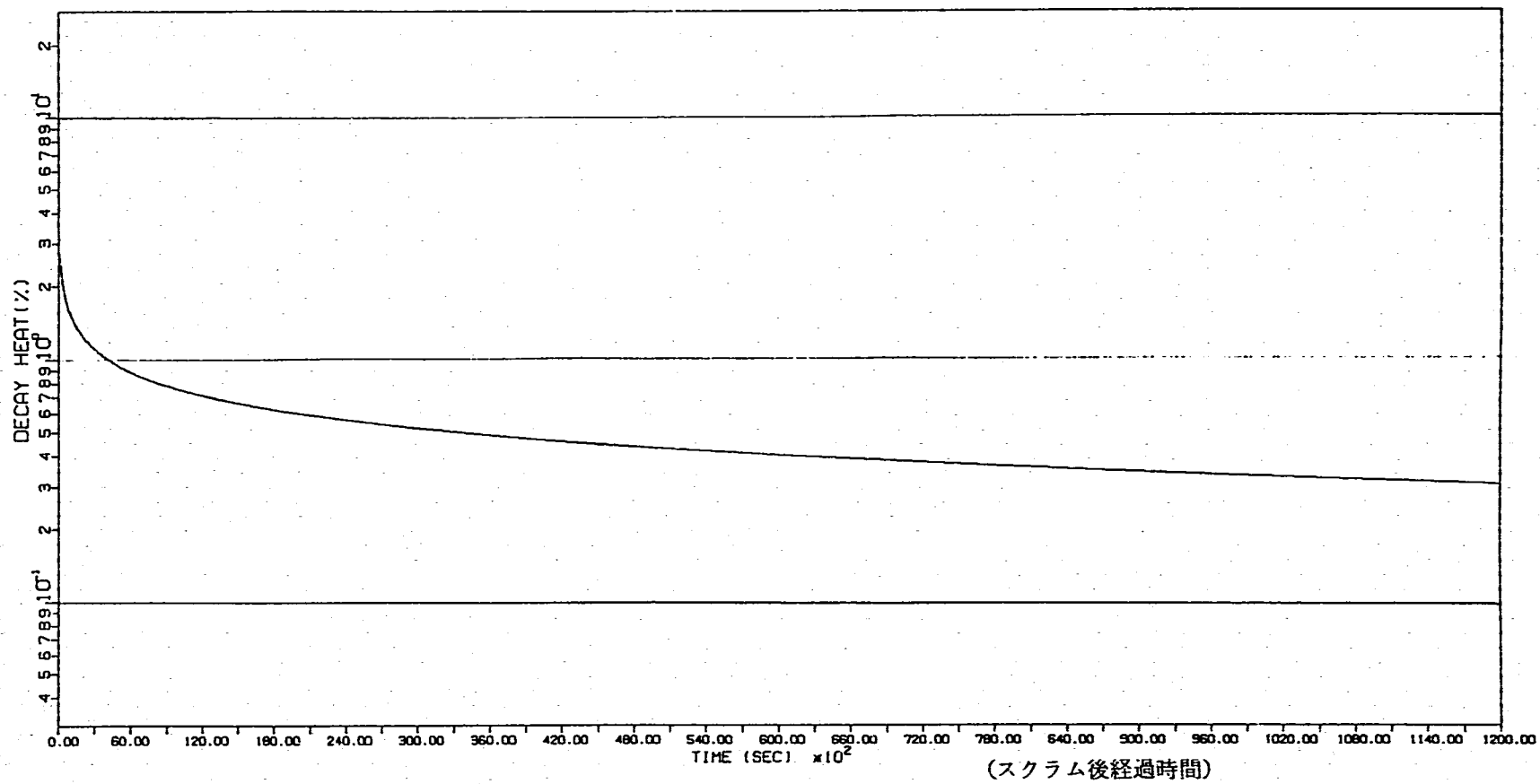


図 6.1 崩壊熱予測曲線

7. 運転員とのインターフェースについて

7.1 表示方法について

表示画面については、運転員の視認性の点から言って、事故後の信号の進展をトレンドグラフとしてCRT上に表すこととする。

使用するシステムとしては、JOYDASを構成する2つの計算機のうちCPUに十分余力のあるV-90/50に組み込むことで計画する。

JOYDASにデジタル入力信号として入っている「スクラム動作」及び「一次主循環ポンプ停止」を使い、これをトリガとして予測計算を開始し、値をストックし、オペレータの要求により表示させることとする。(V90/50のCRTキーボード上のファンクションキーの一つをそれに割り当てる)。この時同じ画面上に実際の信号値の変化も表示させ比較が容易にできるものとする。

図7.1にロジックのフローチャート、図7.2にCRTキーボード概略図を示す。

7.2 表示時間について

- (1) 崩壊熱についてはスクラム直後から表示させるものとし、スクラム後1～2時間で炉出力の1%以内に落ち着くことより、多くとも数時間程度まで表示させれば十分である。
- (2) 炉容器Naレベルの計算開始時間については、一次主ポンプトリップ時あるいはスクラム時から即始める必要はなく、一次冷却材流量がポニーモータによる流量に安定した以降(スクラム後1分以内)にプロセスデータ値を初期値として予測計算を開始することとなる。これはスクラム直後において、炉容器Naレベルに対し要求される操作がないため問題とはならない。表示時間としては、1987-9-7に起きた一次主ポンプトリップ時のデータから判断するに、1時間程度で十分である。(図7.3参照)

