

JAERI-M
82-180

制御系設計・評価のためのCADシステム
(Version 1)

1982年11月

島崎 潤也・篠原 慶邦

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 山田軽印刷所

制御系設計・評価のためのCADシステム
(Version 1)

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
島崎 潤也・篠原 慶邦

(1982年11月1日受理)

原子炉プラントの制御系設計と特性評価を効率的に行うために、計算機を利用した対話型設計システムを開発した。今回開発したCADシステムVersion 1は動特性モデルの記述、シミュレーション、対話型システム、データ管理システムに特徴がある。原子炉プラントの動特性モデルはサブシステム、制御系、外部入力に分けてCADシステムに入力し、全体系はそれらの結合を定める入力データにより作成される。こうすることによって制御系の方式設計作業が能率的に行える。本報告ではこの制御系のCADシステムVersion 1の概要を述べ、さらに原子炉プラントへの適用としてBWRの圧力制御系評価と多目的高温ガス実験炉の動特性計算の例を述べた。

A CAD System for Control System Design and Evaluation (Version 1)

Junya SHIMAZAKI and Yoshikuni SHINOHARA

Division of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 1, 1982)

An iterative computer program system has been developed for computer aided design and evaluation of control systems for nuclear reactor plant. The computer aided system (Version 1) developed has some remarkable features in the methods of describing dynamic model, dynamic simulation, man-computer interaction and data management. The dynamic models of subsystems, such as plant subsystems and control system, and user's functions can be input separately in the CAD system and the total system is generated using the data which specify the connections among them. This method of total system generation makes the design work efficient.

This report describes an outline of the CAD system (Version 1) and test examples of evaluation of pressure control of a BWR plant and dynamic simulation using a simplified model of the multi-purpose very high temperature gas-cooled experimental reactor.

Keywords: CAD for Control System, Control System Design, Dynamic Simulation, Nuclear Reactor Plant, Man-Computer Interaction System, BWR Pressure Control, VHTR Dynamics

目 次

1. 序 論	1
2. CAD システム (Version 1) の構成	2
3. CAD の計算プログラムの概要	5
3.1 メインプログラム	5
3.2 サブシステムと制御系サブシステムの定義	5
3.3 離散時間動特性モデルの自動作成	6
3.4 特性関数の種類と設定法	7
3.5 全体系の結合方法	8
3.6 シミュレーションの手順	10
3.7 サブシステムの安定性評価	10
3.8 シミュレーション結果の編集	11
3.9 データ管理	11
4. 原子炉プラントへの適用例	13
4.1 BWR の圧力制御系評価	13
4.2 VHTR 動特性計算	19
5. 結 論	25
謝 辞	25
参考文献	25

CONTENTS

1.	Introduction	1
2.	Structure of the CAD System (Version 1)	2
3.	Outline of Computer Programs for the CAD System	5
3.1	Main Program	5
3.2	Description of Subsystems and Control System	5
3.3	Automatic Generation of Discrete-Time Dynamic Model	6
3.4	Characteristic Functions	7
3.5	Connection Method for Total System Generation	8
3.6	Procedure of Dynamic Simulation	10
3.7	Stability Evaluation of Subsystem Model	10
3.8	Edition of Dynamic Simulation Results	11
3.9	Data Management	11
4.	Test Examples	13
4.1	Evaluation of Pressure Control of a BWR Plant	13
4.2	Dynamic Simulation of a Symplified Model for the Multi-Purpose Very High Temperature Gas-Cooled Experimental Reactor	19
5.	Conclusion	25
	Acknowledgement	25
	References	25

1. 序 論

制御系の設計・評価のためには、対象とするプラントの動特性のモデル化、固有動特性の解析、制御目標の設定、制御系の構成とパラメータの選定、種々の外乱に対する制御特性の解析・評価など一連の計算・解析の作業を種々の条件（各種出力状態など）のもとで、またパラメータの種々の組合せに対して多数回繰返して行う必要がある。そのため制御系の計算作業量は通常大量になる。これを効率的に行うために計算機利用の設計法いわゆる制御系のためのCAD（Computer Aided Design）が最近研究されだしている。^{1) 2) 4)} 機械、プラント配管系等の設計に用いるCADは現在原子力分野でも用いられ始めているが、動特性を扱う制御系設計用CADはまだ研究室規模のものが主体であり、原子力プラント用に利用するには扱える規模と内容に問題が残されている。その理由は制御系の設計のための作業が上に述べた様に多岐にわたることと、^{6) 7) 8)} まだまだ研究課題が多く残されていることにある。現代制御理論に基づく設計法は最近のマイクロコンピュータ、検出器等の進歩によって現実には有効になりつつあるが、確固たる利用法が定まっているものではない。また最近では古典的な周波数領域における設計理論を多変数系に拡張した方法が計算機のグラフィック表示を用いた対話型設計方法として有望視されている。

これらの状況を考慮して、原子炉プラントの制御系設計と特性評価を効率的に行うため、計算機を利用した対話型の設計システムを以下の観点から作成した。

- (1) 原子炉プラントは大規模システムであるので、動特性からみてサブシステムに分解して扱えること。
- (2) 各サブシステムは1つの動的システムを完成している様にとり、状態変数記述⁵⁾で動特性を表わすこと。
- (3) 制御系も1つのサブシステムとして扱うが、この系のパラメータ等の設定変更が他のサブシステムとは独立に容易にできる様にする。
- (4) 連続系記述で表わされた系は数値計算向きの離散時間モデルに自動変換し、これを用いて動特性シミュレーションを行うこと。³⁾
- (5) 全体系は各サブシステム、外乱、外部入力の設定などの結合により計算機との対話型で容易に行えること。
- (6) シミュレーション結果、各サブシステム等のデータ管理をファイル上で容易に行い、必要なグラフィック表示が直ちに得られること。
- (7) 制御系の設計のためのアルゴリズムはVersion 1は組み込まず、設計者が制御系設計パラメータの変更とグラフィックされた応答の比較により制御系の良否を判断して設計を進める。（制御アルゴリズムの自動設計プログラムのいくつかはすでに開発済であるが、³⁾ それらは本CADシステムのVersion 2において組み込む予定である。）

さらに作成したCADシステムの性能を調べるための計算例として、BWRの圧力制御系評価と多目的高温ガス実験炉の動特性計算を実施した。

2. CADシステム (Version 1) の構成

制御系の設計は一般に次の様な手順で実施される。まず制御対象の動特性モデルを入出力データから同定手法により、あるいは物理的数式モデルから定める。ついで、得られた動特性モデルを用いて制御系なしの動特性解析を行う。つぎに、制御の目的と仕様から制御系の構成を定め、その制御系が種々の外乱のもとでどのような特性を示すか、また制御対象のパラメータが変化した場合でも満足できるかどうかを動特性シミュレーションによって評価し、満足できない場合は設計をやり直すことになる。

CADを利用した制御系の設計においても同じ手順がとられるが、その内容は多様で、種々の設計・解析の手法を適切に組合せ、設計計算作業をCRT表示装置を用いて視覚的かつ対話的に進めることが基本となる。制御系の設計と特性評価にあたって、設計者は適切な設計アルゴリズムとパラメータの選定および制御系の特性評価の計算に専念することができ、多種多様な動特性シミュレーションを含むデータ管理と複雑な計算を計算機で自動的に行わせることにより、設計作業を能率よく行うことが可能となる。良好なCADシステムの開発のためには、設計手順の中の動特性解析、制御系構成、動特性シミュレーションのためにすぐれた計算アルゴリズムの開発が必要であり、さらにデータの管理システムと人間-計算機間の対話システムの工夫が重要であった。今回開発したCADシステムはプラント全体の動特性モデルの作成方法、効率的な動特性シミュレーション方法とデータ管理方法、応答曲線などの計算結果のCRT表示方法において特に新しい工夫と考察を行った。制御系自動設計用の各種プログラムについては今回は組込まず、ただ制御系構成の追加と変更が容易にできるプログラムを設け、それによって制御系の設計と特性評価を行うことにした。

開発したCADシステムはFig. 1に示す様に7つのサブプログラムから構成され、それぞれのサブプログラムは独立に実行可能である。以下にサブプログラムの概略を述べる。なお本CADシステムは大型計算機(FACOM M200)のTSS端末を利用することを前提として作成されているが、バッチ処理も可能な様に、また計算アルゴリズムとプログラムはミニコンピュータでも、動特性モデルの次元を縮小すれば、十分働く様に考慮してある。

(1) サブシステムの定義と離散時間モデルの作成 (略して SSD: Subsystem Descriptor)

原子炉プラントは種々のサブシステムから構成される1つの大規模システムを形成しており、動特性の観点からサブシステムに分けて扱うのが便利である。そして、プラントの全体系はサブシステムを合成して求める。そうすれば、各々のサブシステムごとに動特性モデルが検討でき、さらに大規模な原子炉プラント全体の動特性も同様に扱うことができる。ここではサブシステムの記述法を述べ、全体系の作成方法は後述する。

動特性を記述するためのモデルは種々に考えられるが、広く一般的に利用可能な状態変数記述のモデルをサブシステムのモデルとして採用する。計算機に入力するためのサブシステムのモデルは通常連続系の形で与え、ついでそれに対応する離散時間モデルを計算プログラムにより自動作成する。データ管理のためには、まず連続系の状態変数記述の動特性モデル

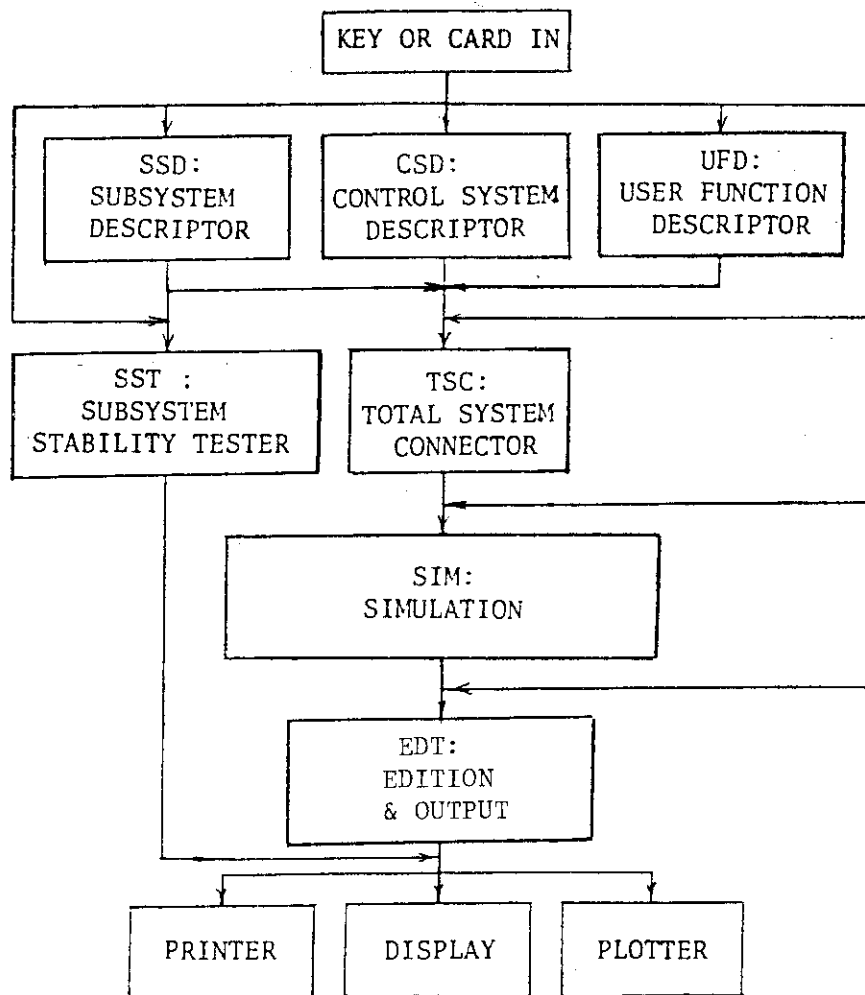


Fig. 1 Structure of CAD System for Control System Design and Evaluation.

