

JAERI - M
84-203

NSRRデジタル・シミュレータの開発

1984年11月

石島 清見・稲辺 輝雄

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 Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

NSRR デジタル・シミュレータの開発

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

石島清見・稲辺輝雄

(1984年10月16日受理)

原子炉制御系を含むNSRRの動特性シミュレーションを行うために、NSRRデジタル・シミュレータを開発した。NSRRデジタル・シミュレータは、アナログ計算機と同等の機能を有するデジタル・プログラムANACOMとNSRRの動特性解析用プログラムEXCURS-NSRRを結合したものである。

ANACOMは汎用性を有するプログラムであり、他の動特性プログラムとの結合も容易である。また、ANACOMは、アナログ計算機の使用経験があれば、容易に入力データが作成できると共に、ポテンショメータの設定値等が何らの制限を受けずに自由に行えるという利点を有している。アナログ計算機特有のオーバー・フローについてもほとんど問題とならない。従って、何桁にもわたる変数の変化も許容される。

NSRRデジタル・シミュレータを用いたサンプル計算の結果、NSRRの炉特性改良に伴う原子炉制御系の変更に関し貴重な知見が得られ、NSRRデジタル・シミュレータは十分実用に耐える性能を有することが明らかとなった。

Development of the NSRR digital simulator

Kiyomi ISHIJIMA and Teruo INABE

Department of Nuclear Safety Research
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 16, 1984)

To simulate kinetics of the Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) including reactor control system, an NSRR digital simulator was developed. Digital program ANACOM which has the capability of simulating an analogue computer was developed and coupled with a kinetics code EXCURS-NSRR, which was specially designed for NSRR, to form the NSRR digital simulator.

ANACOM is a general program, and it can be easily coupled with any kinetics code. Utilization of ANACOM is very easy if one has experiences of analogue computer. It is no need to pay attention for the magnitude of setting value such as coefficient of potentiometer. Furthermore, overflow phenomenon which is one of the troublesome problems associated with the use of analogue computer scarcely occurs in ANACOM. Therefore, variables can be changed even to an order of 10^{10} .

Results of sample calculations for the modification of control system of the NSRR gave the important knowledges on the possible selection of new control system, and showed the excellent capability of the NSRR digital simulator.

Keywords: NSRR, Digital Simulator, Analogue Computer, Reactor Control, Kinetics Code

目 次

1. はじめに	1
2. NSRR デジタル・シミュレータの概要	7
2.1 概 要	7
2.2 システム構成	7
3. ANACOM の概要	12
3.1 概 要	12
3.2 ANACOM の計算モデル	12
3.2.1 ユニット・モデル	12
3.2.2 過渡計算法	18
4. EXCURS - NSRR の概要	25
4.1 概 要	25
4.2 EXCURS - NSRR の計算モデル	25
5. NSRR デジタル・シミュレータの使用法	31
5.1 ファイルおよび JCL	31
5.2 入力データ	31
5.2.1 タイトルデータ	31
5.2.2 コントロールデータ・ブロック	31
5.2.3 ANACOM データ・ブロック	33
6. ANACOM 用プロッター・ルーチンの使用法	41
7. 使用上の注意	41
7.1 実行モードに関する注意	41
7.2 初期値に関する注意	42
7.3 ANACOM 入力データ作成時の注意	42
7.4 エラー・メッセージ	43
8. サンプル計算	44
8.1 ANACOM 単独ラン	44
8.2 関数近似ユニットチェック	44
8.3 ANACOM と EXCURS - NSRR の結合ラン	45
9. ま と め	67
謝 辞	67
参考文献	67

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of NSRR digital simulator	7
2.1 Summary	7
2.2 System configuration	7
3. Outline of ANACOM	12
3.1 Summary	12
3.2 Calculational models of ANACOM	12
3.2.1 Unit models	12
3.2.2 Method of transient calculation	18
4. Outline of EXCURS-NSRR	25
4.1 Summary	25
4.2 Calculational models of EXCURS-NSRR	25
5. Method of utilization of NSRR digital simulator	31
5.1 Files and Job Control Languages	31
5.2 Input data	31
5.2.1 Title data	31
5.2.2 Control data block	31
5.2.3 ANACOM data block	33
6. Method of utilization of plotter routine for ANACOM	41
7. Cautions on utilization	41
7.1 Cautions on execution modes	41
7.2 Cautions on initial values	42
7.3 Cautions for the preparation of ANACON input data	42
7.4 Error messages	43
8. Sample calculations	44
8.1 ANACOM run	44
8.2 Check calculations of the units for approximation of function	44
8.3 ANACOM-EXCURS-NSRR coupling run	45
9. Summary	67
Acknowledgements	67
Reference	67

List of Tables

Table 1	Characteristics of the NSRR
Table 2	Units contained in ANACOM
Table 3	JCL for the run of NSRR digital simulator
Table 4	JCL for NSRR digital simulator plot routine
Table 5	Input data format
Table 6	Unit data input format
Table 7	Procedure of make-up of unit data
Table 8	List of error messages
Table 9	Input data for sample calculation No.1
Table 10	Error in sample calculation No.1
Table 11	Input data for sample calculation No.3
Table 12	EXCURS data block

List of Figures

Fig. 1	Vertical cross section of NSRR
Fig. 2	Operational core configuration
Fig. 3	Reactor power and energy release recorded in the data acquisition system for \$4.7 pulse
Fig. 4	Configuration of NSRR digital simulator
Fig. 5	Program flow of NSRR digital simulator
Fig. 6	Coupling of ANACOM and EXCURS-NSRR
Fig. 7	Program flow of ANACOM
Fig. 8	Identification of each unit and connection between them
Fig. 9	Order of calculations in algebraic equation system units
Fig. 10	Calculational model of EXCURS-NSRR
Fig. 11	Files for NSRR digital simulator
Fig. 12	Diagram for the calculation of a system of differential equations
Fig. 13	Result of sample calculation No.1 (x (t))
Fig. 14	Result of sample calculation No.1 (y (t))
Fig. 15	Curve calculated by BSSL unit
Fig. 16	Curve calculated by SPLN unit
Fig. 17	Diagram for sample calculation No.3 & 4
Fig. 18	Result of sample calculation No.3 (Reactor Power)

Fig. 19	Result of sample calculation No.3 (Reactor Power)
Fig. 20	Result of sample calculation No.3 (Core Energy Release)
Fig. 21	Result of sample calculation No.3 (Average Fuel Temp.)
Fig. 22	Result of Sample calculation No.3 (Reactivity)
Fig. 23	Result of sample calculation No.3 (Reference Signal)
Fig. 24	Result of sample calculation No.3 (Error Signal)
Fig. 25	Result of sample calculation No.3 (PID output)
Fig. 26	Result of sample calculation No.3 (Rod Velocity)
Fig. 27	Result of sample calculation No.3 (Control Rod Position)
Fig. 28	Result of sample calculation No.4 (Reactor Pwer)
Fig. 29	Result of sample calculation No.4 (Core Energy Release)
Fig. 30	Result of sample calculation No.4 (Reference Signal)
Fig. 31	Result of sample calculation No.4 (Error Signal)
Fig. 32	Result of sample calculation No.4 (Control Rod Velocity)
Fig. 33	Result of sample calculation No.4 (Control Rod Position)
Fig. 34	Result of sample calculation No.4 (Inserted Reactivity)

1. はじめに

原子炉の安全性を評価する上で、事故時における燃料の挙動を把握し、様々な条件の下で燃料棒の破損の有無や損傷の程度を詳細に究明することは重要な課題である。このため、冷却材喪失事故 (LOCA)、出力-冷却不整合事故 (PCM)、反応度事故 (RIA) 等における燃料棒の挙動が実験、解析の面から究明され、原子炉の安全評価に役立っている。これらについての研究は、炉外および炉内の双方での実験に基づいて行われているが、 UO_2 燃料の発熱条件等を考慮すると、炉内実験の方がより現実的であり、炉内実験の果す役割は重要である。この炉内実験の一つに Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) 実験がある^{(1), (2)}。

NSRR は原子炉の反応度事故時の安全性研究のため設置されたものであり、TRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor) を改造した大型のパルス炉である。原子炉は、Fig. 1 に示すようにスイミングプール型であり、炉心本体は原子炉プール下部に設置されている。NSRR の大きな特徴は、炉心中央を貫通する内径約 20cm の実験孔を有することであり、この実験孔内に実験用カプセルを挿入して試験燃料の照射が行われる。Fig. 2 に炉心の断面図を示す。炉心内には原子炉の出力制御のために制御棒 11 本 (調整棒 6 本、安全棒 2 本とパルス運転のためのトランジェント棒 3 本) が組み込まれている。パルス出力の発生は、このトランジェント棒の急速引抜きによって行われ、燃料温度の上昇に起因する中性子エネルギースペクトルの硬化現象による大きな負の温度係数によって、安全にパルス出力を制御することが可能である。Table 1 に NSRR の主要特性を、また、Fig. 3 に最大許容反応度 (4.7β) 投入時におけるパルス出力の時間履歴を示す。