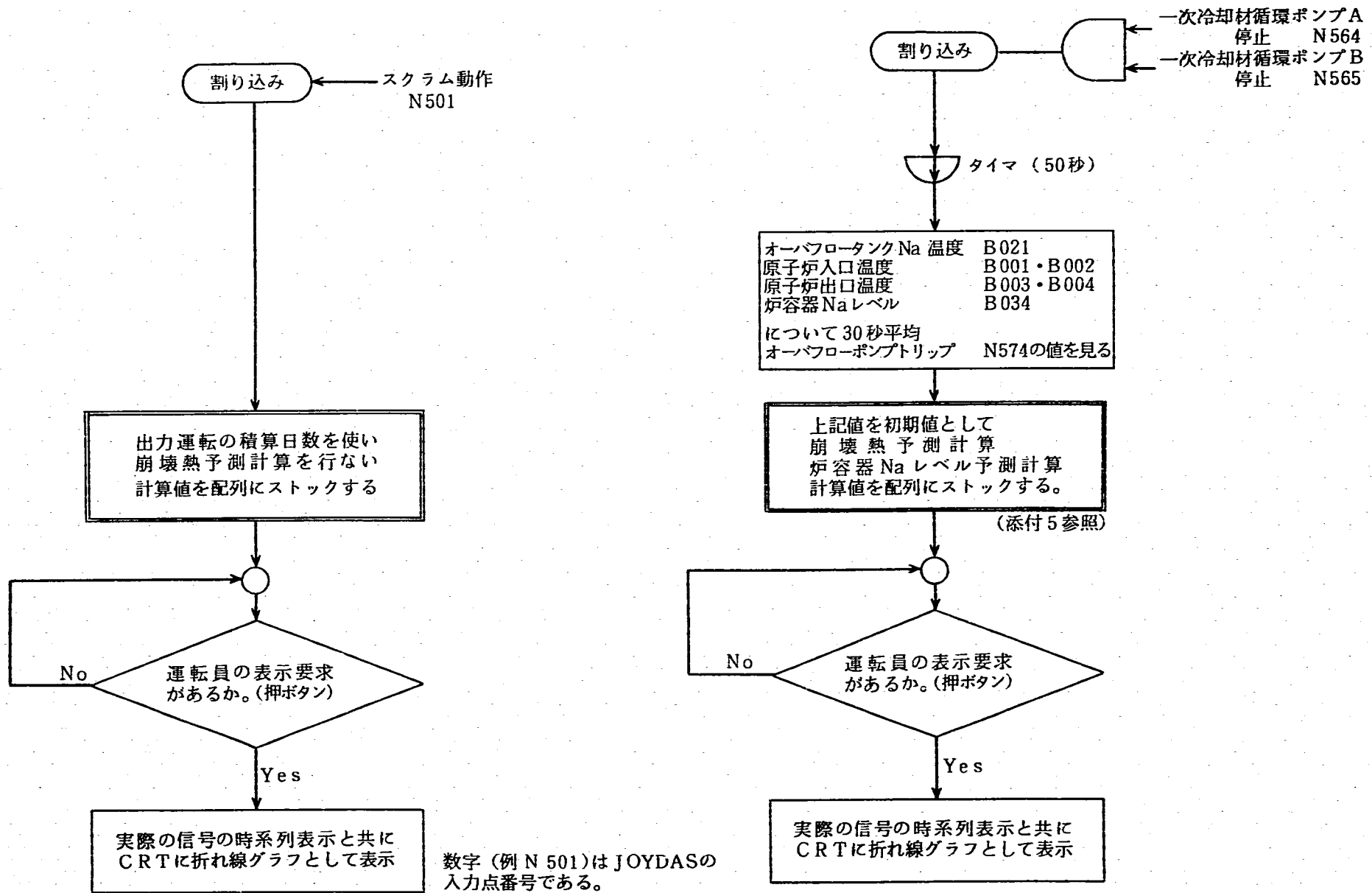
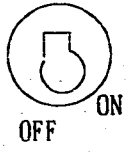


図 7.1 状態予測表示ロジックのフローチャート

KEYBOARD



時刻設定		走査回復				データ一覧	状態予測				周辺機器操作		機器異常確認	CRT復帰
上限値挿入	下限値挿入	走査除外	データ設定	警報点一覧	制限値一覧	設定点一覧	不良点一覧				CRTメニュー			
グループ削除	グループ登録	トレンド削除	トレンド登録	データ表示	制限値表示		A I変換				表示要求	画面前進	画面後退	画面消去