を連続系サブシステム定義ファイルに保存し、サブシステムの修正・変更はこのファイルを用いて行う。ついで自動作成された離散時間モデルは連続系モデルと合わせてサブシステム定義ファイルに保存する。プラント全体系の動特性モデルは各サブシステムの離散時間モデルから作り、そのためにサブシステム定義ファイルを利用する。

(2) 制御系サブシステムの定義(略して、CSD: Control System Descriptor)

制御系も1つのサブシステムと考えられるが、本CADシステムでは制御系の設計・評価を中心課題にしているのをそれを特別扱いとし、制御系のパラメータ調整や構成の変更を容易にしている。制御系サブシステムの動特性モデルの記述は直接離散型状態変数モデルで行い、このモデルを制御系定義ファイルに保存する。プラント制御系の完全な記述は次に述べる特性関数とプラント全体系の結合を指定した後に完成する。

(3) 特性関数の定義(略して、UFD: User Function Descriptor)

プラントへの外部入力や非線形特性の模擬のために、特性関数を用いる必要があり、16種

の関数サブプログラムを用意してある。そのうちから実際に使用する特性関数を選択し、関数のパラメータを設定する。そのための情報は特性関数定義ファイルに保存する。

(4) 全体系の構成 (略して, TSC: Total System Connector)

プラントの動特性を構成する上述のサブシステム, 制御系サブシステム, 特性関数を結合して全体系の動特性モデルを作成する。結合方法はそれぞれ3つのサブシステムの入力をサブシステムの出力の線形結合の形で行う。また結合状態の設定データをコネクション・ファイルに保存する。

(5) シミュレーション (略して, SIM: Simulation)

制御系を含めた全体系の動特性シミュレーションを実行する。動特性シミュレーションは(1)~(4)で定義した4つのファイルを用いて行い, 新たにシミュレーション結果ファイルを作成する。シミュレーション結果ファイルはシミュレーションの初期値設定のファイルとしても使用でき, シミュレーションの継続およびCRT表示用データとしても用いる。

(6) サブシステムの安定判別 (略して, SST: Subsystem Stability Tester)

サブシステムの安定性評価のために, 固有値計算を行い, CRT表示上でガウス平面にプロットする。全体系の安定性については, 非線形特性を許しているので単純に固有値計算から判定せず, 動特性シミュレーションによって外乱特性を含めて総合的に行うことにする。

(7) シミュレーション結果の編集と出力 (略して, EDT: EDITION & OUTPUT)

(5)のシミュレーションの結果得られた多数のシミュレーション結果ファイルから時系列データを取り出し, プリンタ, CRT表示, プロッタから1つを選択し出力する。設計者はCRT表示により制御系パラメータの設定, 全体系の安定性, 外乱特性などの検討を進めることができる。

3. CADの計算プログラム

制御系設計・評価用CADシステムは基本的に大型計算機の端末利用で対話形式のTSO (Time Sharing Option)により使用することを前提に開発したが、バッチ処理も可能な様にプログラムと入出力の工夫をしてある。以下には2章で概略述べた7つのサブプログラムの内容およびこれらを統括するメインプログラムとデータ管理について述べる。

3.1 メインプログラム

2章で述べた7つのサブプログラムには、それぞれ独立に実行するためのプログラムを用意してある。このプログラムを使用すれば必要なサブプログラムのみを呼び出して実行することができ、メモリーの節約が可能である。メモリーの小さいミニコンピュータを用いるときに、これが必要となる。しかしメモリーとして少くとも600 Kバイトが確保できれば、対象システムの記述からシミュレーション結果の編集まで一連の処理を制御するメインプログラム (MATHER) が利用できる。すなわちグラフィック・ディスプレイ上に次の表示が表われる。

```

M A T H E R : SUPERVISOR OF SIMULATION PROGRAM.
VERSION 1.00
COMMAND   :          PROGRAM NAME
  SSD     :  SUBSYSTEM DESCRIPTOR.
  CSD     :  CONTROL SYSTEM DESCRIPTOR.
  UFD     :  USER FUNCION DESCRIPTOR.
  TSC     :  TOTAL SYSTEM CONNECTION ( CONSTRUCTION )
  SIM     :  SIMULATOR.
  EDT     :  EDITOR.
  SST     :  SUBSYSTEM STABILITY TESTER.
  END     :  END.

```

ついでディスプレイに # PLEASE SELECT COMMAND ? と表示されるので、必要なサブプログラムを SSD, CSD, …… とかで指定して呼び出し実行する。サブシステムの実行が終ると、再びメインプログラムに戻る。

3.2 サブシステムと制御系サブシステムの定義

制御系を含めてサブシステムの記述は状態変数モデルによって行い、サブシステムと全体系の作成を統一的に扱う様にする。すなわち、サブシステムは内部状態変数 $x_i(t)$ (n_i 次元のベクトル) を媒介として、操作変数 $u_i(t)$ (r_i 次元のベクトル) と出力変数 $y_i(t)$ (m_i 次元のベクトル) により完全に記述される。この場合線形連続系の状態変数モデルは次の様になる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} &= A_i \cdot x_i + B_i \cdot u_i \\ y_i &= C_i \cdot x_i \end{aligned} \right\} (3.1)$$

(3.1) 式において、出力方程式の一般式は操作変数の瞬時効果を取り入れて $y = Cx + Du$ となるが、多くの場合 $D=0$ となるのでメモリーの節約を考え (3.1) 式の様にした。また必要ならば $D \neq 0$ の場合の変更は容易に可能で動特性において本質的なものでない。(3.1) 式の記述から、サブシステムは x_i , u_i , y_i のそれぞれの次元 n_i , r_i , m_i とベクトル値、およびシステム行列 A_i , 制御伝達行列 B_i , 出力行列 C_i によって表わされる。そこで、それぞれの次元とサブシステムの行列 A_i , B_i , C_i を次の順序で入力し、全サブシステムと制御系の定義を完成する。

- (1) サブシステム定義ファイルの作成・修正、離散化モデル作成のオプションを選択する。
- (2) サブシステム指定のため ID NO. を入力 (IDS) する。
- (3) (2) で指定したサブシステム 'IDS' における状態変数ベクトル、操作変数ベクトルおよび出力ベクトルのそれぞれの次元 IN, IR, IM を入力する。
- (4) システム行列 A (IN, IN) を入力する。
- (5) 制御伝達行列 B (IN, IR) を入力する。
- (6) 出力行列 C (IM, IN) を入力する。
- (7) (2) から (7) の操作をサブシステムの数だけ繰返す。

サブシステム定義ファイルの修正・追加・削除とチェックのための表示には、それぞれの場合に対応できる様に対話型プログラムを工夫してある。

3.3 離散時間動特性モデルの自動作成

比較的大きなサンプリング時間 Δt に対して適用可能な離散時間モデル作成法をすでに開発してあるので、その方法を利用して (3.1) 式の線形連続系モデルに対し離散時間モデルを自動作成する。離散時間モデルは各サブシステムごとに求める。(3.1) 式の離散時間モデルの表示はサブシステムの指数 i を本来は付けるべきであるが、簡略のために指数を省略して次の様に表わす。

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= Fx_k + Gu_k \\ y_k &= Cx_k \end{aligned} \right\} (3.2)$$

ここで x_k などの表示は時刻 $k\Delta t$ における $x(t)$ などの値である。

(3.2) 式は時刻 $t = (k+1)\Delta t$ の状態が Δt 前の状態から操作入力 $u(t)$ を受けていかかわるかを表わす。 $u(t)$ の時間区間 $[k\Delta t, (k+1)\Delta t]$ の変動が比較的緩く一定値 u_k で近似できる場合には、行列 F , G の解析的な表現は次式となる。

$$F = e^{A\Delta t} \quad (3.3)$$

$$G = \int_0^{\Delta t} e^{A t} dt \cdot B \quad (3.4)$$

つぎに離散時間モデル作成のアルゴリズムの概要を述べる。モデル作成のため(3.3)(3.4)式を近似する必要があるが、その基本計算にPadé近似を用いる。ここではPadé近似を与えられたサンプリング時間 Δt に対して直接用いるのではなく、計算精度を所定の範囲内にするために、システム行列、誤差限界、Padé次数によって定まる誤差評価式によって Δt を縮小し、その時間幅 Δt_1 に対してPadé近似を用いる。つぎに、 Δt_1 で作成された離散時間モデルを拡大して求めるモデルを得る。2次式のPadé近似式と誤差式を示せば次の様になる。

$$F_2 = \left[I - \frac{\Delta t_1}{2} A + \frac{(\Delta t_1)^2}{12} A^2 \right]^{-1} \left\{ I - \frac{\Delta t_1}{2} A + \frac{(\Delta t_1)^2}{12} A^2 \right\} \quad (3.5)$$

$$G_2 = \left[I - \frac{\Delta t_1}{2} A + \frac{(\Delta t_1)^2}{12} A^2 \right]^{-1} \Delta t B \quad (3.6)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{720} (\Delta t_1)^5 (\|A\|)^5 \quad (3.7)$$

Padé近似の次数選択では(3.7)式が示す誤差式を考慮し、2次式以上を使用する。さらに本CADシステムでは、一度きりの離散時間モデル作成に4次近似を、また区間線形化などの処理のために何回もモデル作成が必要なときには計算量節約のため2次近似を用いることを標準にした。