現在の NSRR 炉では、300 kW 以下での定出力運転および低出力 (1 kW 以下) からのパルス運転の二つの運転様式のみが可能である。しかしながら、近い将来 NSRR において実施が予定されている燃焼の進んだ燃料を用いる実験では、高出力からのパルス運転が必要であり、また、出力のランプ上昇等反応度事故以外の多様な異常事象を模擬するためにはさらに自由度の高い原炉制御系が必要となる。このため、NSRR の炉特性改良を目的とした検討を進めている。制御系改良の主要な点は、調整棒バンク駆動の高速化 (0.72 mm/sec から約 50 mm/sec へ変更) とプログラム制御の採用である。前者は、NSRR 炉の大きな負の温度フィードバックを補償して高出力を維持するために必要であり、後者は短時間 (10 秒~数分) 内での急激な出力変動を安全かつ正確に行うために必要なものである。

これらの改良点のいずれも、他の原子炉にあまり例を見ないものであり、制御系の設計にあたっては慎重な検討が要求される。このため、制御棒駆動機構モックアップ装置を製作し、構成機器の面からの検討を行うと共に、アナログ計算機を用いた解析により、制御方式、制御系に要求される機能等に関する検討を進めてきた。しかしながら、炉特性改良後の NSRR では、通常 6 桁程度の出力変動が 10 秒前後の時間内で行われ、パルス運転を含めると、出力は約 10 桁にもわたって変動するため、アナログ計算機を用いた解析では、アナログ計算機の精度 (通常有効数字 3 桁) が大きな障害となった。また、出力変動 3 桁毎に定数の再設定が必要となり、パルス運転

を含む解析には相当の労力を費いやした。

NSRR デジタル・シミュレータは、アナログ計算機を用いた場合に生じる上記の困難を克服し、同時に物性値の温度依存性、燃料棒の除熱モデル等の導入により計算精度の向上を図ることを目的として開発したものである。NSRR デジタル・シミュレータは、アナログ計算機の機能を有する ANACOM および NSRR の動特性を計算する EXCURS - NSRR という二つのプログラムを結合したものであり、デジタル計算機の使用を前提としている。

本報告書は NSRR デジタル・シミュレータおよびプログラム ANACOM について、プログラムの概要と使用方法等について記述したものであり、動特性コード EXCURS - NSRR の詳細については別報で報告する。

Table 1 Characteristics of the NSRR

(1) <u>Reactor Type</u> :	Modified TRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor)
(2) <u>Reactor Vessel</u> :	3.6 ^m (wide) x 4.5 ^m (long) x 9 ^m (deep) open pool
(3) <u>Fuel</u> :	
Fuel type	12 wt% U-ZrH fuel
Fuel enrichment	20 wt% U-235
Clad material	Stainless steel
Fuel diameter	3.56cm
Clad diameter	3.76cm O.D.
Length of fuel section	38cm
Number of fuel rods	157 (including 8 fuel-followered control rods)
Equivalent core diameter	62cm
(4) <u>Control Rods</u> :	
Number	8 (including 2 safety rods)
Type	Fuel followed type
Poison material	Natural B ₄ C
Rod drive	Rack and pinion drive
(5) <u>Transient Rods</u> :	
Number	2 fast transient rods and 1 adjustable transient rod
Type	Air followed type
Poison material	92% enriched B ₄ C
Rod drive	Fast : Pneumatic Adjustable : Rack and pinion & Pneumatic
(6) <u>Core Performance</u> :	
a) Steady state operation	
Steady state power	300KW
b) Pulse operation	
Max. peak power	21,100MW
Max. burst energy	117MW-sec
Max. reactivity insertion	3.4% Δk (\$4.67)
Min. period	1.17 msec
Pulse width	4.4 msec (1/2 peak power)
Neutron life time	30 μsec
(7) <u>Experiment Tube</u> :	
Inside diameter	22cm