↓

リセット

行挿入	行削除	文字挿入	文字削除
-----	-----	------	------

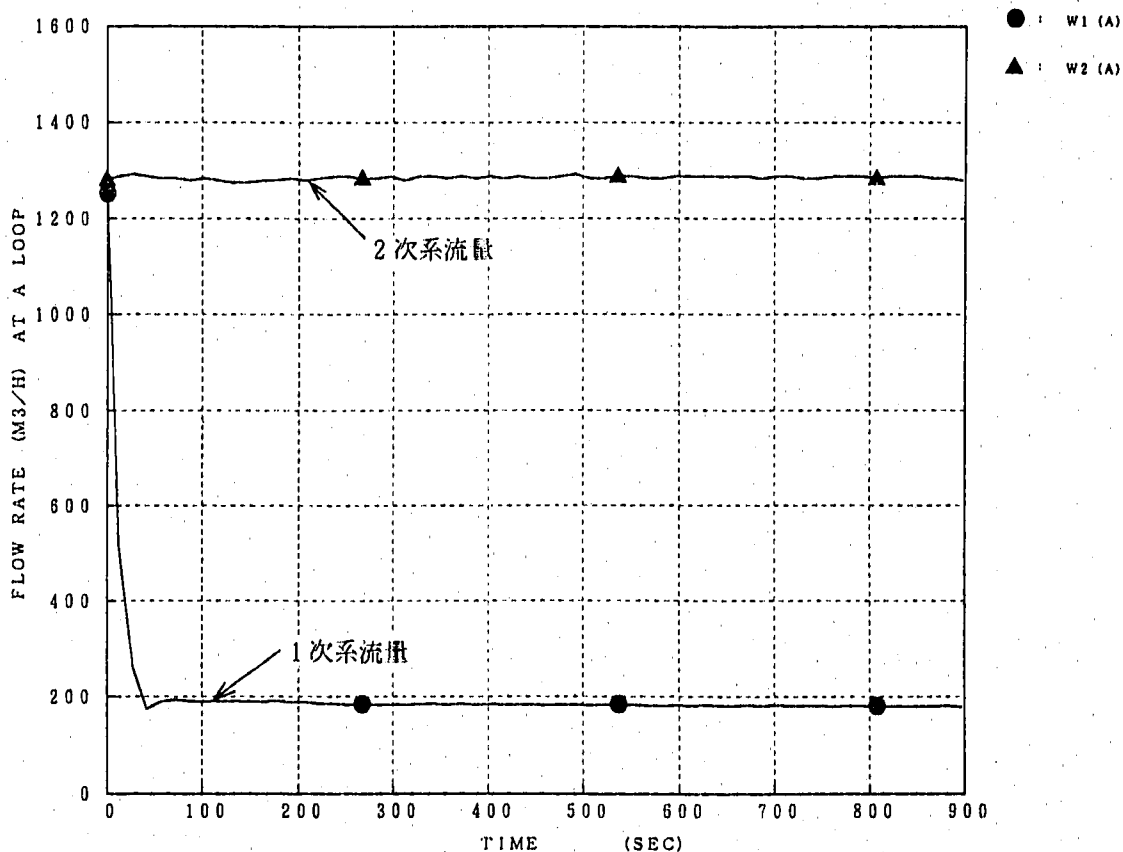
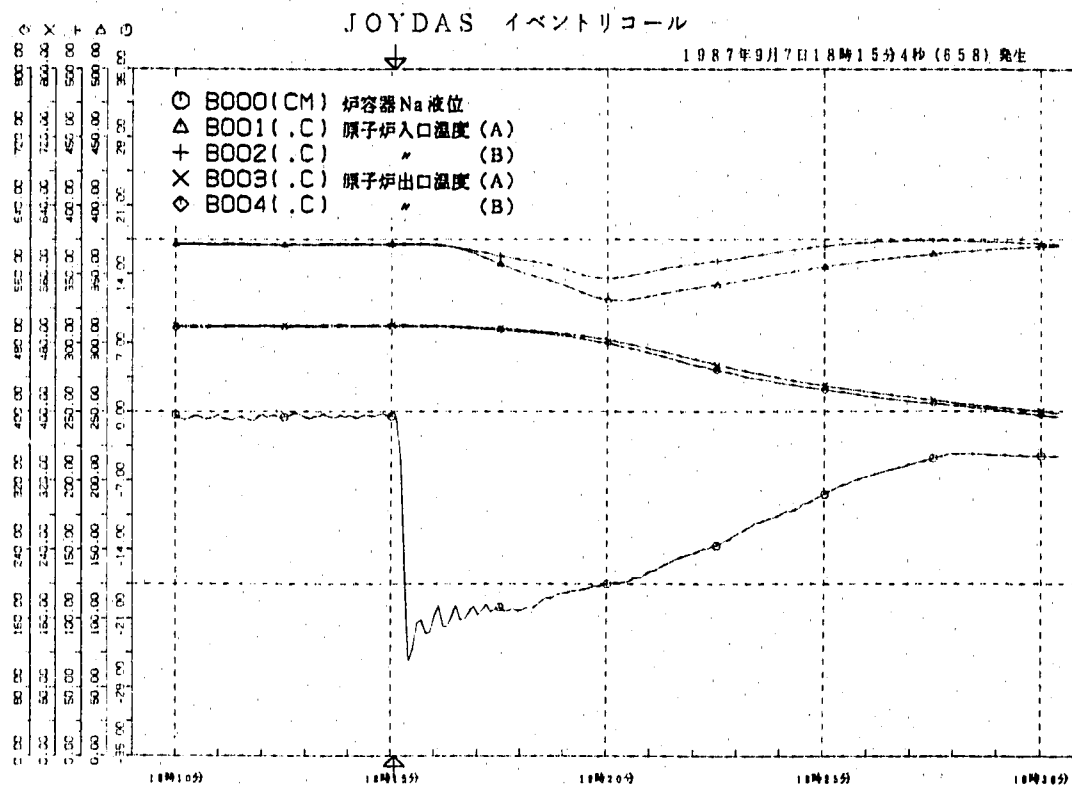
○ 割込
○ 送受信
○ 操作エラー

データ送信	カーソル送信	書込要求	エラーリセット
-------	--------	------	---------

アラムリセット
全画面消去
画面消去
項消去

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	7	8	9	↑	↓
K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	4	5	6	←	→
U	V	W	X	Y	Z	=	+	-	*	1	2	3		
/	()	,	\$	@	.	<	>	SP	0	.	↵	↵	

図7.2 CRTキーボード概略図



EMERGENCY ANALYSIS OF SCRAM EVENT (MAIN PUMP TRIP)

図7.3 1987-9-7 1次冷却材主ポンプトリップ時主要プロセス値の履歴

8. 今後の開発予定

プラント状態予測機能のうち、第一回目として組込む機能についてはほぼ完了したと考える。今後は1990年1月末から始まる第8回定検あるいは第9回定検時においてJOYDASに組込み、運転中の検証を行なう。またその一方で他の信号の選定及びモデルの作成、あるいは動特性モデル以外の手法の採用を試みることにする。

またJOYDASに組込むにあたり、ハードディスクの容量また経済性を考慮に入れ、任意の時間で行なえる本機能のテストモードを考慮することを考えたい。

9. 参考文献

- [1] 中井、 “LMFBRの崩壊熱エネルギー評価式に関する解析”
SN241 80-19
- [2] 深見 他、 “高速実験炉「常陽」データ処理装置（JOYDAS）の概要”
I9520 89-003
- [3] 森本 他、 “「常陽」運転支援システムの開発、（JOYCAT）の開発現状”
N9410 88-028

10. 謝 辞

本機能の検討を進めるにあたっては高速炉第一課の教育訓練グループを始めとする方々に多くの助言をいただいた。また崩壊熱曲線の評価にあたっては技術課炉心グループの長崎英明氏（原子カシステム）に協力いただいた。併せてここに記し、御礼申し上げる。