連続系のシミュレーション言語として、IBM社のCSMP (Continuous System Modeling Program), CSSL-IV (Continuous System Language) などが開発されているが、それらにおいては動特性シミュレーションを微分方程式の直接積分で処理しており、離散時間モデル作成は行わない。そして積分は、数種のRunge-Kutta法からEuler法まで用意しており、動的システムの特性和計算時間などに応じて適当に選択する。本CADシステムで用いている上記のPadé近似と一般に用いられているRunge-Kutta法と比較すると、基本的には同等の近似法であるといえるが、時間幅の縮小・拡大の方法を使用しているため離散時間モデルはRunge-Kutta法より相当大きな時間幅まで有効である。この反面、非線形系の取り扱いにおいて、Runge-Kutta法はそのまま有効であるが、Padé近似利用では区間線形化の手法等の少々面倒な扱いが必要になる。

3.4 特性関数の種類と設定法

プラント動特性のシミュレーションにおいて、目標値と外乱に対してステップ、ランプ、不規則信号などの外部入力、また非線形要素のシミュレーションに対しリレー、ヒステリシスなどの非線形特性関数が必要である。そのためTable 1に示す様な16種の特性関数を用意した。必要に応じてさらに特性関数を増やすことができる。1つの特性関数はそのパラメータの設定を固定して何回でも上記外部入力と非線形特性関数に利用される。特性関数の設定は次の様にして行う。

- (1) 特性関数定義ファイルの作成、修正、チェックプリントのオプションを選択する。
- (2) 使用するユーザー関数のID NO.を入力(IDF)する。IDFは101から200を使用し、

Table 1 User Function List

USER FUNCTION LIST				
TYPE NO.	FUNCTION	INPUT	OUTPUT	PARAMETERS
1	OUTPUT SWITCH	2	2	0
2	MULTIPLE STEP DELAY	1	1	2
3	ZERO ORDER HOLD	2	1	0
4	COMPARATOR	2	1	0
5	FUNCTION SWITCH	4	1	0
6	INPUT SWITCH	3	1	0
7	LIMITER	1	1	2
8	QUANTIZER	1	1	1
9	DEAD SPACE	1	1	2
10	STEP FUNCTION	0	1	1
11	LAMP FUNCTION	0	1	1
12	PULSE GENERAOR	0	1	3
13	ONE SHOT PULSE	0	1	2
14	RANDOM NOISE	0	1	2
15	HARMONIC FUNCTION	0	1	3
16	RECTANGULAR CURVE	0	1	7
17	UNDEFINE	0	0	0
18	UNDEFINE	0	0	0
19	UNDEFINE	0	0	0
20	UNDEFINE	0	0	0

サブシステムの番号などと区別する。

(3) ユーザ関数として用いる特性関数のタイプ番号 (NTYPE) を入力する。

(4) ついで、指定した特性関数に必要なパラメータを入力する。

以上の操作により、ユーザー関数 ID NO. = n に特性関数 TYPE NO. = m が使用され、パラメータの指定により関数が固定する。(1)~(4) の操作はプラント動特性シミュレーションで使用される外部入力と非線形特性関数の数だけ繰返し行う。

3.5 全体系の結合方法

全体系の動特性モデルはサブシステム、制御系サブシステム、特性関数すべての入出力関数を指定することにより完成する。サブシステムと制御系サブシステムはともに状態変数の記述であるので、それぞれの入力と出力は操作変数、出力変数の形のベクトル量である。また外部入力や非線形特性を表わす特性関数は動特性を含まず、多入力に対し1または2の出力の形である。そこで結合の仕方を指定するために、サブシステム、制御系、特性関数のそれぞれの操作変数または入力変数に着目し、それらの変数の各成分が結合しているサブシステム、制御系、または特性関数の出力変数の成分を定める。

Fig.2 の例で結合の仕方の設定法を説明する。サブシステム3の操作変数の第2成分 $U^3(2)$ は自分自身の出力変数の第5成分 $Y^3(5)$ に -0.2 倍したもの、ユーザ関数 101 の出力 $Y^{101}(1)$ に6倍したもの、さらに定数 (一定の目標値入力) 20 の3つの入力から構成されている。従って

$$U^3(2) = -0.2 \cdot Y^3(5) + 6 \cdot Y^{101}(1) + 20 \quad (3.8)$$

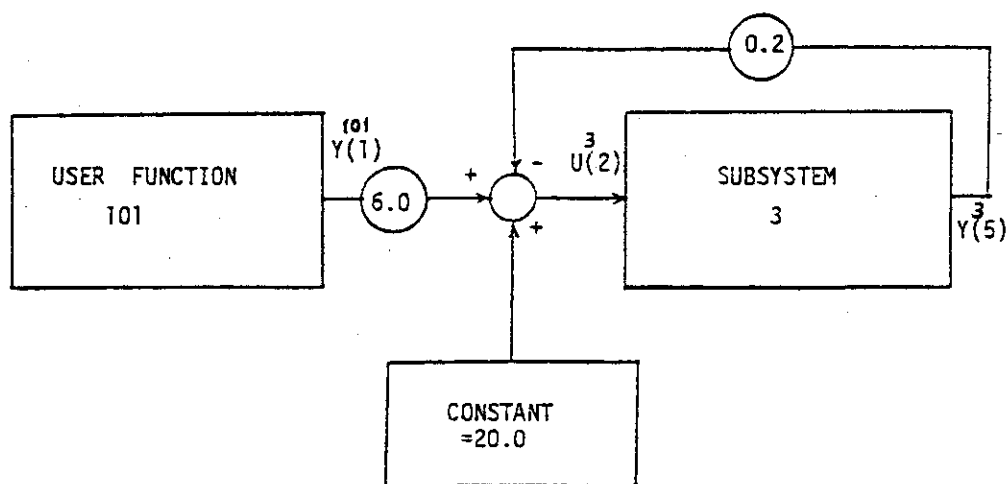


Fig.2 Example of a System for Explaining the Total System Connection.

と表示される。この場合の結合指定のための入力は次の様に与える。JS, JY をそれぞれサブシステムの番号と出力変数の成分番号またFAを定数倍の係数とすると、次のようにする。

$$\left. \begin{aligned}
 JS = 3, \quad JY = 5, \quad FA = -0.2 \\
 JS = 101, \quad JY = 1, \quad FA = 6.0 \\
 JS = 0, \quad FA = 20.0
 \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

全体系を作成するための結合指定データ(3.9)式はその一例)はコネクションファイルに保存し、ファイルの修正や結合のチェックのための出力に利用する。ファイルの作成・修正・チェックプリントは対話型プログラムにより容易に実行される。Table 2に全体系の結合状態を表わすチェックプリントの例を挙げる。

Table 2 Example of Summary of Total System Connection.

.....SUMMARY OF THE TOTAL SYSTEM CONNECTION

NO.	- INPUT -		- OUTPUT -		FACTOR
	SYSTEM ID.	VAR. NO.	SYSTEM ID.	VAR. NO.	
(NCON)	(IS)	(IU)	(JS)	(JY)	(FA)
1	1	1	2	1	1.0000
1		1	101	1	0.20000 E - 01
2	2	1	-1	1	1.0000
2		1	-1		
3		2	3	1	0.52500
3		2	4	1	0.52500
3		2	-1		
4	3	1	2	2	0.98500
4		1	-1		
5		2	0		0.0
5		2	-1		
6	4	1	2	2	0.98500
6		1	-1		
7		2	0		0.0
7		2	-1		
8	101	NOTHING			

3.6 シミュレーション

制御系の設計に際しては特性評価を各種の外乱や目標値変更の動特性シミュレーションの結果を見ながら行うので、多数回の高速のシミュレーションが必要である。シミュレーション結果の保存・編集方法は次節で述べることとし、ここでは効率的なシミュレーション方法を述べる。シミュレーションはこれまで定義してきたファイルを用い、また新たにシミュレーション結果ファイルを設定した後に実施される。その手順は次の様にまとめられる。

- (1) 全体系を結合するコネクションファイルのNO.を入力する。(動特性モデルを保存するSSD, CSD, UFDの各ファイルは自動的にアクセスされる)
- (2) 初期値を与えるシミュレーション結果ファイルのNO. (M2)を指定する。M2=0ならば再起動せずにすべて状態変数の初期値を零に設定する。またM>0のときには再起動を開始する時間ステップ番号(NST1)をさらに入力する。
- (3) シミュレーション結果を保存するファイルNO. (M3)を入力する。
- (4) シミュレーション結果ファイル(M3)のタイトルを80文字以内で入力する。
- (5) ファイルM3に出力するサブシステム、制御系サブシステム、特性関数のID NO. (LSYS)を指定する。
- (6) ファイルM3に出力する変数(LVAL)を指定する。
- (7) ファイルM3に出力する時間ステップ間隔(LSTP)を指定する。
- (8) シミュレーションを実行するステップ数(LGO)を入力する。
- (9) 終了処理(LEND)を選択し、停止、再起動、ファイル出力の時間ステップの変更に行う。

3.7 サブシステムの安定性評価

原子炉プラントを動特性の観点からいくつかのサブシステムに分解して、サブシステム毎に妥当な動特性モデルを作成し、それらを結合して全体系を構成する。従ってまずサブシステムの動特性評価を十分に行い、妥当な動特性モデルを得る必要がある。そのための一助としてサブシステムのシステム行列の固有値計算から安定性を評価するサブプログラムを設けた。前に指摘した様に全体系の安定性評価は特性関数を含む非線形特性と次元の大きさから固有値計算により直接行うことは数値計算上の問題が生じるので、代わりに、動特性シミュレーションの結果から、外乱やプラントの非線形性・パラメータ変動などを考慮して総合的に行う。

システム行列の固有値計算は大型計算機の科学用サブルーチンとして通常用意してある2段QR法を用い、状態変数の次元(ここでは30次以下に制限している)の数だけすべて計算する。その計算結果は安定性の悪い順に並べかえられ、数値の形またはグラフィックディスプレイのガウス平面上のプロットとして出力される。固有値計算は連続系、離散時間系とも、それぞれの状態方程式のシステム行列を用いて実行できる。しかし離散時間系の固有値は一般に馴染みが薄く、安定性を検討するためには直感的でないので、対応する連続系の固有値に変換したのもも表示する様にした。それには離散時間系の固有値を $\rho = a + jb$ ($j = \sqrt{-1}$)に、また連続系の固有値

を $\lambda = \alpha + j\beta$ にしたとき、次の関係式 (Δt : サンプリング時間)

$$\rho = e^{\lambda \Delta t} = e^{\alpha \Delta t} \cos \beta \Delta t + j e^{\alpha \Delta t} \sin \beta \Delta t \quad (3.10)$$

を用いて、次式から α , β を決定する。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \log(a^2 + b^2) / \Delta t \\ \beta &= \left(\tan^{-1} \frac{b}{a} \right) / \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

3.8 シミュレーション結果の編集

サブプログラム SIM の実行の結果作成されたシミュレーション結果のファイルは利用者が比較・検討のために利用しやすい形式に編集し、出力する必要がある。そのため次の様な機能をサブプログラム EDIT にもたせた。

(1) データのエントリー

出力したい時系列データの所在を与え、それをサブプログラム EDIT の対象データとして取り出す。(これはオプション 0 で実行する。)