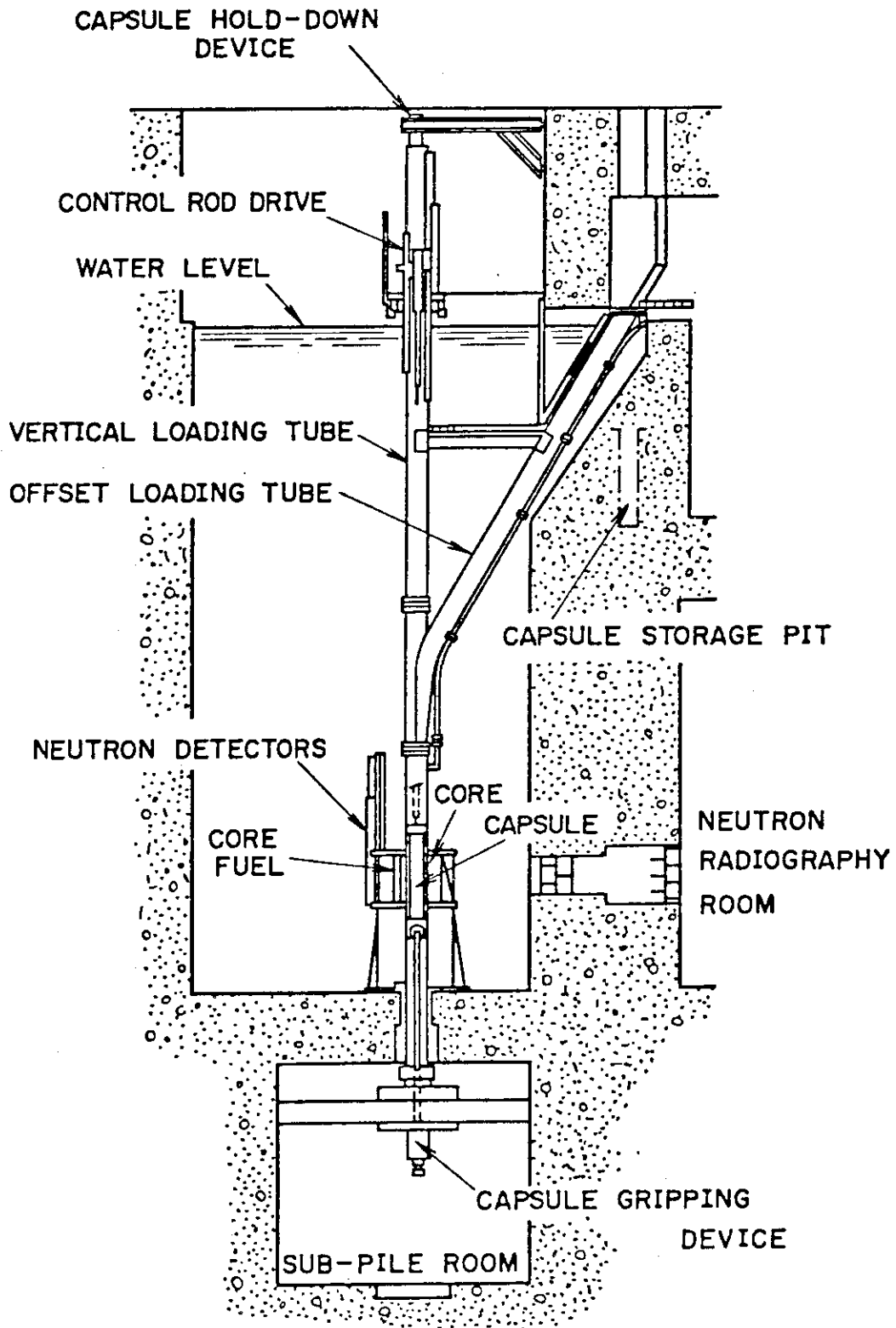


Fig. 1 Vertical cross section of the NSRR

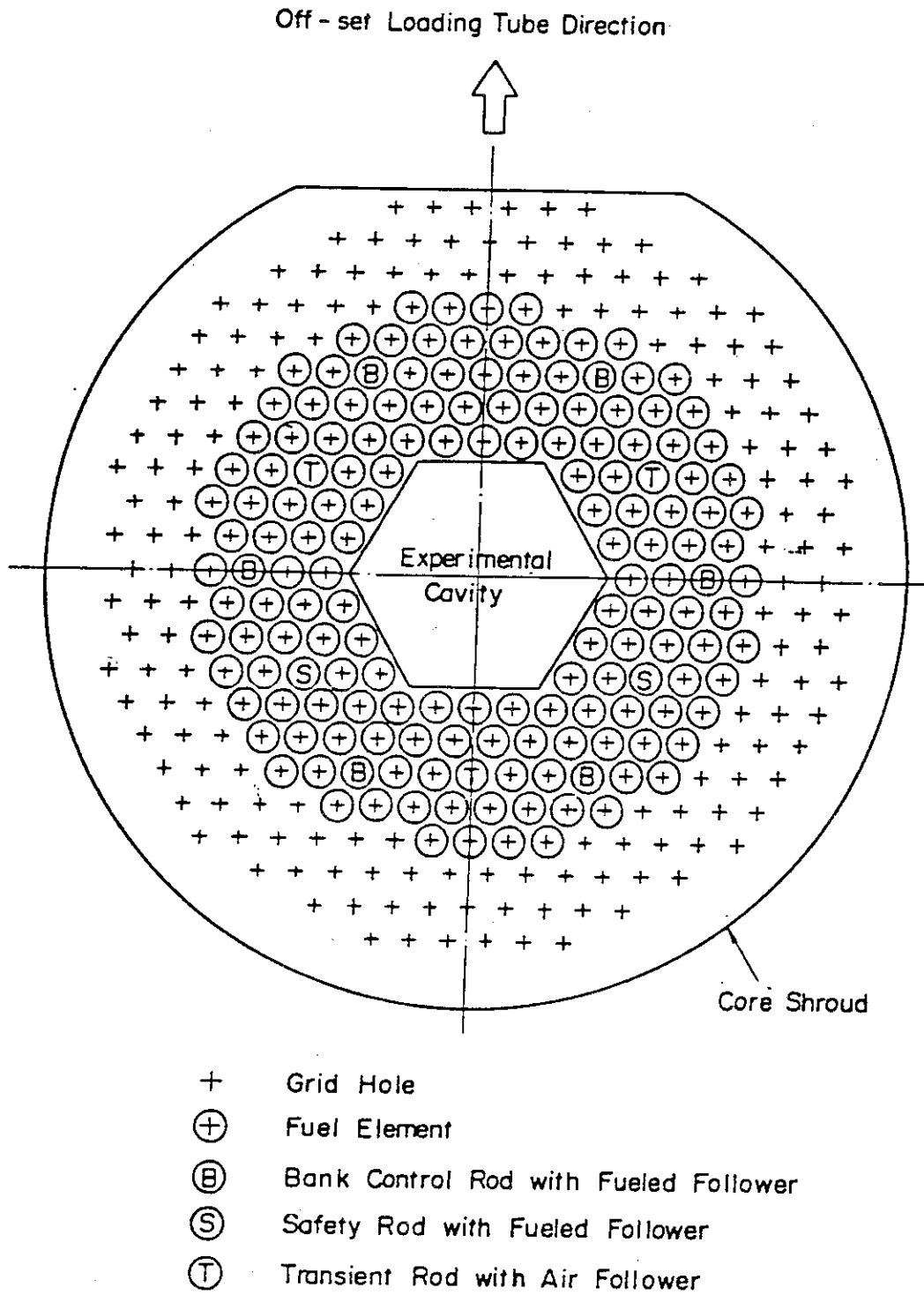


Fig. 2 Operational core configuration

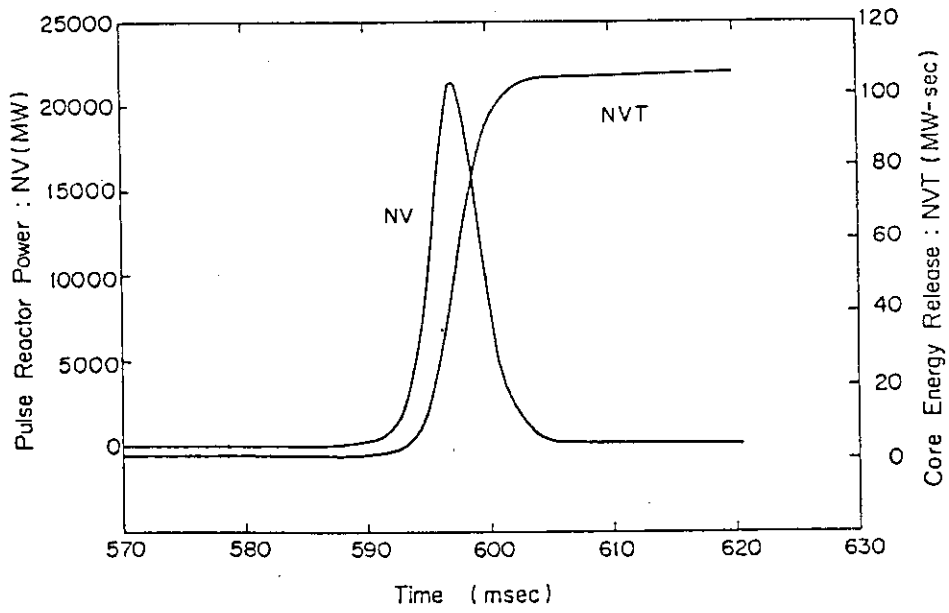


Fig. 3 Reactor power and energy release recorded in the data acquisition system for \$4.7 pulse

2. NSRRデジタル・シミュレータの概要

2.1 概要

NSRR デジタル・シミュレータは、NSRRの炉特性改良に伴う原子炉制御系の変更設計に使用することを目的として開発したものであり、原子炉制御系を含むNSRRの動特性シミュレーションを行うことができる。NSRR デジタル・シミュレータは、アナログ計算機と同等の機能を有するデジタル・プログラム ANACOM と、NSRR の動特性を模擬するために開発した EXCURS - NSRR を結合し、整備したものである。NSRR デジタル・シミュレータの開発にあたっては、

- (1) ANACOM は、一般的なアナログ計算機が備えている演算ユニットの大部分を内蔵し、アナログ計算機用の計算回路図をもとに、入力データが容易に作成できること、
- (2) ANACOM と EXCURS - NSRR の結合はできる限り簡明な方法を用い、ANACOM の汎用性を確保すること、および
- (3) 計算モードとして、ANACOM 単独、EXCURS - NSRR 単独、および両者の結合の3通りが可能であること、

などを配慮した。

2.2 システム構成

NSRR デジタル・シミュレータシステムの構成を Fig. 4 に示す。同図に示すように、ANACOM と EXCURS - NSRR は、入力データ・ファイルを共用する以外はそれぞれ単独のリスタート・ファイル、プロット・ファイル、プロット・プログラム等を有しており、プログラムとしてほぼ独立したものとなっている。

Fig. 5 は NSRR デジタル・シミュレータの計算の流れを示したものである。計算モードとしては以下の4様式が可能である。

- モード 0 : 入力データの出力とエラーチェックの実行
- モード 1 : ANACOM 計算のみの実行
- モード 2 : EXCURS - NSRR 計算のみの実行
- モード 3 : 両者の結合ランの実行

結合ランを行う場合、計算の主導権は ANACOM が持ち、計算は ANACOM で決定される時間に従って進められる。計算の過程において、ANACOM から EXCURS - NSRR へは変数 XO-UT が転送され、その逆へは変数 XIN が転送される。

Fig. 6 に示すように、ANACOM と EXCURS - NSRR の結合は、1 個のサブルーチン EXCURL を介して行われる。サブルーチン EXCURL はサブルーチン ANACOM から呼ばれ、X-OUT により転送されたデータを、引数としてサブルーチン EXCURS へ転送する。サブルーチン

ンEXCURSでは、必要な量を計算し、引数としてサブルーチンEXCURLへ転送する。それらの量は、サブルーチンEXCURLにおいてXINに置き換えられ、サブルーチンANACOMへ転送される。これらのデータ転送はコモン・ブロックINTRFCを用いて行われる。従って、EXCURLと同等のサブルーチンを1個作ることにより、ANACOMと他の動特性コードとの結合が可能である。また、動特性コードの修正も最小限ですむ。