添付 1 原子炉入口温度模擬式について

原子炉入口温度としては、前に述べた主ポンプトリップの際の実測データを基に最小二乗フィッティングを行い、近似式を作成しそれを入力した。具体的な関数としては次のものである。

$$y(x) = 368.73 + 0.23253x - 3.6696E-3x^2 + 1.4396E-5x^3 - 2.42815E-8x^4 + 1.90355E-11x^5 - 5.7181E-15x^6$$

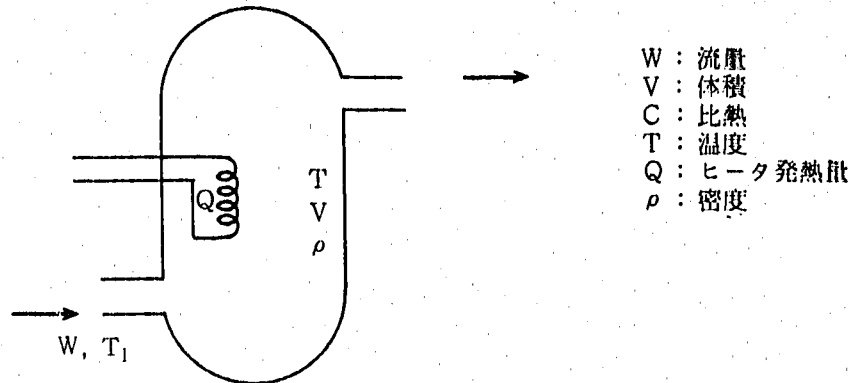
$$= 370. \quad \begin{array}{l} x \leq 900. \\ x > 900. \end{array}$$

y: °C, x : 秒

なおこの関数は、A系とB系の平均をとったものである。

添付2 一次遅れモデルの補足説明

この仮定は、次の様な内部ヒータのあるタンクの巨視的な熱バランスのモデルの類推から得られる。



この時タンクの巨視的なエネルギーバランスの式は次の様になる。

$$\rho V C \frac{dT}{dt} = WC(T_1 - T) + Q$$

$WC T_1$ は、液体が外から持ち込む熱量、 $WC T$ は外へ持ち出される熱量に相当する。

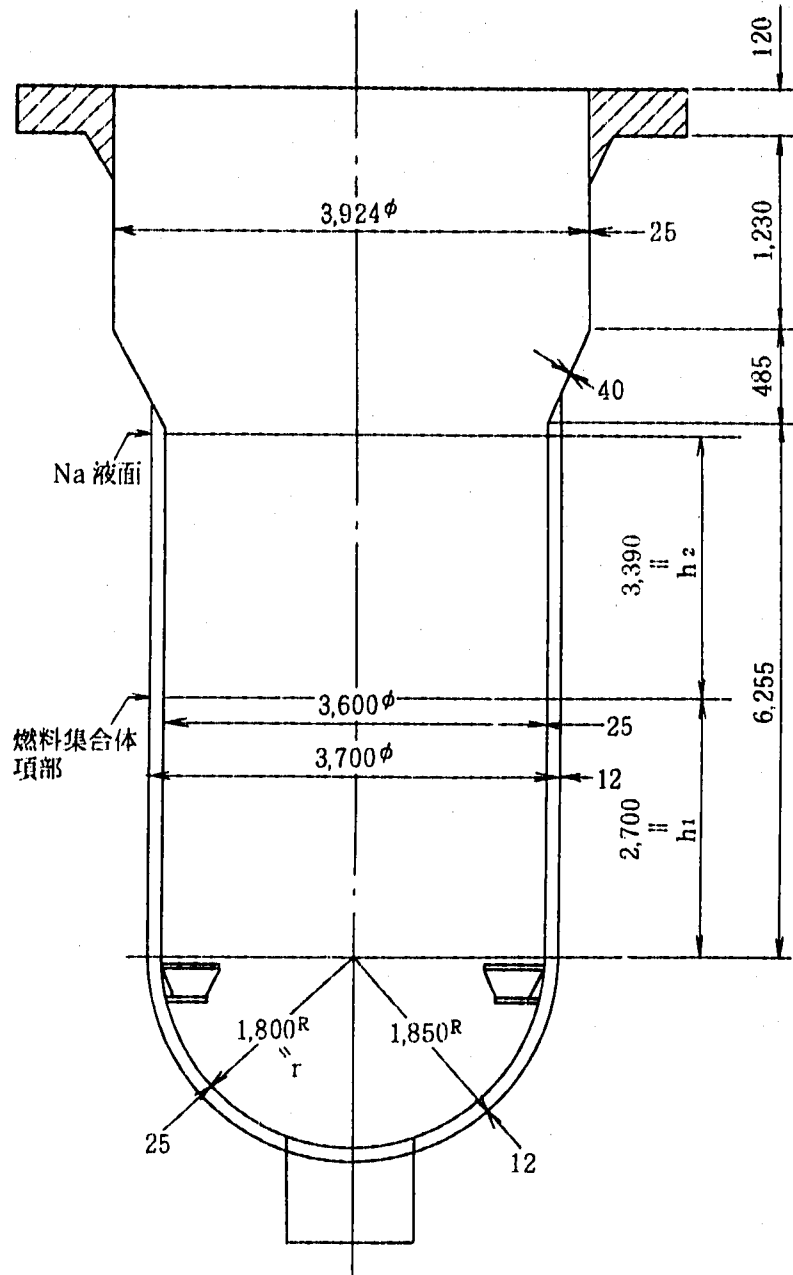
これは

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho V / W} (T_1 - T) + Q / \rho V C$$

と変形してみると判るように、 $\rho V / W$ なる時定数を持った一次遅れのモデルになる。

炉上部では、この時定数は定格流量2200t / hr、Na 温度 435°Cの時48秒となるが、このモデルではポニーモータ流量になるため、 $48 / 0.15 = 320$ 秒を採用した。なお他の領域はこの時定数にインベントリーの比をかけて使用する。