(2) データの結合

エントリーしたデータのいくつかをまとめて 1 つの時系列データとして結合し、新たな時系列データとしてエントリーすることができる。これは動特性シミュレーションのランをいくつかに分割し、再起動して得たデータを 1 つの時系列データとして編集することである。(オプション 1 で実行する。)

(3) データの出力

エントリーが終った各時系列データはエントリーの行われた順にデータ番号が定まり、出力としてプリンター、プリンタープロット、グラフィックディスプレイ(プロッタ)をそれぞれオプション 2, 3, 4 で選択し、各種の応答曲線等を表示する。

計算機のメモリーの節約から次の様な制約をおいている。

- エントリーできる時系列データの数は最大 30 個とする。
- 時系列データの長さは最大 2000 時間ステップとする。
- 異なった時間軸のデータは最大 5 個とする。

3.9 データ管理

本 CAD システムでは 7 個のサブプログラム間のデータ・コミュニケーションが重要であり、各プログラムの入出力データは特定の構造をもった保存ファイルを使用する。Table 3 に示す様に、各サブプログラム間のデータ・コミュニケーションとして 6 個のタイプのバイナリ・ファイル (FORMAT なしの Read / Write) と、出力ファイルとしてプロッタ用のファイルとバッチ処理用のワークファイルが必要である。これらのファイルを使用す

ることによりグラフィックディスプレイへの出力，ファイルの修正・追加が容易になり，対話型CADシステムを使い易いものになっている。

Table 3 Data File List

DD名の制約 (DDNAME)	レコード形式 (RECFM)	レコード表 ^{*1} (LRECL)	ブロックサイズ ^{*1} (BLKSIZE)	内 容 (CONTENTS)
FT09F001 固定	FB	80	(例) 4000	バッチ形式 ワークファイル用
FT30F001 固定	VS	484	(例) 488	プロッター・ファイル用
FTnnF001 ^{*2}	VS又はVBS	—	—	コミュニケーションファイル・タイプ I (SSDファイル)
FTnnF001 ^{*2}	"	—	—	" II (SSDファイル)
FTnnF001 ^{*2}	"	—	—	" III (UFDファイル)
FTnnF001 ^{*2}	"	—	—	" IV (CSDファイル)
FTnnF001 ^{*2}	"	—	—	" V (TSCファイル)
FTnnF001 ^{*2}	"	—	—	" VI (SIMファイル)

* 1 格納されている計算機システムで効率の良い値でよい

* 2 nnは5, 6, 9, 30以外で1~99までのもの

4. 原子炉プラントへの適用例

開発したCADシステムの各種サブプログラムをテストするために、簡易なBWRプラントモデルと多目的高温ガス実験（VHTR）のモデルに適用して動特性シミュレーション等を実施し、対話型システムの使いやすさ、動特性シミュレーション方法の妥当性、グラフィック表示法の良さ等について検討した。その結果、いくつかの改良点が浮び上がってきたものの、基本的には十分制御系設計・検討に利用できることが分った。

4.1 BWR の圧力制御系評価

(1) BWR プラントの状態変数動特性モデルと圧力制御系

BWRプラントとしてFig. 3に示すJPDR-II（Japan Power Demonstration Reactor-II）を用いた。JPDR-IIは強制循環式沸騰水型の定格出力90MWの原子炉で、

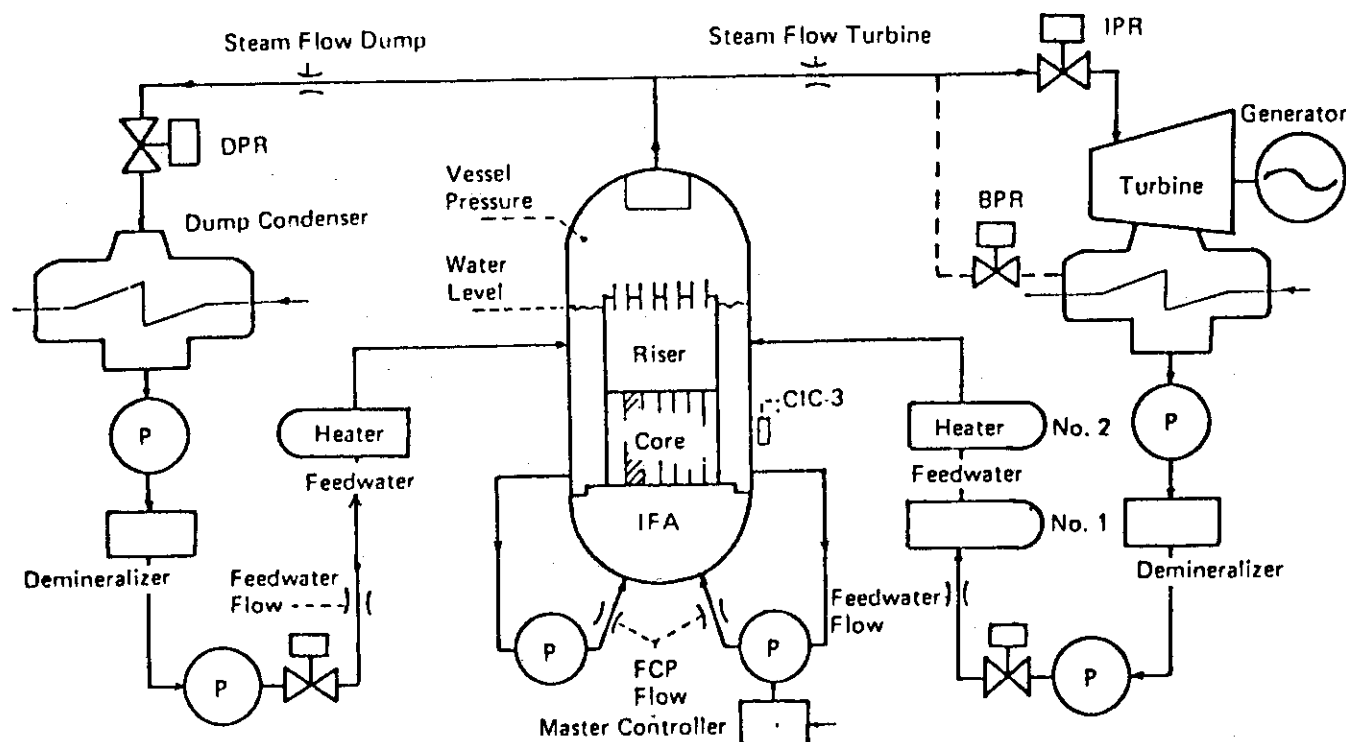


Fig. 3 Schematic Diagram of JPDR-II Plant

図に示す様に出力の50%ずつがそれぞれタービンとダンプコンデンサーに送られる。このプラントの状態変数動特性モデルは動特性解析コードJPDYN-M⁹⁾及び実測データの検討を経て既に作成してあり、ここではそれを用いる。この動特性モデルは1つの出力状態のも

ので線形化した状態変数モデルであり、15個の内部状態変数と4個の操作変数によって記述される。内部状態変数は中性子束 N 、遅発中性子束 C 、燃料平均温度 T_f 、被覆管平均温度 T_c 、炉心平均ボイド率 R_g 、炉心チャンネル出口クオリティ X_c 、ライザ平均ボイド率 R_{gr} 、ライザ出口クオリティ X_r 、原子炉圧力 P 、ベッセル飽和水体積 V_v 、ダウンカマー水位 H_m 、再循環流量 W_o 、炉心入口エントロピ h_{in} 、タービン系給水流量 W_{ft} 、ダンプコンデンサ系流量 W_{fd} である。また操作変数は外部反応度 ρ_{rod} 、再循環ポンプ揚程 P_p 、タービン系バルブ開度 V_{st} 、ダンプコンデンサ系バルブ開度 V_{sd} である。定格出力における状態変数モデルは出力変化10%以下の小幅変動に対しモデルの妥当性が示されており、制御系の検討に十分利用できる。

JPDR-IIプラントの制御系には原子炉出力制御系、蒸気圧力制御系、給水制御系がある。原子炉出力制御系では制御棒の操作による原子炉自動制御系(ACS)と再循環流量による手動の制御装置がある。蒸気圧力制御系ではタービン系の自動初圧調整器(IPR)と一次バイパス弁による自動圧力調整器(BPR)があり、またダンプコンデンサ系に自動圧力調整器(DPR)がある。給水制御系ではタービン系とダンプコンデンサ系にそれぞれ3要素(蒸気流量、給水流量、原子炉水位)による自動制御系をもち、基本的な運転モードにおいてタービン系は3要素制御系、ダンプコンデンサ系は原子炉水位を除いた2要素制御系としている。ここでは通常の運転モードに合わせて、ダンプコンデンサ系の圧力調整器による圧力制御系の動特性を模擬し、CADシステムにより特性解析を行った。そこで状態変数モデルとして給水制御系を内部に含み、原子炉出力制御とタービン系の制御をかけていない状態のものを用いた。上記の状態変数で述べればダンプコン開度 V_{sd} を用いて原子炉圧力を一定に制御する場合の制御特性の模擬を行ったことになる。

CADシステム適用するために、15次の状態変数モデルをサブシステムSS1、圧力制御系を制御系システムCS2とし、さらにはばステップ状の再循環流量の外乱を加えてFig.4の様な概略図が全体系に対して求まる。ここで圧力制御系は時定数 T (5秒)の1次系の圧力計により原子炉圧力を測定し、PI調整器を介して圧力制御を行うものとしている。圧力制御系の離散時間モデルを求めると、

$$U(4) = \frac{K_p}{1+TS} \left(1 + \frac{1}{T_i S} \right) P. \quad (4.1)$$

ここで $U(4) = V_{sd}$

この系の内部状態変数を $Z = \text{col} (Z(1), Z(2))$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} Z(1) &= P / (1+TS) \\ Z(2) &= Z(1) / (T_i S) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

$$U(4) = K_p \{ Z(1) + Z(2) \}. \quad (4.3)$$

つぎにEuler差分により離散時間モデルを求める。 k は時間ステップとする。

$$Z_{k+1} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\Delta t}{T} & 0 \\ \frac{\Delta t}{T_i} & 1 \end{pmatrix} Z_k + \begin{pmatrix} \frac{\Delta t}{T} \\ 0 \end{pmatrix} P \quad (4.4)$$

$$U_k(4) = (K_p, K_i) Z_k \quad (4.5)$$

(4.4) (4.5) 式の離散時間モデルはCS2作成の入力データとなる。ここではモデル作成においてEuler差分を用いたが、3.3章で述べた方法を用いてももちろんよい。制御系の設計・検討においてはシミュレーションに先だつてまずその構成要素である検出部、調節部、比較部、操作部を十分解析し、全体としての動特性を定める必要がある。この動特性は非線形性を含むことがあるものの通常比較的低次のモデルで近似でき、例に示した様に離散時間モデルは容易に作成できる。この様に制御系自体の考察を進めておくと、より良い特性の制御系設計に役立つ。PIDの制御系パラメータの変化は現在のところ直接入力できる様になっておらず、制御系サブシステムの動特性モデルを変更することによって行う。これは制御系パラメータをPIDのみに限定せず時定数等の変化も処理したいためである。(4.4)式で $T_i = \infty$ とすると積分動作がなくなり、Z(2)を無視した系となる。このとき(4.4)式では初期値を零として $Z_k(2) = 0$, $k = 1, 2, \dots$ となり、そのまま利用できる。すなわち制御系の構造を変更しないで、パラメータ設定により処理できる。