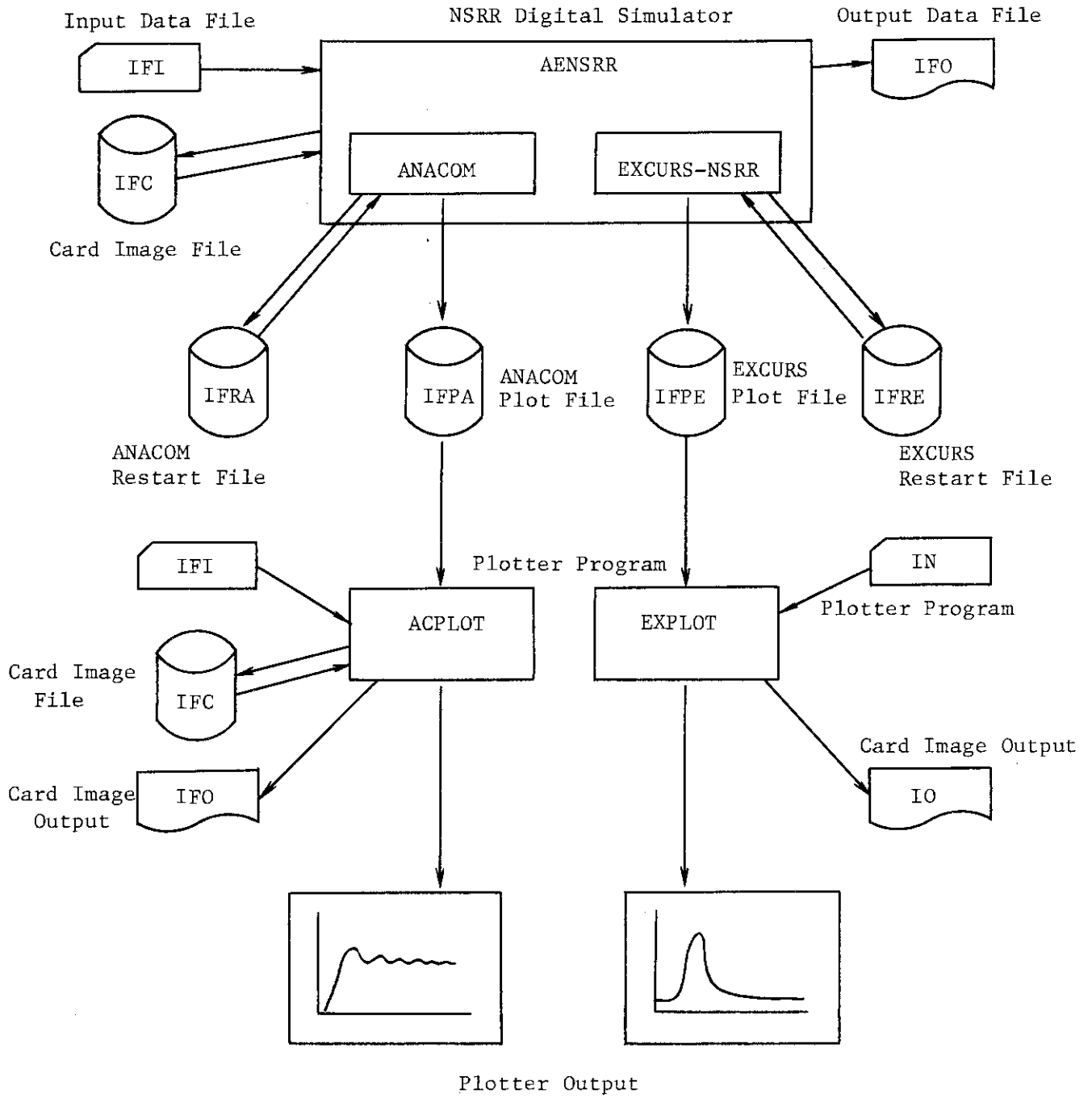


Fig. 4 Configuration of NSRR digital simulator

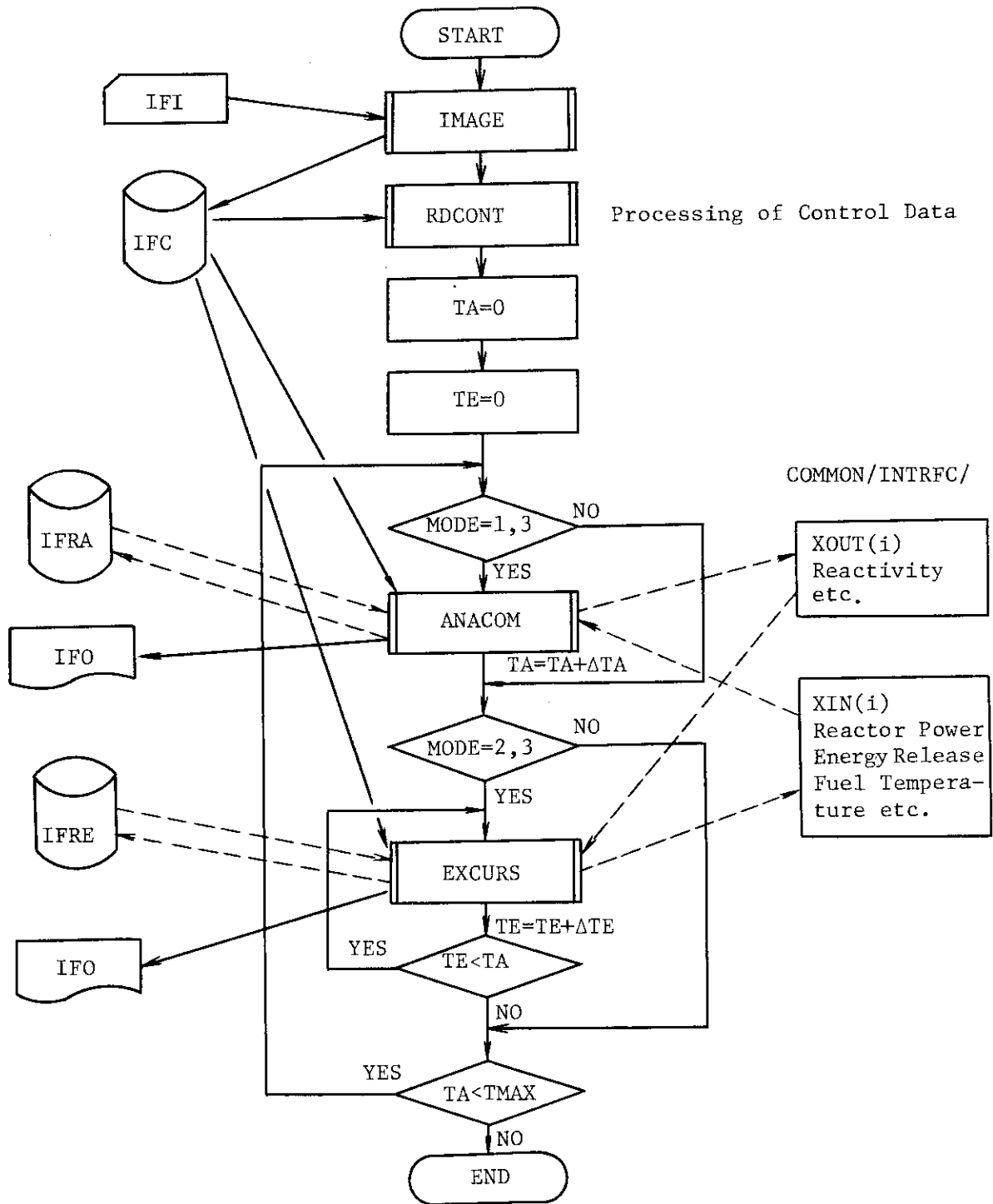


Fig. 5 Program flow of NSRR digital simulator

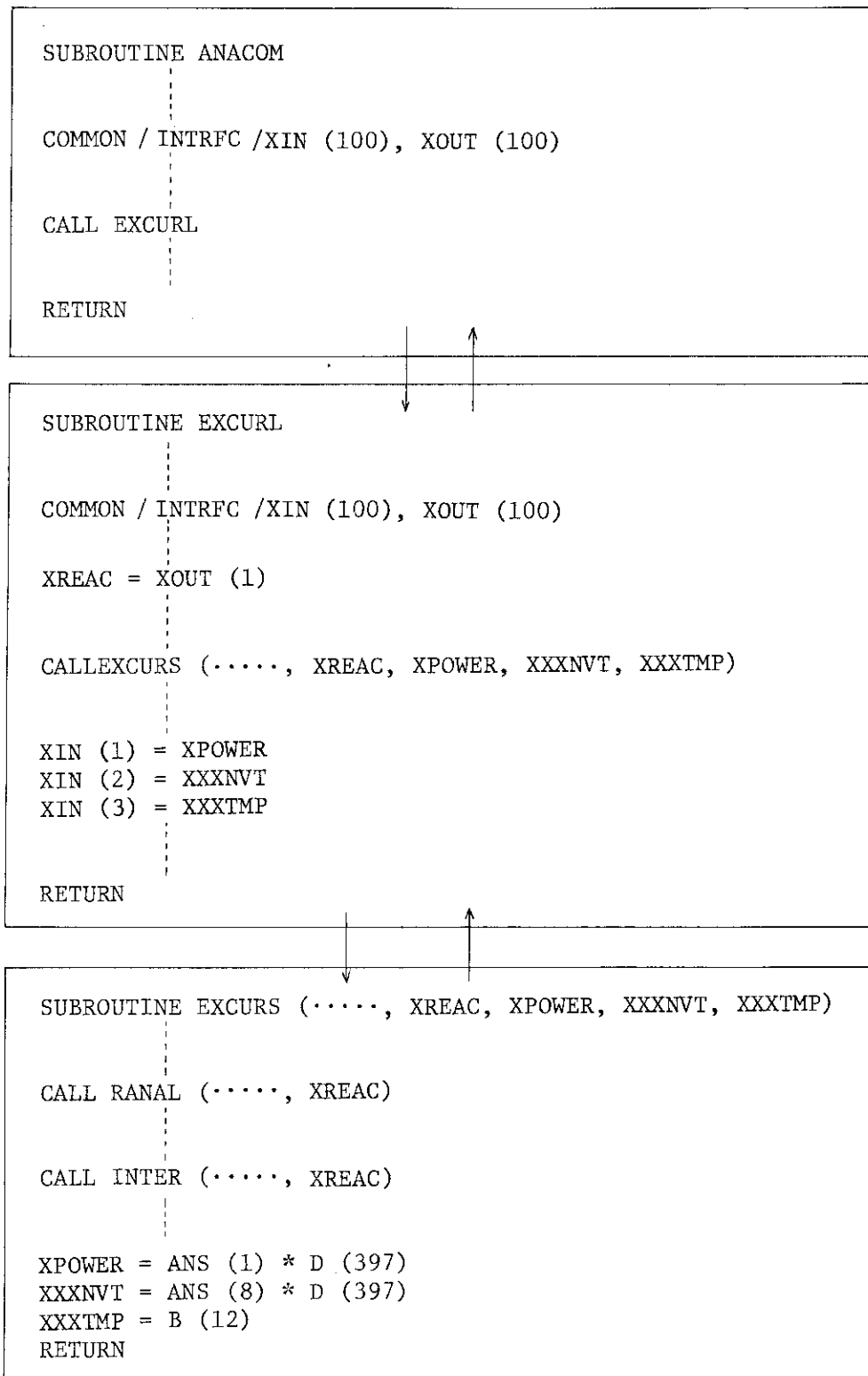


Fig. 6 Coupling of ANACOM and EXCURS-NSRR

3. ANACOMの概要

3.1 概要

ANACOMは、アナログ計算機と同等の性能を有するデジタル・プログラムである。ANACOMは、後述するように35種の演算ユニットと4種の入出力ユニットを有しており、アナログ計算機の使用経験があれば入力データを容易に作成することができる。

Fig. 7にANACOMの計算の流れを示す。サブルーチンINPUTで入力データのチェックおよび計算モデルの設定を行った後、サブルーチンITERは各ユニットの入出力量の初期化を行う。ICALCが0でない場合には、サブルーチンINITにより初期定常計算が実施される。続いて、ICALCが0又は2の場合には過渡計算に入る。計算終了後、サブルーチンOUTPTXにより、プロット・ファイルおよびプリント・ファイルへの出力が行われる。

3.2 ANACOMの計算モデル

3.2.1 ユニット・モデル

ANACOMに内蔵されている各種ユニットの名称および機能をTable 2にまとめて示す。

各ユニットの識別はFig. 8に示すように、ユニット識別記号（Table 2参照）と同種ユニット内での区別をするためのユニット識別番号によりなされる。また、ユニット間の結合は、Fig. 8に示すようにブランチ番号を用いて行う。すなわち、各ユニットに各々1個の出力ブランチ番号を割り当て、結合先のユニットの入力ブランチ番号としてその出力ブランチ番号を指定する。Fig. 8でいえば、ユニットAの出力ブランチ番号 N_A は、ユニットBの入力ブランチ番号となり、両ユニットが結合している状態となる。

各々のユニットは、複数の出力ブランチ番号を持つことはできない。また、出力ブランチ番号は重複したものがあってはならない。ただし、1つの出力ブランチ番号を複数のユニットの入力ブランチ番号として指定することはできる。入力ブランチ番号は、ユニットの種類により複数個指定する場合もある。

出力ブランチ番号あるいは入力ブランチ番号のいずれかがまったく指定されないユニットもある。Table 2に示すように、OUTLはプリント出力する変数を指定し、OUTPはプロット出力する変数を指定する。これらのユニットの出力が他のユニットの入力となることはないので、出力ブランチ番号は指定されない。また、OUTSは他のプログラム（ここではEXCURS-NS-RR）へ出力する変数を指定するものであるが、出力先が決まっているので、出力ブランチ番号は指定しない。

Eはある定数を常に発生するユニットであり、TIMEは時間を発生するユニットである。また、STPはある定められた時間で、ある大きさのステップ関数を発生するユニットである。これらのユニットに他のユニットを結合することは必要なく、したがって入力ブランチ番号の指定

は行わない。また、XIN は他のプログラムから ANACOM へ出力される変数を指定するユニットであるが、XIN への入力先は固定のため、入力ブランチ番号は指定しない。

以上の機能により、アナログ計算機を用いる場合と同様のネットワークを組むことができる。