各部の体積は以下の様に算出した。



炉容器寸法

- 炉容器下部プレナム部体積

$$\frac{1}{2} \times \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{2}{3} \times \pi \times (1.8)^3 = 12.21 \text{ m}^3$$

- 燃料集合体部体積

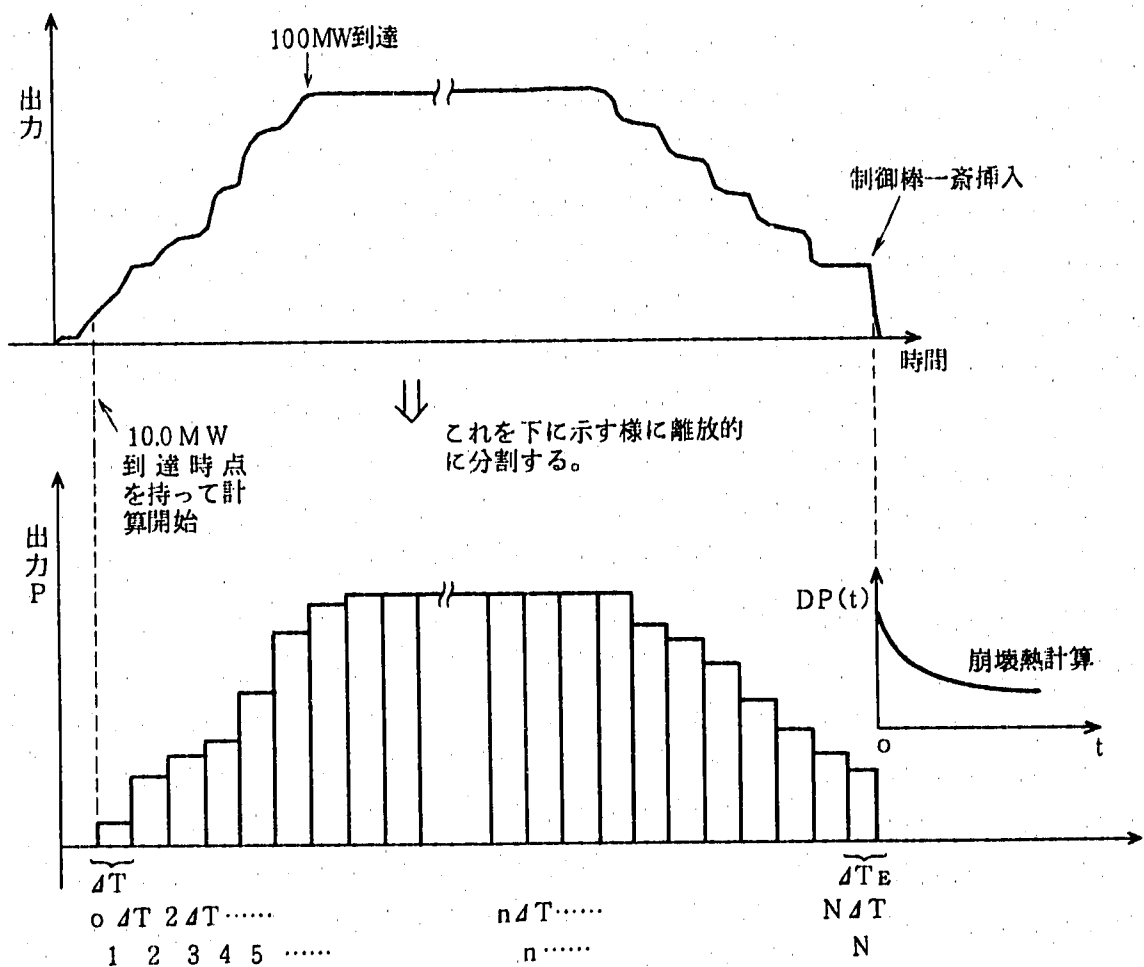
$$h_1 \times \pi r^2 = 2.7 \times \pi \times 1.8^2 = 27.48 \text{ m}^3$$

- 炉容器上部プレナム部体積

$$h_2 \times \pi r^2 = 3.39 \times \pi \times 1.8^2 = 34.51 \text{ m}^3$$

添付3 出力変動を考慮した崩壊熱計算法

下記に示す様な運転を行なった時の例を参考にして、崩壊熱の状態予測計算手法を示す。



各分割された運転区間が、崩壊熱計算に与える寄与を求め、それを総和することで計算できる。

具体的には、 $P_{(1)} \dots P_{(n)} \dots P_{(N)}$ として配列 P に各時刻の出力を入れる。

・式①において t_0 を ΔT とおいた $A(\Delta T) \sim D(\Delta T)$ は一定であるから崩壊熱は②式に示す様に計算される。

$$DP(t) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{P_{(n)}}{100} f_n(\Delta T, t) \right] + \frac{P_{(n+1)}}{100} f_{n+1}(\Delta T_E, t) \quad \textcircled{2}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \ell_n f_n(\Delta T, t) = & A(\Delta T) + B(\Delta T) \cdot \left\{ \ell_n (t + (N-n) \Delta T + \Delta T_E) \right\}^2 \\ & + C(\Delta T) \cdot \left\{ \ell_n (t + (N-n) \Delta T + \Delta T_E) \right\}^3 \\ & + D(\Delta T) \cdot \left\{ \ell_n (t + (N-n) \Delta T + \Delta T_E) \right\}^4 \quad \textcircled{3} \end{aligned}$$

(2) 計算開始のタイミング、運転員とのインターフェースについて

- ・通常の停止操作の時は、制御棒一斉挿入の信号をトリガとして②の計算を開始し、運転員の表示要求により表示させる。スクラム時は、スクラム信号をトリガとする。
- ・出力上昇時の計算開始は、10.0MW到達時点でラッチし計算開始（ $P_{(n)}$ のストック）を行なう。
- ・表示については、②の計算結果を配列にストックし、運転員のファンクションキー操作により表示させる。