(2) CADシステムの使用例

圧力制御系のPI調整器パラメータ K_p , T_i のいろいろの値に対してプラント各部の時間応答曲線をCADシステムにより求める例についてCADシステムの利用の仕方を簡単に記述する。メインプログラムMATHERを介して7つのサブプログラムを動作させることにし、まずSSDプログラムによりJPDR-IIプラントの15次の状態記述モデルを入力する。そのためにSS1の次元IN, IR, IMをそれぞれ15, 4, 1とし、行列A, B, Cの順で入力を行う。出力行列Cはフィードバック制御に用いる原子炉圧力Pであるが、状態変数の監視のために出力変数として取出すのに用いても良い。つづいてサンプリング時間とPadé近似次数をそれぞれ0.5秒、4次と入力し、SS1の離散時間モデルを自動作成する。つぎにCSDプログラムを用いて(4.4) (4.5) 式のCS2状態変数制御系の離散時間モデルを K_p , T_i を1つ定めてSS1と同様に入力する。外乱として用いる再循環流量の変化はUFDプログラムにより16番の特性関数(短形関数)をUF101として、そのパラメータとともに入力する。2秒でステップ状に立ち上げるために、0.0, 2.0, 1000.*5とパラメータを与える。以上はすべてそれぞれのファイルに保存する。SS1, CS2, UF101を結合して全体系を作成するために、TSCプログラムによりFig. 4に示した結合を実現する。それにはSS1の4つの操作変数をCS2, UF101の出力に、またCS2の入力をCS1の出力に結合するためのデータを与えればよい。SS1の4つの操作変数を $U^1(1) = \rho_{rod}$, $U^1(2) = P_p$, $U^1(3) = V_{st}$, $U^1(4) = V_{sd}$ とおく。制御棒操作とタービン系バルブ動作はしないので $U^1(1) = U^1(3) = 0$ とし、再循環流量に外乱として2%変動を与えるとすると、 $U^1(2)$ をUF101に係数0.02で結合し、またダンブコンデンサ系バルブ操作により圧力を制御するので、 $U^1(4)$ をCS2の出力に結合する。

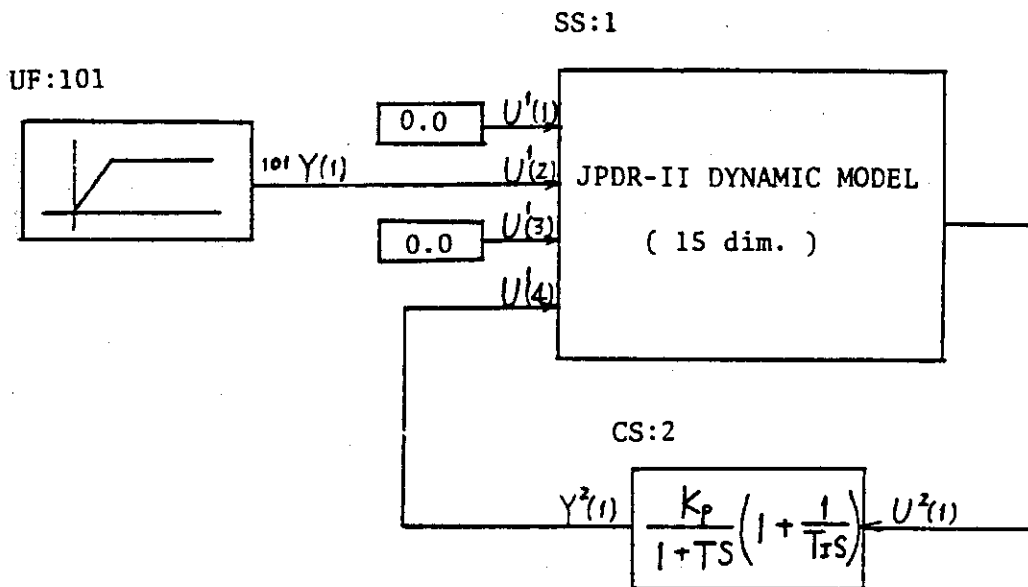


Fig. 4 Subsystem Description of Reactor Pressure Control of JPDR-II Plant

CS2 の入力は圧力を測定し使用するので $U^2(1)$ を状態変数の要素 $X^1(9) = P$ とする。

(3) 圧力制御系評価のシミュレーション結果

圧力制御系のPID調整パラメータ変化に対するBWRプラントの動特性シミュレーションをCADシステムにより実施した結果の1例を示す。外乱としては再循環流量を2%だけほぼステップ状上昇を与える。計算は圧力制御系なし、比例制御、および(比例+積分)制御の3ケースについて行い、CRT表示には中性子束(炉出力)と原子炉圧力の2つを示す。原子炉圧力は定格出力で $61.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ (277°C) であり、表示はこの値からの変化分 (kg/cm^2) である。また中性子束の表示値についても定格出力を1.0としたときの変化分である。Fig. 5は圧力制御系なしの中性子束と原子炉圧力の応答を示し、圧力は約70秒で 1.5 kg/cm^2 の最大値をとる緩やかな応答である。この圧力変動をおさえるために $K_p = 0.25$ の比例制御を行った結果をFig. 6に示す。圧力変動は $\frac{1}{5}$ 以下におさえられ、圧力ピークの時点は約12秒に移り、系全体は少し振動性をもつ。中性子束は圧力制御系が効かない4秒以内の応答はFig. 5と変わらず、速い反応度フィードバック効果が表われている。Fig. 7は圧力のオフセットを除くために、 $K_p = 0.25$ の圧力制御に加えて、 $T_i = 20$ 秒の積分制御を行った結果である。圧力のオフセットは除かれるが、系は減衰性が悪く振動的となり制御系としては望ましくない。

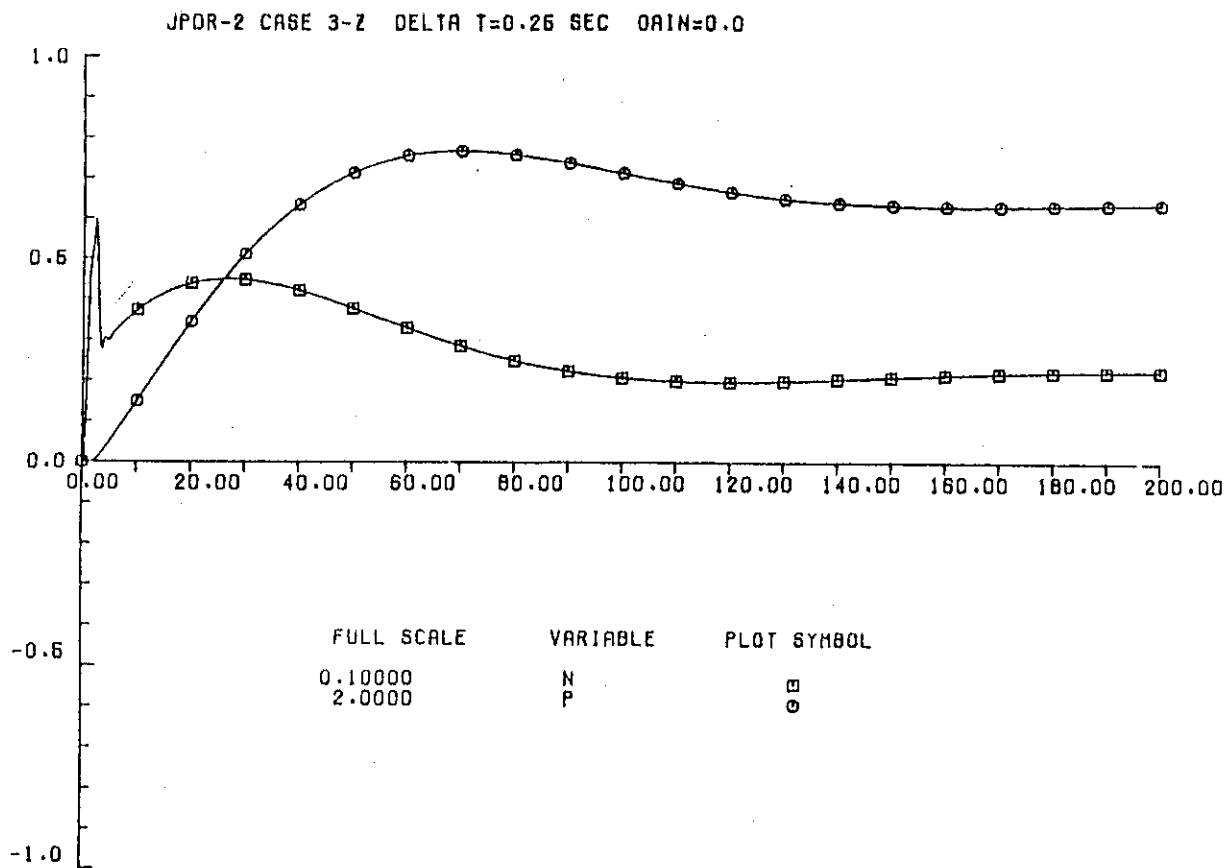


Fig. 5 Display Output Example :
 Response of Neutron Flux and Reactor Pressure
 of JPDR-II without Pressure Control to +2%
 Recirculation Flow Change (time scale:sec)