Table 2 に示す各ユニットは、入出力ユニット (XIN, OUTL, OUTP, OUTS), 微分方程式系ユニット (INT, FLG), および代数方程式系ユニット (上記以外のユニット) に分類できる。微分方程式系ユニットの計算は、積分ユニット (INT) では、

$$\frac{dX_0}{dt} = X_i(t) \quad (3.1)$$

また、一次遅れユニット (FLG) では、

$$\frac{dX_0}{dt} = \frac{X_i - X_0}{\tau} \quad (3.2)$$

という型の微分方程式を、ルンゲークッターギル法を用いて解くことにより行われる。ここで、X は状態変数を表わし、添字 "0" は出力、"i" は入力をそれぞれ意味する。また、 τ は一次遅れの時定数である。

代数方程式系ユニットの計算モデルは、関数発生器 (FG), 微分ユニット (DER), 関数近似用ユニット (BSSL, SPLN) を除けば、Table 2 に示す定義により明らかである。以下では上に示した各ユニットの計算モデルについて説明する。

(1) 関数発生器 (FG)

関数発生器では、任意の関数を入力データに従い、 $x_{j-1} < x_i < x_j$ のとき

$$X_0 = (X_i - x_{j-1}) \frac{y_j - y_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} + y_{j-1} \quad (3.3)$$

というように折れ線で近似する。ここで、 (x_j, y_j) は入力データで与えられるデータ点である。

(2) 微分ユニット (DER)

微分ユニットの計算にはニュートンの後退差分公式、

$$X_0 = \frac{\tau}{\Delta t_A} \sum_{k=1}^n \frac{1}{K} \Delta^k X_i \quad (3.4)$$

を用いる。ここで、 τ は微分ゲインであり、 Δt_A は ANACOM の時間ステップ幅である。また、 n は計算階差数である。

(3) 関数近似ユニット (BSSL)

BSSL はベッセルの補関公式を用いて関数の近似を行うユニットである。

等間隔 h で与えられた $n+1$ 個の x の値、 x_0, x_1, \dots, x_n ($x_0 < x_1 < \dots < x_n$) に対する y の値をそれぞれ、 y_0, y_1, \dots, y_n とし、差分および高次差分を次のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} y_1 - y_0 &= \Delta_0^1, \quad y_2 - y_1 = \Delta_1^1, \quad \dots, \quad y_n - y_{n-1} = \Delta_{n-1}^1 \\ \Delta_1^1 - \Delta_0^1 &= \Delta_0^2, \quad \Delta_2^1 - \Delta_1^1 = \Delta_1^2, \quad \dots, \quad \Delta_{n-1}^1 - \Delta_{n-2}^1 = \Delta_{n-2}^2 \\ \Delta_2^2 - \Delta_0^2 &= \Delta_0^3, \quad \Delta_3^2 - \Delta_1^2 = \Delta_1^3, \quad \dots, \quad \Delta_{n-2}^2 - \Delta_{n-3}^2 = \Delta_{n-3}^3 \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