添付4 MK-II炉心における炉心崩壊熱曲線の変化

1. 概要

J1燃料によって構成されている炉心とJ2燃料装荷後の炉心との崩壊熱の相違を確認するために、FPGSによる比較計算を試みた。

2. 計算コード：“FPGS-3”

3. 計算対象サイクル：

J2燃料装荷前・・第12サイクル

装荷後・・第16サイクル

4. 計算方法

計算対象のMK-II各炉心の炉心燃料領域毎0～5列の各例1体分（平均）についての燃料部（55cm長）の崩壊熱について計算を行い、得られた結果に対し各列の燃料本数を乗し炉心燃料領域の崩壊熱を求める。

炉心の全崩壊熱は、求めた炉心燃料領域の崩壊熱に軸方向及び径方向反射体部分のファクター（軸方向5%、径方向2%）を乗じて求めた。

今回求めた炉心の崩壊熱計算期間は、サイクル終了時0～10000secとした。

表1に各サイクル列毎の燃料本数を示す。

5. 計算結果

計算結果を表2に示す。

J1燃料炉心（第12サイクル）とJ2燃料を炉心燃料領域の約40%装荷した場合（第16サイクル）の炉心崩壊熱を比べた場合、原子炉停止後0～10000秒の期間での両者の比は0.97～0.93であり、J2燃料装荷による炉心崩壊熱に大きな違いは見られなかった。

表1 計算対象サイクルの燃料本数

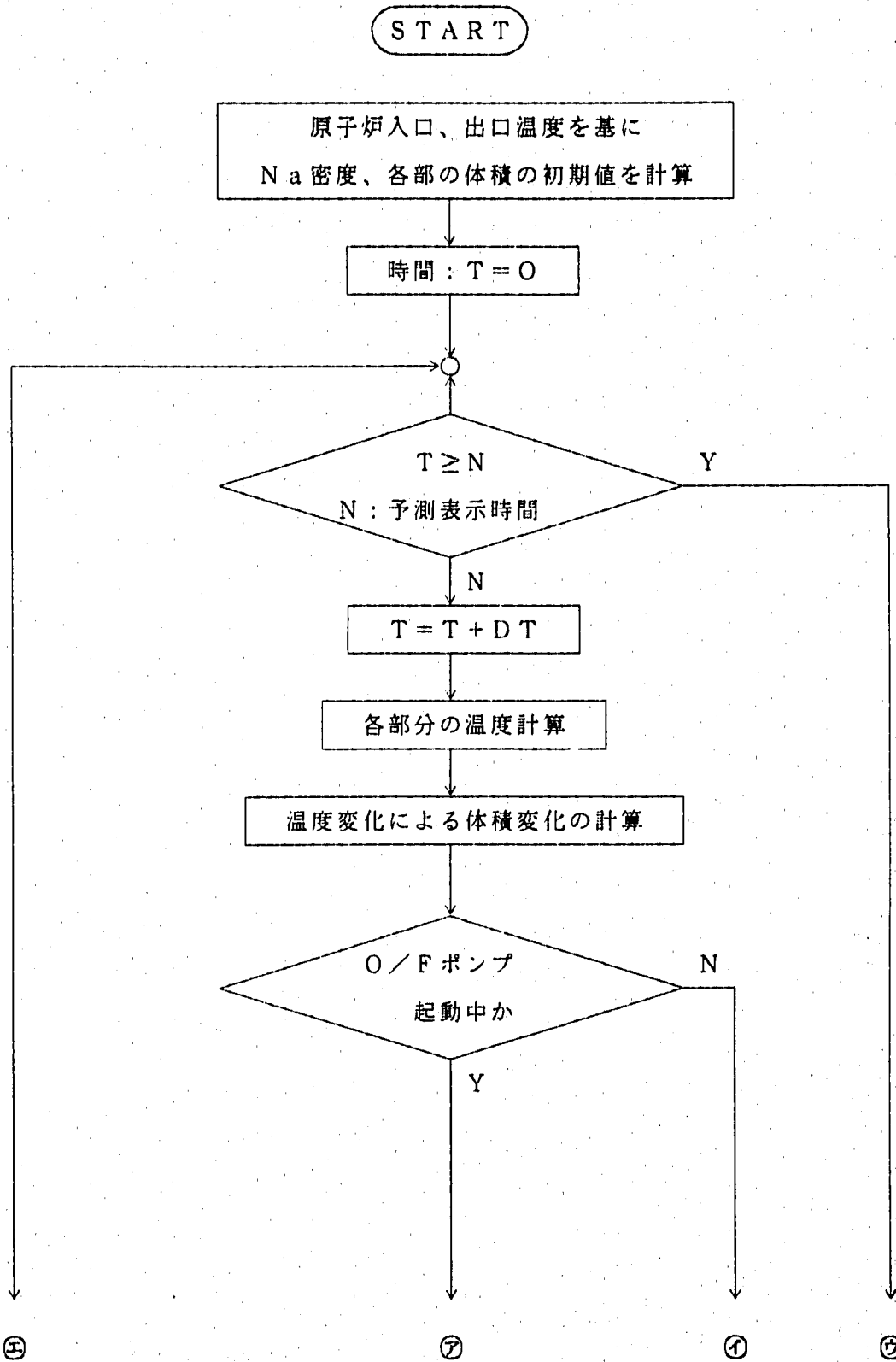
例	12サイクル				16サイクル			
	ドライバー	A 特	B 特	C 特	ドライバー	A 特	B 特	C 特
0	1	0	0	0	1 (1)	0	0	0
1	6	0	0	0	5 (3)	0	0	0
2	1 2	0	0	0	1 1 (8)	1	0	0
3	1 1	0	1	0	9 (6)	0	1	2
4	2 4	0	0	0	2 4 (6)	0	0	0
5	1 1	0	0	0	1 3 (0)	0	0	0
TOTAL	6 5	0	1	0	6 3 (24)	1	1	2