JPDR-2 CASE 3-A DELTA T=0.25 SEC GAIN=0.25

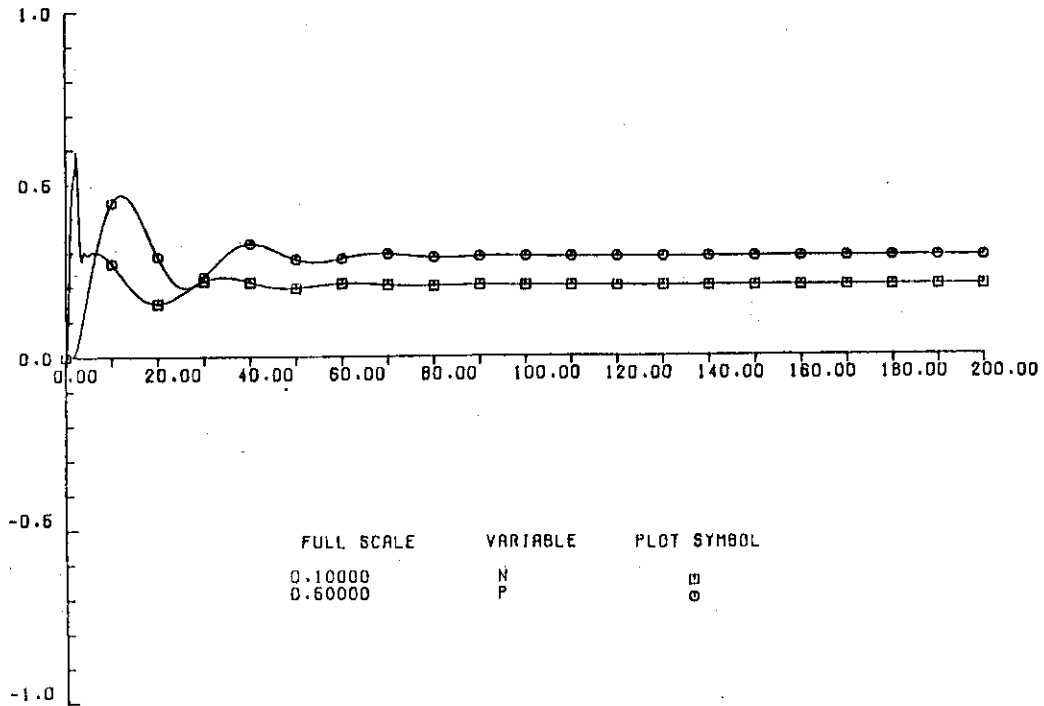


Fig. 6 Display Output Example :
 Response of Neutron Flux and Reactor Pressure of
 JPDR-II with Pressure Control of P-Action
 to +2% Recirculation Flow Change (time scale : sec)

JPDR-2 CASE 2-B DELTA T=0.5 SEC GAIN=0.25

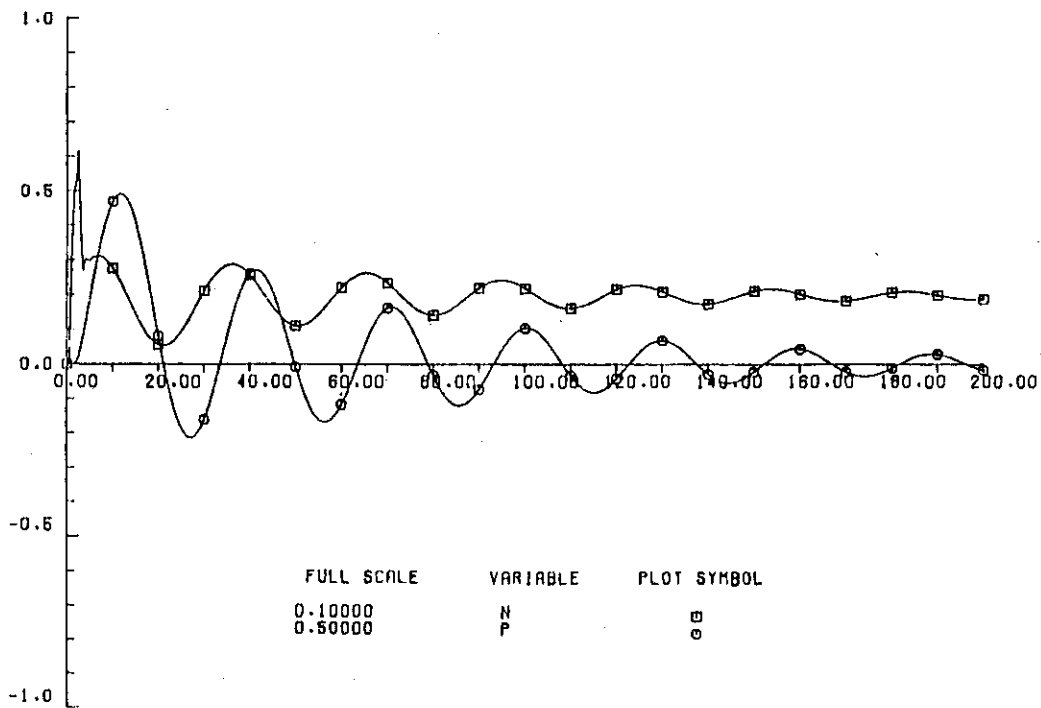


Fig. 7 Display Output Example :
 Response of Neutron Flux and Reactor Pressure of
 JPDR-II with Pressure Control of PI-Action to +2%
 Recirculation Flow Change (time scale : sec)

4.2 VHTR 動特性計算

本格的な制御系設計・検討に先だってVHTR 1次系2ループシステムの動特性シミュレーション¹⁰⁾をCADシステムの性能テストのために実施した。CADシステム利用のためのVHTR動特性モデル、入力の仕方及び反応度外乱に対する動特性シミュレーションのCRT表示結果について述べる。

(1) VHTR 動特性モデルとCADシステムへの入力

VHTR 1次系2ループの動特性モデルは、Fig. 8の概念図において全体のシステムを原子炉の核的部分、熱伝達部分、2つの中間熱交換器の4つのサブシステムに分けて、それぞれについて状態方程式タイプのモデルを考察し、全体系として動特性の調和のとれたモデルを採用した。詳細な状態方程式モデルについて*はここでは触れず、最終的に得られた動特性モデルについて以下に述べる。

原子炉熱伝達部分と中間熱交換器の動特性については分布定数系の取扱が必要であり、そのためそれぞれ冷却材の流れ方向に5分割と6分割にして求めたノード方程式を採用した。これは分割数の変化に対する動特性の妥当性とノード方程式自体の考察を経て、最小のノード数で妥当な応答を示すものとして定めた結果である。各サブシステム毎の状態変数の数は核的部分で2個、原子炉熱伝達部で24個、2つの中間熱伝達部で36個となり、合計して全体系で62個である。この系をサブシステムに分解せずに扱うとすると、62次の状態方程式に対するシステム行列は 62×62 の行列となるが、一方4つのサブシステムに分解して扱うと 2×2 、 24×24 、 18×18 、 18×18 の行列で済み、要素の個数で比較すると後者は前者の約30%となる。従って大規模システムをサブシステムで扱うことにより、計算機内部メモリの節約と動特性シミュレーション等の計算時間の短縮ができる。さらにサブシステム毎の結合の容易さからシステムの拡大・縮小が自由になるので、調整パラメータ変更等のサブシステムの変更が常に必要となる制御系の評価・検討の際に都合が良い。

Fig. 9は上記4つのサブシステムに原子炉出口温度制御系を加えた系、3つの外部入力及びそれら相互の結合状態を示す。Fig. 9をもとにサブシステムの結合状態を与え全体系の動特性モデルをCADプログラム上に作成することができる。

(2) 外乱に対する各部の応答曲線 (CRT出力)

外乱として反応度 20% をほぼステップ状に加えたときの定常状態からの応答をFig. 10～Fig. 12に示す。これらの図は対話型CADシステムを用いてCRT表示上に時間応答図として出力したものである。図の中の記号はそれぞれ次の様な意味と単位を表わす。

PW = 原子炉出力, DN = 正規化された遅発中性子濃度, TPL = 低温プレナム温度 (°C),
 TRL = 下部反射体温度 (°C), TRU = 上部反射体温度 (°C),
 TRS = 側部反射体温度 (°C), TF4 = 炉心上部から $\frac{4}{5}$ のところに
 の燃料温度 (°C),

* 多目的高温ガス炉プログレスレポート第18号 (1981) pp. 432～441

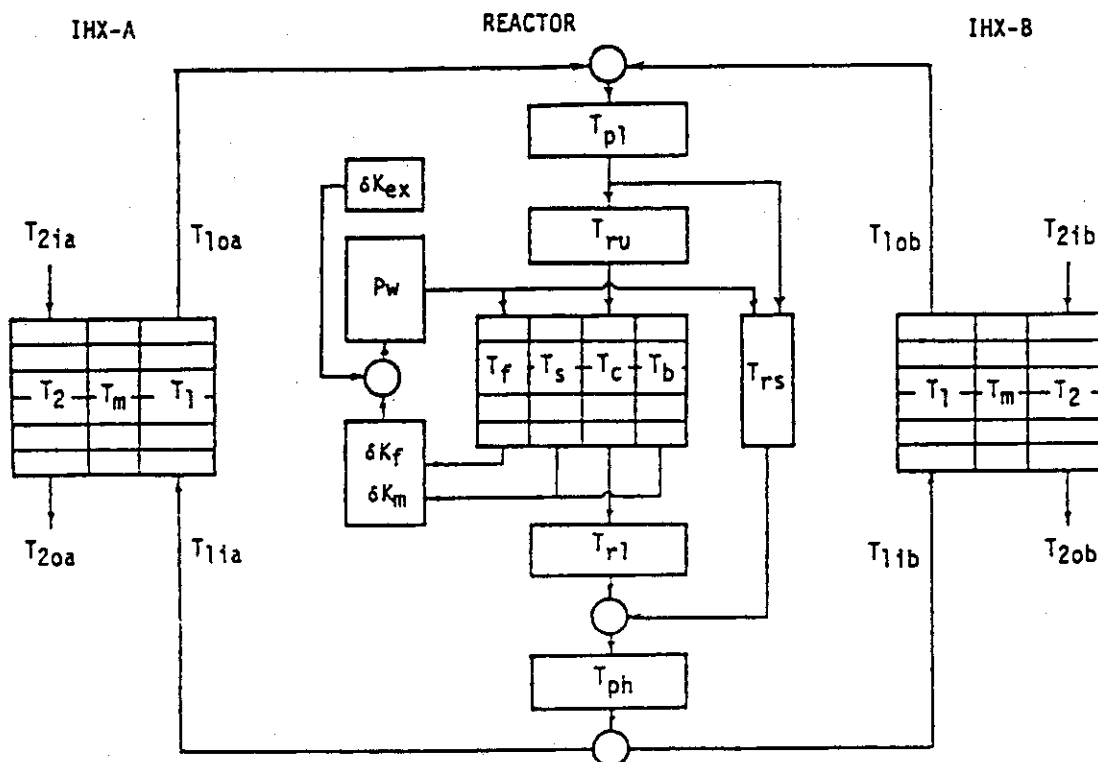


Fig. 8 Schematic diagram of the simplified simulation of primary cooling loop system of VHTR