また,

$$u = \frac{X_i - x_2}{h} \quad (3.6)$$

とおく。 $x_2 < X_i < x_3$ なる X_i に対し, X_0 は

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{y_2 + y_3}{2} + B_1 \Delta_2^1 + B_2 \frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}{2} + B_3 \Delta_1^3 \\ &+ B_4 \frac{\Delta_0^4 - \Delta_1^4}{2} + B_5 \Delta_0^5 + \dots \end{aligned} \quad (3.7)$$

で求められる。ここで,

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= -(0.5 - u), \quad B_2 = -\frac{u(1-u)}{2}, \\ B_3 &= \frac{u(1-u)(0.5-u)}{6}, \quad B_4 = \frac{u(1-u^2)(2-u)}{24}, \\ B_5 &= -\frac{u(1-u^2)(2-u)(0.5-u)}{120}, \quad \dots \\ \text{一般項:} \\ B_{2r} &= (-1)^r \frac{u(1^2-u^2)(2^2-u^2)\dots\{(r-1)^2-u^2\}(r-u)}{(2r)!} \\ B_{2r+1} &= (-1)^{r+1} \frac{u(1^3-u^2)(2^2-u^2)\dots\{(r-1)^2-u^2\}(r-u)(0.5-u)}{(2r+1)!} \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

である。本プログラムでは $r=3$ としている。

(4) 関数近似ユニット (SPLN)

離散的なデータ点として与えられた関数を近似する方法としては、関数発生器 (FG) を用いた折れ線近似, および BSSL ユニットの用いたベッセル補間が可能である。しかしながら、データが等間隔で与えられていない場合や非常に滑らかな曲線で近似したい場合がある。このような場合、多項式を用いた最小 2 乗近似が考えられる。しかしながら、かなり多数のデータ点に対して、やや高い次数の多項式をあてはめてデータの平滑化を行うと、多く場合振動を生じる。

データの平滑化における多項式の欠点は、その解析性にある。すなわち、多項式は解析的に連続であるから、ある小区間でのふるまいが他のすべての区間のふるまいに大きな影響を及ぼす。

多項式のもつこの欠点を克服するためには、区分的解析関数で多項式よりも柔軟な関数を用いる必要がある。スプライン関数は、⁽³⁾多項式を何らかの連続条件を満たすように接続した区分的多項式であり、局所的なふるまいをする性質がある。すなわち、ある小区間でのふるまいは他の区間でのふるまいにあまり影響しない。したがって、実験データの性質によくあうので振動を生じにくい特徴がある。

スプライン関数のつなぎ目を節点と呼び、 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m$ ($\xi_1 < \xi_2 < \dots < \xi_m$ とする) で表わす。節点 ξ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) をもつ m 次のスプライン関数 $S(x)$ は、次の二つの性質をもつ実数軸上で定義された関数である。

(i) 各区間 (ξ_i, ξ_{i+1}) ($i = 0, 1, \dots, n$; ただし、 $\xi_0 = -\infty, \xi_{n+1} = \infty$) において $S(x)$ は m 次またはそれ以下の多項式である。

(ii) $S(x)$ とその $1, 2, \dots, m-1$ 次の高階関数は $(-\infty, \infty)$ で連続である。すなわち、 $S(x)$ は C^{m-1} 級の関数である。

一つまたはそれ以上の節点において異なる連続性をもつスプライン関数を拡張スプライン関数とよぶが、これは節点を重ねることに対応する。いま、

$$\xi_0 < \xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_r < \xi_{r+1} \quad (3.9)$$

とすれば、 m 次のスプライン関数 $S(x)$ は区間 (ξ_0, ξ_{r+1}) において C^{m-r} 級の関数である。このとき、 $\xi = \xi_r$ を $S(x)$ の r 重節点という。ただし、 $r \leq m+1$ である。

n 個の節点 ξ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) をもつ m 次のスプライン関数は、 $n+1$ 個の各区間 (ξ_i, ξ_{i+1}) ($i = 0, 1, \dots, n, \xi_0 = -\infty, \xi_{n+1} = \infty$) で、一般に異った多項式で表わされる。各多項式は $m+1$ 個のパラメータをもつから、このスプライン関数は全部で $(n+1)(m+1)$ 個のパラメータをもつ。しかし、節点における連続条件から拘束条件を生じ、自由なパラメータ数は $m+n+1$ 個となる。この自由度をもつスプライン関数として、切断べき関数

$$x_+^m = \begin{cases} x^m & x \geq 0 \text{ のとき} \\ 0 & x < 0 \text{ のとき} \end{cases} \quad (3.10)$$

を用いる表現式がある。

切断べき関数によって表現されたスプライン関数を利用するときの問題点の一つは、そのパラメータを決定するときの線形システムが悪条件になることである。この困難を避けるためには、局所的な台をもつ基底を用いてスプライン関数を表現すればよい。B-スプラインは、このような性質を満たすもので、与えられた次数の最小個数の区間の台をもつスプライン関数である。

いま、実数例

$$\dots x_{-2} < x_{-1} < x_0 < x_1 < \dots < x_j < \dots \quad (j \rightarrow \pm\infty \text{ のとき } x \rightarrow \pm\infty) \quad (3.11)$$

を考える。

$$M_m(x; y) = (y - x)_+^{m-1} \quad (3.12)$$

とおけば、 m 階、すなわち $m-1$ 次の B-スプラインは

$$M_m(x) = M_m(x; x_0, x_1, \dots, x_m) \quad (3.13)$$

によって定義される。(3.13)式の右辺は(3.12)式の $y = x_0, x_1, \dots, x_m$ に関する差分商であり、

$$\left. \begin{aligned} M_m(x; x_0, x_1) &= \frac{M_m(x; x_1) - M_m(x; x_0)}{x_1 - x_0} \\ M_m(x; x_0, x_1, \dots, x_i) &= \frac{M_m(x; x_1, x_2, \dots, x_i) - M_m(x; x_0, x_1, \dots, x_{i-1})}{x_i - x_0} \\ &\quad (i = 2, 3, \dots, m) \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

で計算される。

スプライン関数 $S(x)$ の基底関数として m 階 ($m-1$ 次)の B-スプラインを用いる。必要な基底を作るためには $2m$ 個の付加節点 $\xi_{1-m}, \xi_{2-m}, \dots, \xi_0; \xi_{n+1}, \xi_{n+2}, \dots, \xi_{n+m}$ を導入しなければならない。ここで、 $\xi_{1-m} < \xi_{2-m} < \dots < \xi_0 \leq x_0$ および $x_N \leq \xi_{n+1} < \xi_{n+2} < \dots < \xi_{n+m}$ である。 x_0 および x_N はそれぞれデータが存在する領域の下限および上限を示す。 $\xi_0 \leq x \leq \xi_{n+1}$ において、 $S(x)$ は

$$S(x) = \sum_{i=1}^{n+m} C_i^* M_{mi}(x) = \sum_{i=1}^{n+m} C_i N_{mi}(x) \quad (3.15)$$

と表わすことができる。ここで、 $M_{mi}(x)$ は節点 $\xi_{i-m}, \xi_{i-m+1}, \dots, \xi_i$ に対して定義された m 階の B-スプラインである。また、 $N_{mi}(x)$ は

$$N_{mi}(x) = (\xi_i - \xi_{i-m}) M_{mi}(x) \quad (3.16)$$

で定義され、正規化された B-スプラインと呼ばれる。B-スプライン $M_{mi}(x)$ の値は、de Boor-Cox のアルゴリズムと呼ばれる次の漸化式によって計算できる。

$$M_{rj}(x) = \frac{(x - \xi_{j-r}) M_{r-1, j-1}(x) + (\xi_j - x) M_{r-1, j}(x)}{\xi_j - \xi_{j-r}} \quad (3.17)$$

この漸化式の出発値は、

$$M_{ij}(x) = \begin{cases} (\xi_j - \xi_{j-1})^{-1} (\xi_{j-1} \leq x < \xi_j) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (3.18)$$

である。

いま、データは区間〔 a , b 〕内において与えられ、

$$F_k = f(x_k) + e_k \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (3.19)$$

であると仮定する。ここで、 $f(x)$ は信号(データのもとにある関数)で、 e_k は平均値0、分散 σ^2 の正規分布をする互いに独立な誤差である。

残差の2乗和は、

$$Q = \sum_{k=1}^N \{ S(x_k) - F_k \}^2 \quad (3.20)$$

である。(3.20)式をパラメータ c_i ($i=1, 2, \dots, n+m$)で偏微分して0とおくと、正規方程式

$$A \mathbf{C} = \mathbf{d} \quad (3.21)$$

を得る。ここで、

$$\mathbf{C} = (c_1, c_2, \dots, c_{n+m})^T \quad (3.22)$$

$$\mathbf{d} = \left\{ \sum_{x_k \in (\xi_{1-m}, \xi_1)} N_{m1}(x_k) F_k, \sum_{x_k \in (\xi_{2-m}, \xi_2)} N_{m2}(x_k) F_k, \dots, \sum_{x_k \in (\xi_n, \xi_{n+m})} N_{m, n+m}(x_k) F_k \right\}^T \quad (3.23)$$