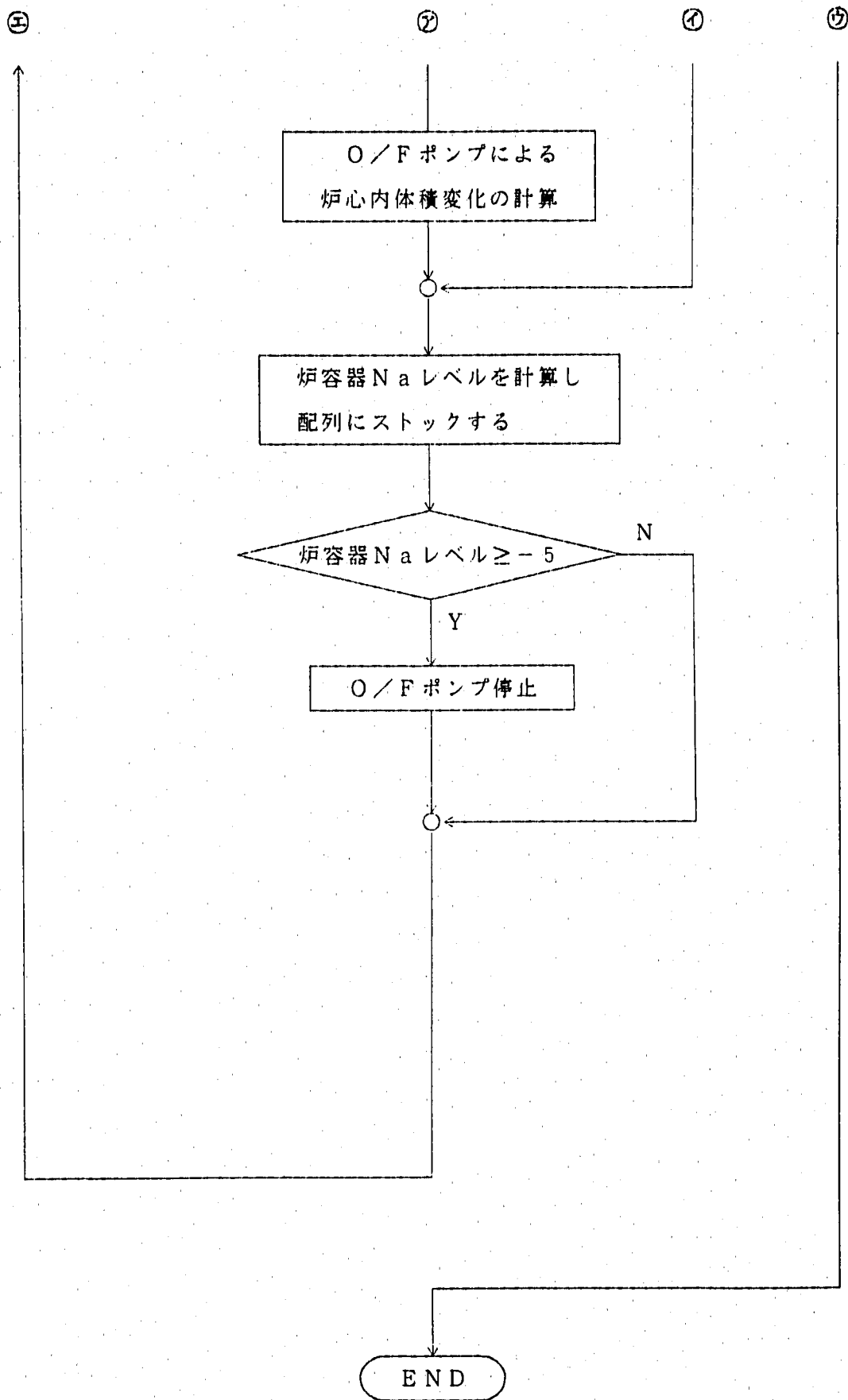
注) : () 内 J 2 燃料本数

表2 炉心崩壊熱計算結果

時間(sec)	第12サイクル①	第12サイクル②	①/②
0	6.138×10^6	6.318×10^6	0.97
5	4.904×10^6	5.050×10^6	0.97
10	4.452×10^6	4.588×10^6	0.97
50	3.415×10^6	3.526×10^6	0.97
100	2.980×10^6	3.083×10^6	0.97
200	2.589×10^6	2.685×10^6	0.96
300	2.386×10^6	2.479×10^6	0.96
900	1.860×10^6	1.944×10^6	0.96
1800	1.507×10^6	1.587×10^6	0.95
3600	1.174×10^6	1.248×10^6	0.94
10000	8.126×10^5	8.751×10^5	0.93