VHTR Model

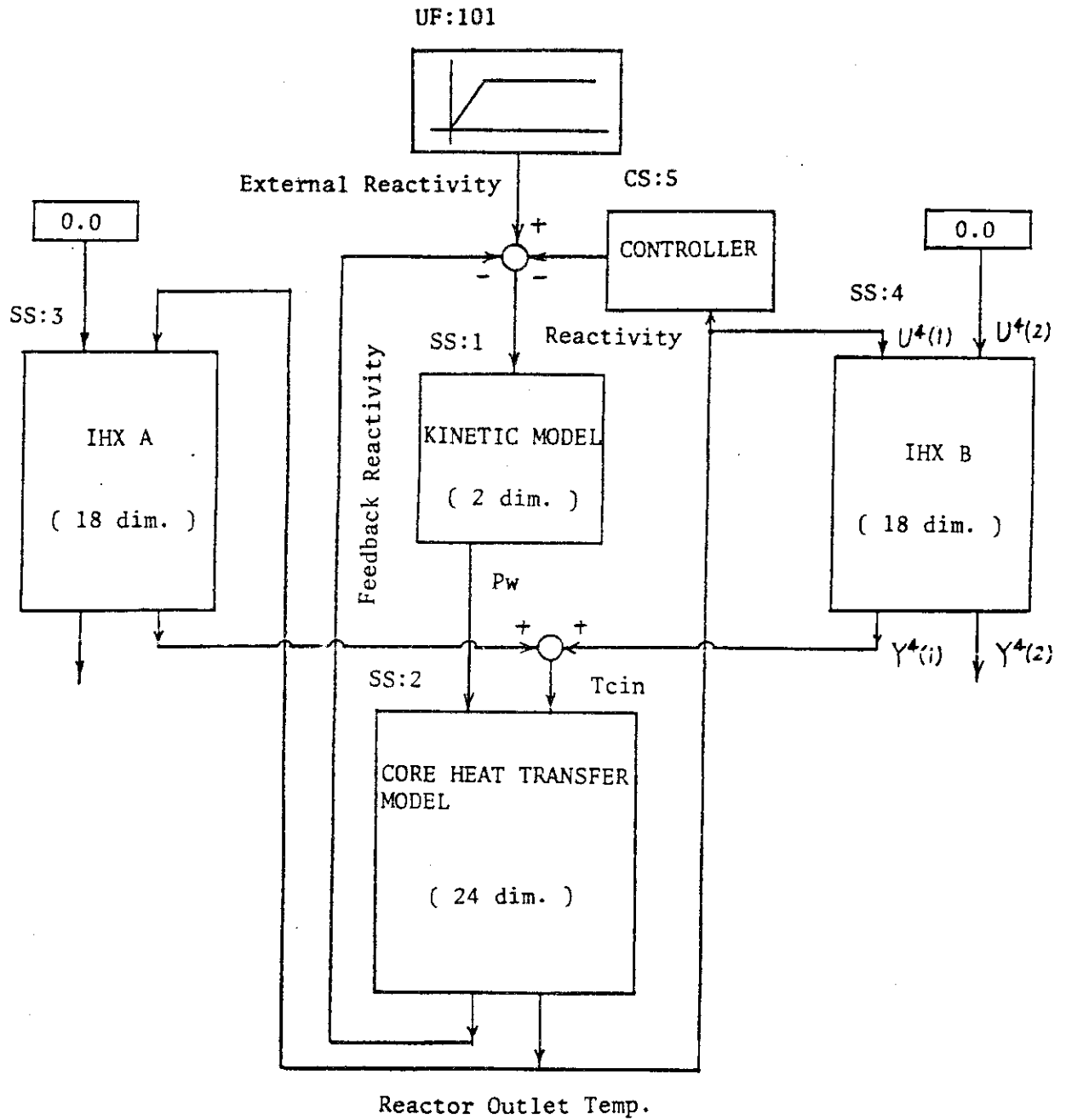


Fig. 9 Subsystem Description of Primary Cooling Loop System of VHTR for Using the CAD System

T1AO, T2AO = 中間熱交換器Aのそれぞれ1次側, 2次側の出口温度 (°C),
 T1BO, T2BO = 中間熱交換器Bのそれぞれ1次側, 2次側の出口温度 (°C)

また50MW定格出力状態における各部の温度は次に示す値を使用し, それらの平衡状態からの変化分を図示している。

PW = 1.0 (50 MW), DN = 1.0, TPL = 395 (°C), TF4 = 1044 (°C),
 T2AO = T2BO = 944 (°C), 原子炉入口温度 = 395 (°C), 原子炉出口
 温度 = 1000 (°C)

Fig. 10は反応度 20ϕ を加えたとき, 原子炉炉心まわりの出力変数の応答曲線を示す。原子炉出力と遅発中性子は反応度の変化に即応し, 冷却材炉心出温度は炉心部の特性に応じた変動を示し, 約500秒を過ぎると緩やかな変化となる。炉心の入口温度を示す低温プレナム温度は時定数の大きな黒鉛の反射体と中間交換器の特性により約200秒のむだ時間をもつ高次遅れの応答を示し, 1000秒程度では定常値にまだ整定しない。整定するまでには通常数1000秒が必要である。CADシステムを用いたこの動特性シミュレーションではサンプリング時間幅 Δt を2.5秒にとり, 1000秒間のシミュレーションを行ったが, 1ケースの計算時間はTSO使用で待ち時間が気にならない程度であった。動特性シミュレーションの演算時間は1000タイムステップ(実時間で2500秒分の計算)で1分以内に終了する。これは動特性シミュレーション手法が非常に良いことを示しており, VHTR動特性の様な時間応答の遅い系を含むシミュレーションに有効である。

Fig. 11は同じ反応度外乱に対する原子炉の内部状態変数をいくつか選んで出力したものである。燃料温度は燃料の安全性評価にとって重要な量であるが, ピーク値はこの場合 80°C の上昇を示している。制御系の評価・検討にあたって, いくつかの内部状態変数が必要になることがあり, 開発したCADシステムによって容易に実行できる。

Fig. 12は同じ反応度外乱に対する中間熱交換器の入口と出口における冷却材温度の時間応答のCRT上の表示を示したものである。Fig. 10~12の特性はVHTRのハイブリッドシミュレータの結果と良い一致を示しており, 本CADシステムに用いられている動特性シミュレーションが計算時間と精度からいって十分有効であることが示された。

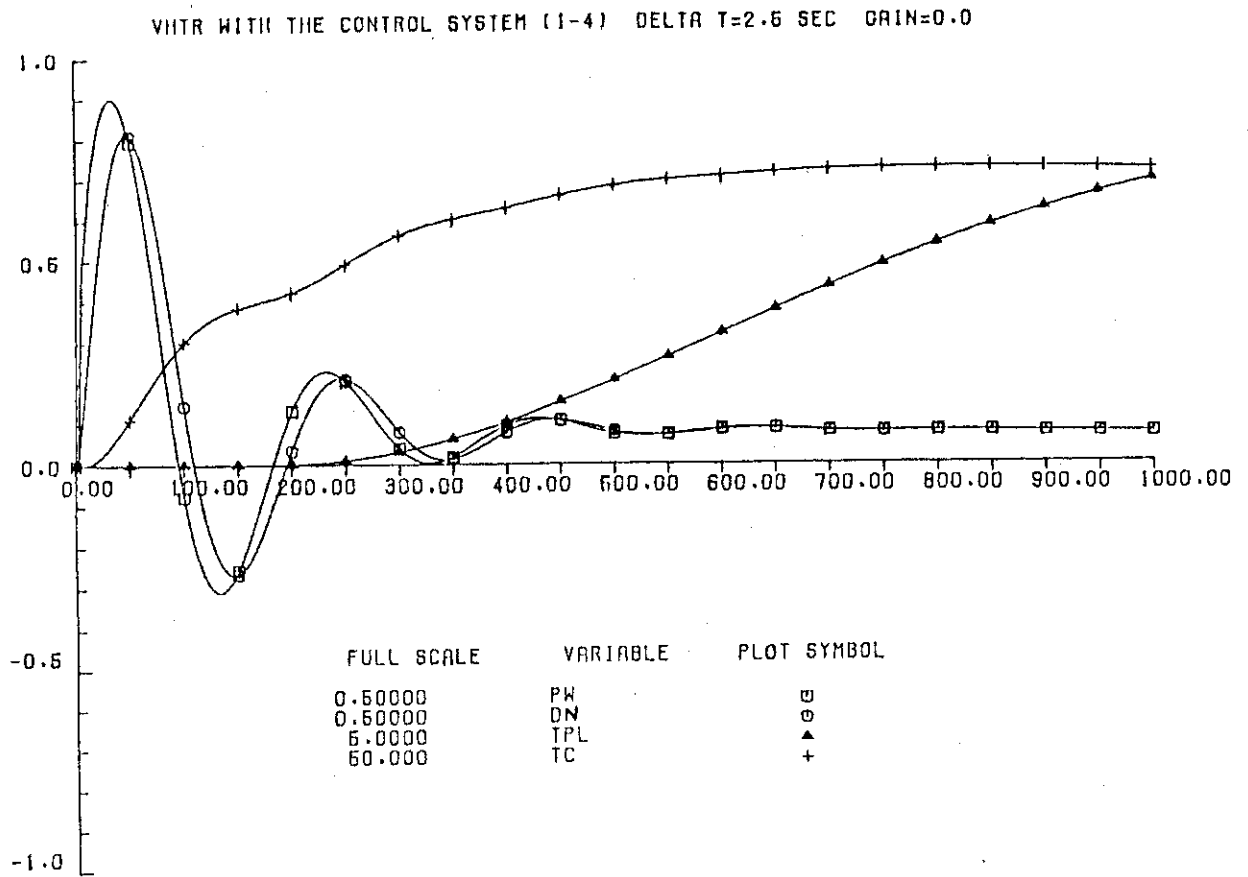


Fig. 10 Display Output Example :
 Response of Reactor Core Output Variables of
 VHTR to +20¢ Reactivity Step Change
 (time scale : sec)

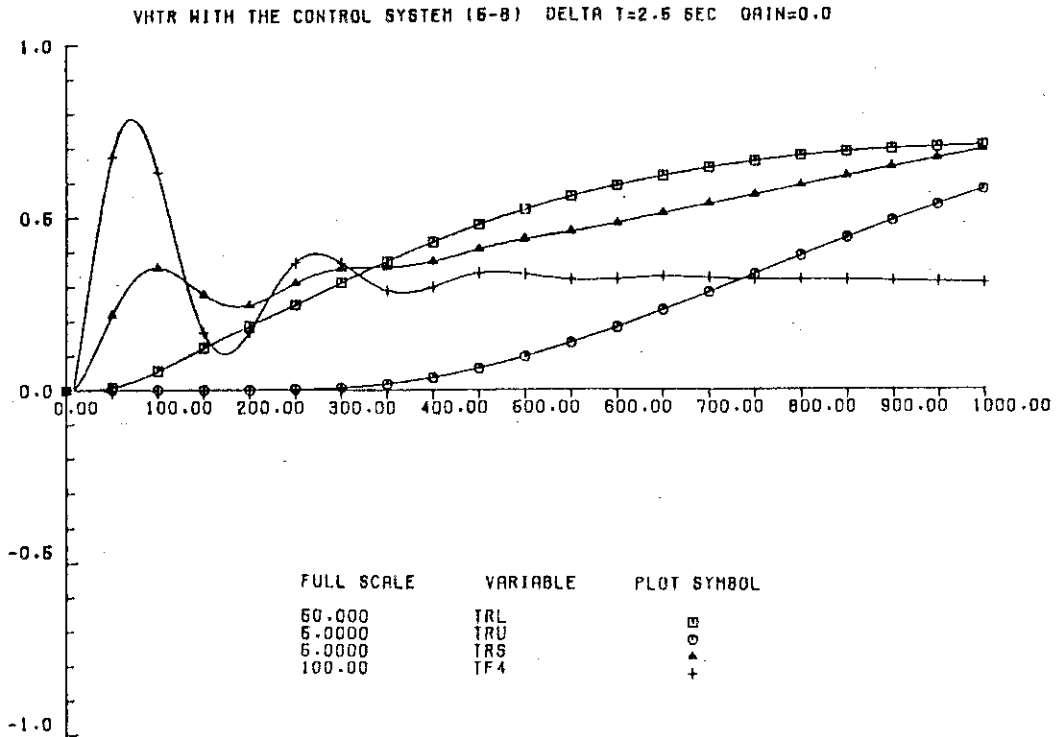


Fig. 11 Display Out put Example :
 Response of Reactor Core State Variables of
 VHTR to +20 ¢ Reactivity Step Change
 (time scale : sec)