となる。係数行列Aは、B-スプラインが局所的な台をもつ、すなわち、

$$M_{mi}(x) \begin{cases} > 0 & (\xi_{i-m} < x < \xi_i) \\ = 0 & (x \leq \xi_{i-m}, \xi_i \leq x) \end{cases} \quad (3.24)$$

という性質から、帯の幅が $2m-1$ の対称な帯行列となる。(3.21)式はAの性質より、コレスキー法を用いると効果的に解くことができる。その解 \mathbf{C} を(3.15)式に代入すれば近似関数 $S(x)$ が求まる。

先ほど述べた $2m$ 個の付加節点は

$$\left. \begin{aligned} \xi_{1-m} &= \xi_{2-m} = \dots = \xi_0 = a \\ \xi_{n+1} &= \xi_{n+2} = \dots = \xi_{n+m} = b \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

と選ぶこともできる。

以上で述べたB-スプラインによるアルゴリズムは、そのまま多重節点をもつスプライン関数に対して利用できる。ただし、節点は m 重よりも多く重ねないで、 $\xi_{i-m} < \xi_i$ ($i=1, 2, \dots, n+m$)とする。ある点で節点を k 個重ねると、その点において $m-k-1$ 次の導関数まで連続となる。したがって、ある点で関数だけ連続にするといったことが容易にでき、尖ったところのある関数形をしたデータに対してもよい近似関数を作ることができる。

スプライン関数による関数の近似はSPLNユニットにより行われる。本ユニットはSカーブの近似に最も適している。

3.2.2 過渡計算法

ANACOMにおける過渡計算は次のような基本的考え方に基づいて行う。

- 1) 微分方程式系ユニットの計算は、前時間ステップまでの計算結果に基づいて行う。従って現時間ステップにおいては代数方程式系ユニットに先立って計算を行う。
- 2) 代数方程式系ユニットの計算は、入力値が既知となる順に行う。

具体的な計算の流れを以下に示す。

ステップ1

入力データを識別し、全ユニット数および種類別のユニット数を求める。

ステップ2

各ユニットに対し作業領域を割当てる。

ステップ3

各作業領域に入力データを保存する。

ステップ4

入力データをチェックし、各ユニットの出力ブランチ番号に通し番号を与える。

ステップ5

代数方程式系のユニットに対し、入力データに基づいて計算順序の設定を行う。計算順序の設定は以下の手順で行う。

- 1) 入力ブランチ番号の指定されないユニット (E, STP, TIME, XIN) が存在すれば、Table. 2 に示すユニット通し番号の若い順、すなわち、E, STP, TIME および XIN の順に計算順序を割当てる。あるユニットが複数個存在する場合には、ユニット識別番号の若い順に連続した計算順序を割当てる。
- 2) 1) で計算順序を指定したユニットおよび微分方程式系のユニットの出力ブランチのみがつながるユニットをサーチする。サーチする順序は Table. 2 に示す通し番号の順であるが、1) で計算順序を指定したユニットおよび微分方程式系ユニットはサーチの対象外である。同種のユニットが複数個ある場合には、ユニット識別番号の若い順に連続してサーチする。このサーチの条件に合致したユニットがあれば順に計算順序を割当てる。
- 3) 2) までに計算順序が指定されたユニットおよび微分方程式系のユニットの出力ブランチのみがつながるユニットをサーチする。当然、2) までに計算順序が指定されたユニットおよび微分方程式系のユニットはサーチの対象外である。2) と同様の手順で計算順序の割当てを行う
- 4) すべての代数系ユニットに計算順序が割当てられるまで3) と同様の手順をくり返し行う。

以上の手順を Fig. 9 の例に従って説明する。まず、INT100 は微分方程式系ユニットであるので、計算順序の割当てから除外する。ここで、ユニット識別記号 (INT) の後の番号 (100) はユニット識別番号を示す。計算順序の1番目はE 100 である。INT100 と E 100 の出力ブランチがつながる SUM100 が計算順序に組込まれる。SUM100 が定まれば POT 100 が計算可能となる。POT 100 の計算が終わると、FG 100 および SUM 200 が計算対象となるが、ユニット通し番号の若い順、すなわち、SUM200、FG100 の順に計算が行われる。以後、MULT 100、POT 200 の順に計算順序に組込まれる。

ステップ 6

各代数方程式系ユニットに対し、初期値の計算を行う。

ステップ 7

微分方程式系ユニットの計算を行う。

ステップ 8

代数方程式系ユニットの計算を行う。

ステップ 9

EXCURS - NSRR との結合ランの場合には、EXCURS - NSRR ヘデータ (XOUT) を転送する。

ステップ 10

プロット・ファイルおよびプリント・ファイルへの計算結果のダンプを行う。

ステップ 11

結合ランの場合には EXCURS - NSRR の計算を行い、計算結果 (XIN) を ANACOM へ転送する。

ステップ 12

計算時間を進め、ステップ 7 から 11 をくり返す。

Table 2 Units contained in ANACOM

Unit Serial Number	Unit Name	Unit ID	Function and Parameters
1	Summer	SUM	$X_0 = \sum_{I=1}^n X_{iI} \quad (1 \leq n \leq 10)$
2	Integrator	INT	$X_0(t_{K+1}) = X_0(t_K) + \int_{t_K}^{t_{K+1}} X_i(t_K) dt$
3	Potentiometer	POT	$X_0 = kX_i$
4	Multiplier	MULT	$X_0 = X_{i1} \cdot X_{i2}$
5	Divider	DIV	$X_0 = X_{i1} / X_{i2}$
6	Electric Switch	ESW	$X_0 = X_{i1}$ when $l_i = 0$ $X_0 = X_{i2}$ when $l_i = 1$
7	Square-root Generator	SQR	$X_0 = \sqrt{ X_i }$
8	Feed back Limitter	FBL	$X_0 = 0.0$ when $X_i \geq 0$ $X_0 = -X_i$ when $X_i < 0$
9	Absolute value Generator	ABS	$X_0 = X_i $
10	Maximum Hold Circuit	MAX	$X_0 = \max \{X_i\}$
11	Minimum Hold Circuit	MIN	$X_0 = \min \{X_i\}$
12	Dead Zone	DZ	$X_0 = X_i$ when $X_i < A$ or $X_i > B$ $X_0 = 0.0$ when $A \leq X_i \leq B$
13	Limiter	LMT	$X_0 = A$ when $X_i < A$ $X_0 = B$ when $X_i > B$ $X_0 = X_i$ when $A \leq X_i \leq B$
14	Common Logarithm	LOGT	$X_0 = \log_{10} X_i$
15	Natural Logarithm	LOGN	$X_0 = \log_e X_i$
16	Sine Function	SIN	$X_0 = \sin (X_i)$
17	Cosine Function	COS	$X_0 = \cos (X_i)$
18	Exponential Function	EXP	$X_0 = \exp (X_i)$

Table 2 (Continued)

Unit Serial Number	Unit Name	Unit ID	Function and Parameters
19	Reference Value	E	$X_0 = a$
20	Step Function	STP	$X_0 = 0.0$ when $t \leq t_c$ $X_0 = a$ when $t > t_c$
21	Derivative	DER	$X_0 = \tau \frac{d}{dt} X_i$
22	First-order Lag	FLG	$\tau \frac{d}{dt} X_0 = X_i - X_0$
23	Function Generator	FG	$X_0 = f(X_i)$ ($P_I(X_i, X_0)$, $I=1, \dots, 50$)
24	Polynomial Function	POLY	$X_0 = \sum_{k=0}^n a_k X_i^k$ ($0 \leq n \leq 7$)
25	Logical Not	NOT	$l_0 = \bar{l}_i$
26	Logical And	AND	$l_0 = \bigwedge_{k=1}^n l_{ik}$ ($1 \leq k \leq 10$)
27	Logical Or	OR	$l_0 = \bigvee_{k=1}^n l_{ik}$ ($1 \leq k \leq 10$)
28	Function Switch	SW	$X_0 = 0.0$ when $l_i = 0$ $X_0 = X_i$ when $l_i = 1$
29	Time Generator	TIME	$X_0 = t_A$ (Time in ANACOM)
30	Comparator	COMP	$l_0 = 1$ when $X_{i1} + X_{i2} \geq 0$ $l_0 = 0$ when $X_{i1} + X_{i2} < 0$
31	Input from EXCURS	XIN	$X_0 = X_{in}$
32	Delay Element	DLY	$X_0 = X_i(t-t_d)$ t_d : delay time
33	Bessel Interpolation	BSSL	$X_0 = \text{BSSL}(X_i)$
34	Spline Function Generator	SPLN	$X_0 = \text{SPLN}(X_i)$
35	Data Sampling Unit	SMPL	$X_0 = X_i$ at $t = nt_s$ and hold t_s : Sampling time
36	Pre-step Value Generator	PSTP	$X_0 = X_i(t - \Delta t_A)$ Δt_A : Time step size in ANACOM