添付5 炉容器Naレベル予測モデルフローチャート





添付6 炉容器Na レベル予測モデル計算プログラム

```

C ROYOUKI NA LEVEL YOSOKU MODEL                                00010000
  REAL GAM,L,LO                                                00020004
  REAL PLOTX(2000),PLOTY(2000)                                00030000
  REAL PLOTX1(500),PLOTY1(500),TIME(500),RLEV(500)           00040010
  GAM(X)=950.1-0.22977*X                                       00050004
  DATA TH/4.00/                                               00060008
  DATA ALPHA,C,TAU/1.000,0.316,320.0/                         00070015
  DATA T10,T00,TCO,V0,V10,TFO/370.,500.,435.,330.,11.,450./  00080000
  DATA L0/-21./                                               00090000
  DATA V10,VCO,V00/12.21,27.48,34.51/                         00101013
  DATA DT/1./                                                 00110000
  DATA N,K/1200,0/                                             00120004
  DATA GH100,GHCO0,GH000/865.1,850.2,835.2/                  00130004
  CALL PLOTS(0.,0.,50)                                         00140004
  CALL PLOT(4.5,4.,-3)                                         00150004
  TCO=0.5*(T10+T00)                                           00160000
C NA MITUDO NO SYOKI SETTEI                                    00170000
  GAM10=GAM(T10)                                               00180000
  GAMCO=GAM(TCO)                                               00190000
  GAM00=GAM(T00)                                               00200000
  GH0FO=GAM(TFO)                                               00210001
C KAKUBU NO TAISEKI NO SYOKI SETTEI                           00220002
  V1=V10*GH100/GAM10                                          00230004
  VC=VCO*GHCO0/GAMCO                                          00240004
  VO=V00*GH000/GAM00                                          00250004
  T=0.0                                                         00260000
  T1=T10                                                         00270004
  T0=T00                                                         00280004
  TC=TCO                                                         00290004
  DVA=0.0                                                       00300004
  DLA=0.0                                                       00310004
C TAN I NO KANZAN:T/HR KARA KG/SEC                             00320004
  W1=W10/3.6                                                    00330004
  W=V0/3.6                                                      00340004
C YOSOKU KEISAN NO KAISI                                       00350004
  N=0                                                           00360004
  DO 10 I=1,N                                                  00370000
  T=T+DT                                                        00380004
  CALL DECAYP(Q,T,TH)                                          00390000
  CALL INTMP(T,T11)                                           00400004
  T1=T1+DT*(T11-T1)/(TAU=V10/V00)                             00461013
  TC=TC+DT*(T1-TC)/(TAU=VCO/V00)+Q*DT/3226.6                 00462013
  T0=T0+DT*(TC-T0)/TAU                                        00463013
  GAM1=GAM(T1)                                                 00470000
  GAM0=GAM(T0)                                                 00480000
  GAMC=GAM(TC)                                                 00490000
  DVI=V1*(GAM10/GAM1-1.0)                                     00500000
  DVC=VC*(GAMCO/GAMC-1.0)                                     00510000
  DVO=VO*(GAM00/GAM0-1.0)                                     00520000
C K=0 :O/F KEI UNTEN KANOU                                       00530001
  IF(K.EQ.0) THEN                                             00540004
  DVA=DVA+DT*W1/GH0FO                                         00550004
  DLA=100.*DVA/10.18                                          00560004
  ENDIF                                                         00580004
  DL=100.*ALPHA=(DVC+DVO+DVI)/10.18+DLA                       00600016
  L=L0+DL                                                       00610000
  PLOTX(I)=T                                                   00620000
  PLOTY(I)=L                                                   00630000
C O/F KEI JIOUTEISI LOGIC NO HANTEI                             00640001
  IF(L.GE.-5.0) THEN                                          00650004
  K=1                                                           00660004
  DO 101 WHILE (M.EQ.0)                                       00670004
  WRITE(6,601) T                                              00680004

```


601	FORMAT (1H0,5X,26HOF KEI TEISI TOUTATU JIKAN/9X,F6.1)	00690004
	M=1	00700004
101	CONTINUE	00710004
	ENDIF	00720004
	10 CONTINUE	00730000
C	PLOT ROUTIN	00740004
	XMIN=PLOTX(1)	00750000
	XMAX=PLOTX(N)	00760000
	DX=XMAX/40.	00770000
	YMIN=-40.	00780008
	YMAX=0.0	00790000
	DY=(YMAX-YMIN)/20.	00800000
	PLOTX(N+1)=0.0	00810000
	PLOTX(N+2)=DX	00820000
	PLOTY(N+1)=YMIN	00830000
	PLOTY(N+2)=DY	00840000
	CALL NEWPEN(1)	00850000
	CALL FACTOR(0.5)	00860000
	CALL AXIS(0.,0.,10HTIME (SEC),-10,40.,0.,0.,DX)	00870000
	CALL AXIS(0.,0.,10HLEVEL (CM),10,20.,90.,YMIN,DY)	00880000
	CALL LINE(PLOTX(1),PLOTY(1),1200,1,0,0)	00890000
C		00900010
	READ(3, '(A12,I12,56X)') YTITLE,NC	00910010
	READ(3, '(6F12.6,8X)') ((TIME(I1),RLEV(I1)),I1=1,155)	00920010
	DO 200 I2=1,144	00930010
	PLOTX1(I2)=TIME(I2+11)-60.	00940010
	PLOTY1(I2)=RLEV(I2+11)	00950010
200	CONTINUE	00960010
	PLOTX1(145)=0.0	00970010
	PLOTX1(146)=DX	00980010
	PLOTY1(145)=YMIN	00990010
	PLOTY1(146)=DY	01000010
	CALL LINE(PLOTX1,PLOTY1,144,1,15,1)	01010010
C		01020010
	CALL GRID(0.,0.,4.,4.,10,5)	01030004
	CALL PLOT(0.0,0.0,999)	01040000
	STOP	01050000
	END	01060000
C		01070000
	SUBROUTINE DECAYP(Q,T,TN)	01080000
	TN2=TN*TN	01090000
	AL=ALOG(T+60.)	01100000
	AL2=AL*AL	01110000
	AL3=AL2*AL	01120000
	AL7=AL*AL3*AL3	01130000
	A1=1.560+0.3176E-3*TN-0.5395E-6*TN2	01140000
	B1=-0.2887E-1-0.5750E-4*TN+0.2195E-6*TN2	01150000
	C1=0.7946E-3+0.6242E-5*TN-0.2347E-7*TN2	01160000
	D1=-0.7033E-8+0.3265E-11*TN	01170000
	P=A1+B1*AL2+C1*AL3+D1*AL7	01180000
	Q=2.38846E02*EXP(P)	01190000
	RETURN	01200000
	END	01210000
C		01220004
	SUBROUTINE INTMP(T,T11)	01230004
	T1=T+21.	01240007
	IF(T1.LT.900.) THEN	01250004
	T2=T1*T1	01260004
	T3=T2*T1	01270004
	T11=368.73+0.23253*T1-3.6696E-3*T2+1.4396E-5*T3-2.42815E-8*T2*T2+	01280005
	&1.90355E-11*T2*T3-5.718E-15*T3*T3	01290016
	ELSE	01300004
	T11=370.	01310004
	ENDIF	01320004
	RETURN	01330004
	END	01340004