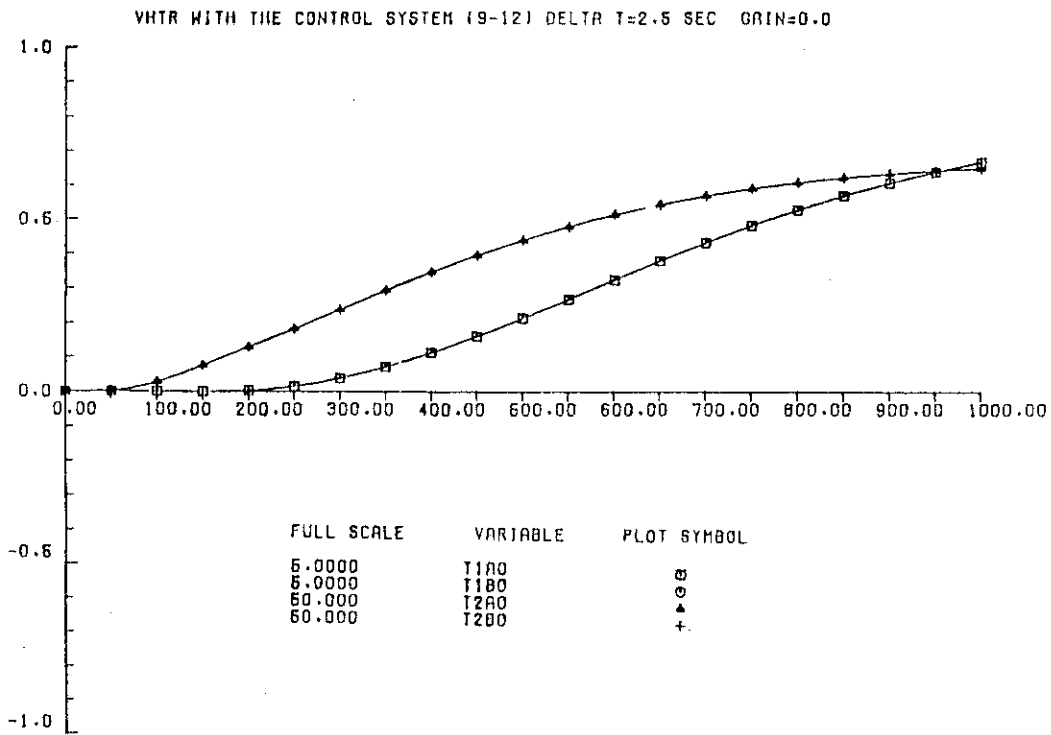


Fig. 12 Display Output Example :
 Response of IHX Input and Output Variables of
 VHTR to +20 ¢ Reactivity Step Change
 (time scale : sec)

5. 結 論

原子炉プラントの制御系設計と特性評価を能率的に行うために、計算機を利用した対話型設計システムを開発した。今回開発したCADシステムVersion 1は動特性モデルの記述、シミュレーション方法、対話方式、データ管理方式に特徴がある。動特性モデルの記述では原子炉プラントをサブシステム、制御系、外部入力等に分解してCADシステムに入力し、全体系はそれらを結合するデータにより作成される。このためサブシステムの結合が容易になりシステムの拡大・縮小が自由になり、制御系の調整パラメータ等の処理が容易になった。シミュレーションでは比較的大きな時間幅で解析が可能ないように離散時間モデルが作成されるので演算回数と内部記憶メモリーを少なくすることができた。また対話方式ならびにデータ管理方式についてはBWRの圧力制御系評価と多目的高温ガス実験炉の動特性計算の例でその有用性が示された。

今後の問題としてはこの種のCADシステムを十分使いこなして対話型システムをさらに使いやすいように改良していく一方、制御系記述に有用な伝達関数の動特性モデルの扱い、制御系設計・評価のために自動最適化プログラムの追加、非線型モデルの処理方法等の開発がある。

謝 辞

本研究において、多目的高温ガス炉の動特性データに関して原子炉工学部・原子炉制御研究室の臼井甫積氏に、JPDR-IIの動特性モデルに関して安全解析部・原子炉データ解析室の横林正雄氏に、また本CADシステムの対話プログラム作成にCRC社の市田孝之氏に多大の協力を得ました。これらの方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 木村英紀：多変数制御系のCAD，計測と制御，Vol. 15，No. 12，pp. 935～944（1976）
- (2) 古田勝久，梶原宏之：制御系のためのCAD，計測と制御，Vol. 18，No. 9，pp. 777～786（1979）
- (3) 島崎潤也：大規模システムを対象とする動特性と制御のための計算プログラム，第4回システム・シンポジウム，計測自動制御学会（1978）
- (4) 高橋安人：マイクロコンピュータによる制御計算，計測と制御，Vol. 21，No. 6（1982）
- (5) 高橋安人：“システムと制御 第2版 上，下”，岩波書店（1978）

5. 結 論

原子炉プラントの制御系設計と特性評価を能率的に行うために、計算機を利用した対話型設計システムを開発した。今回開発したCADシステムVersion 1は動特性モデルの記述、シミュレーション方法、対話方式、データ管理方式に特徴がある。動特性モデルの記述では原子炉プラントをサブシステム、制御系、外部入力等に分解してCADシステムに入力し、全体系はそれらを結合するデータにより作成される。このためサブシステムの結合が容易になりシステムの拡大・縮小が自由になり、制御系の調整パラメータ等の処理が容易になった。シミュレーションでは比較的大きな時間幅で解析が可能のように離散時間モデルが作成されるので演算回数と内部記憶メモリーを少なくすることができた。また対話方式ならびにデータ管理方式についてはBWRの圧力制御系評価と多目的高温ガス実験炉の動特性計算の例でその有用性が示された。

今後の問題としてはこの種のCADシステムを十分使いこなして対話型システムをさらに使いやすいように改良していく一方、制御系記述に有用な伝達関数の動特性モデルの扱い、制御系設計・評価のために自動最適化プログラムの追加、非線型モデルの処理方法等の開発がある。

謝 辞

本研究において、多目的高温ガス炉の動特性データに関して原子炉工学部・原子炉制御研究室の臼井甫積氏に、JPDR-IIの動特性モデルに関して安全解析部・原子炉データ解析室の横林正雄氏に、また本CADシステムの対話プログラム作成にCRC社の市田孝之氏に多大の協力を得ました。これらの方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 木村英紀：多変数制御系のCAD，計測と制御，Vol. 15，No. 12，pp. 935～944（1976）
- (2) 古田勝久，梶原宏之：制御系のためのCAD，計測と制御，Vol. 18，No. 9，pp. 777～786（1979）
- (3) 島崎潤也：大規模システムを対象とする動特性と制御のための計算プログラム，第4回システム・シンポジウム，計測自動制御学会（1978）
- (4) 高橋安人：マイクロコンピュータによる制御計算，計測と制御，Vol. 21，No. 6（1982）
- (5) 高橋安人：“システムと制御 第2版 上，下”，岩波書店（1978）

5. 結 論

原子炉プラントの制御系設計と特性評価を能率的に行うために、計算機を利用した対話型設計システムを開発した。今回開発したCADシステムVersion 1は動特性モデルの記述、シミュレーション方法、対話方式、データ管理方式に特徴がある。動特性モデルの記述では原子炉プラントをサブシステム、制御系、外部入力等に分解してCADシステムに入力し、全体系はそれらを結合するデータにより作成される。このためサブシステムの結合が容易になりシステムの拡大・縮小が自由になり、制御系の調整パラメータ等の処理が容易になった。シミュレーションでは比較的大きな時間幅で解析が可能のように離散時間モデルが作成されるので演算回数と内部記憶メモリーを少なくすることができた。また対話方式ならびにデータ管理方式についてはBWRの圧力制御系評価と多目的高温ガス実験炉の動特性計算の例でその有用性が示された。

今後の問題としてはこの種のCADシステムを十分使いこなして対話型システムをさらに使いやすいように改良していく一方、制御系記述に有用な伝達関数の動特性モデルの扱い、制御系設計・評価のために自動最適化プログラムの追加、非線型モデルの処理方法等の開発がある。

謝 辞

本研究において、多目的高温ガス炉の動特性データに関して原子炉工学部・原子炉制御研究室の臼井甫積氏に、JPDR-IIの動特性モデルに関して安全解析部・原子炉データ解析室の横林正雄氏に、また本CADシステムの対話プログラム作成にCRC社の市田孝之氏に多大の協力を得ました。これらの方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 木村英紀：多変数制御系のCAD，計測と制御，Vol. 15，No. 12，pp. 935～944（1976）
- (2) 古田勝久，梶原宏之：制御系のためのCAD，計測と制御，Vol. 18，No. 9，pp. 777～786（1979）
- (3) 島崎潤也：大規模システムを対象とする動特性と制御のための計算プログラム，第4回システム・シンポジウム，計測自動制御学会（1978）
- (4) 高橋安人：マイクロコンピュータによる制御計算，計測と制御，Vol. 21，No. 6（1982）
- (5) 高橋安人：“システムと制御 第2版 上，下”，岩波書店（1978）

- (6) Page, J. A. et al. : Computer Aided Control Systems Design Techniques, "Control and Dynamic Systems 11" (ed. by Leondes, C. T.) pp. 25~143 (1974)
- (7) Macfarlane, A. G. J. : A Survey of Some Recent Results in Linear Multivariable Feedback Theory, Automatica, Vol. 8, pp. 455~492 (1972)
- (8) 伊藤正美, ほか : "線形制御系の設計理論", 計測自動制御学会 (1978)
- (9) 横林正雄, ほか : JPDYN-N : JPDR-IIの動特性解析コード, JAERI-M 8010 (1978)
- (10) 臼井甫積, 工藤和彦 : 多目的高温ガス炉1次系動特性のハイブリッドシミュレーション, JAERI-M 8974 (1980)