Table 2 (Continued)

Unit Serial Number	Unit Name	Unit ID	Function and Parameters
37		OUTL	Output to Printer File
38		OUTP	Output to Plotter File
39		OUTS	Output to EXCURS-NSRR

(Note) X: State variable 1: Logical variable
 Suffix "o": output "i": input

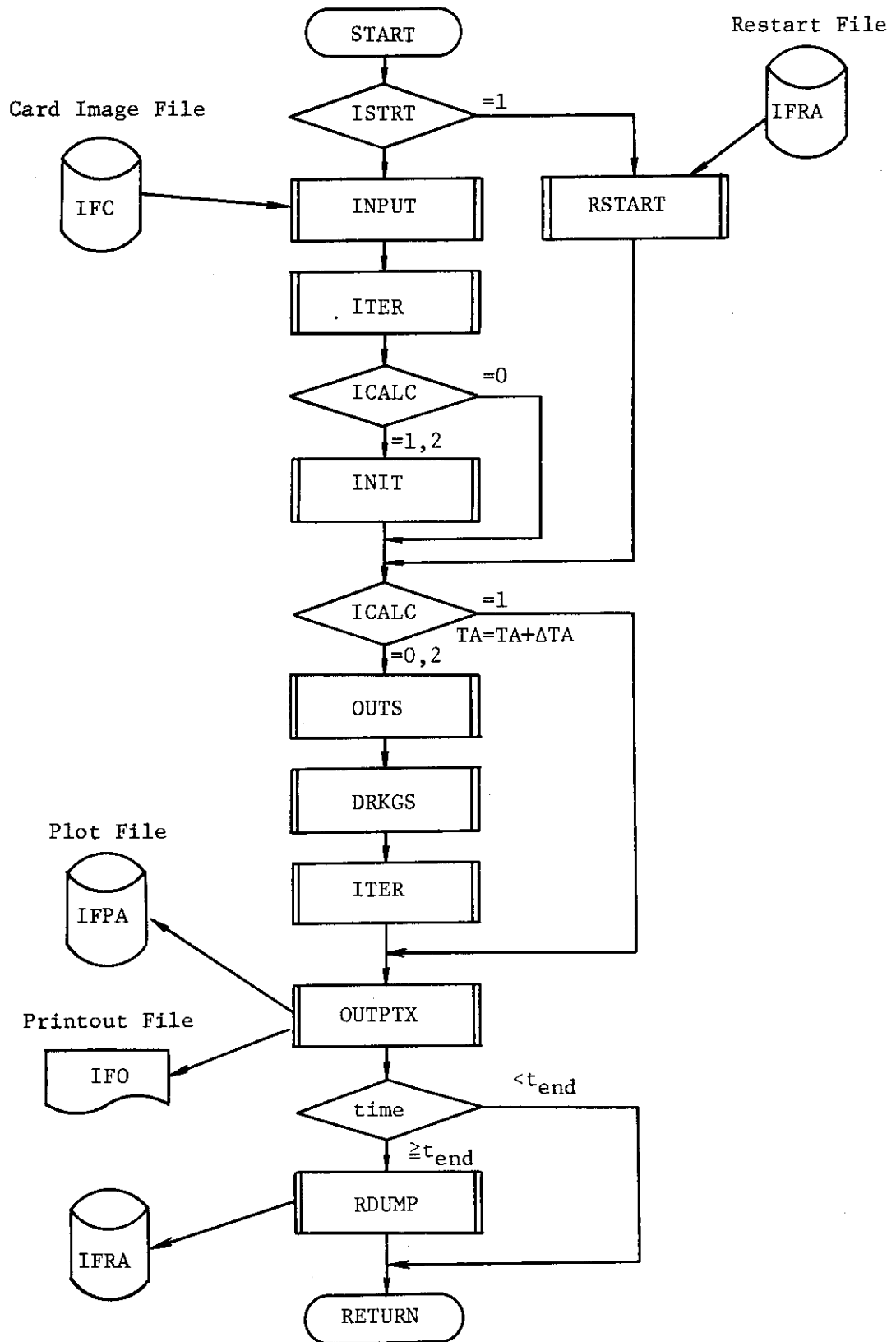
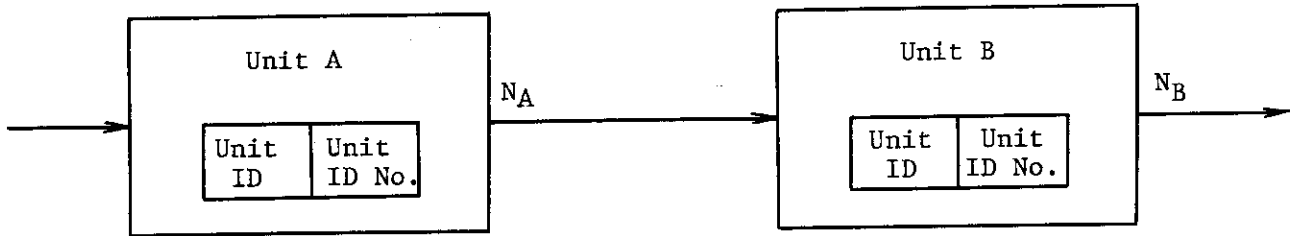
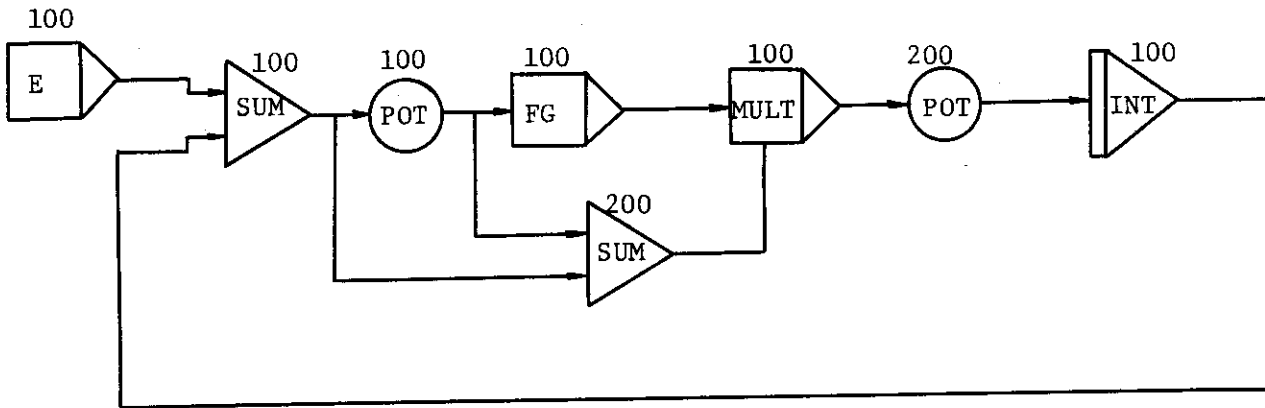


Fig. 7 Program flow of ANACOM



N_A = Output branch number of unit A
 N_B = Output branch number of unit B

Fig. 8 Identification of each unit and connection between them



Order of calculation

- 1 E 100
- 2 SUM 100
- 3 POT 100
- 4 SUM 200
- 5 FG 100
- 6 MULT 100
- 7 POT 100

Fig. 9 Order of calculations in algebraic equation system units

4. EXCURS-NSRRの概要

4.1 概要

EXCURS-NSRRは、高速炉用動特性解析コードEXCURS⁽⁴⁾を、NSRR用に改良したものである。この計算コードは、熱・流動計算についてはFig. 10に示すようなユニットセルに対して固体領域では半径方向のみの熱移動、流体領域では固体領域からの熱移動と軸方向のエンタルピー輸送を考慮して、平均チャンネル、ホットチャンネル及び工学的高温点係数を考慮したホットストチャンネルにつき数値計算を行う。一方、核計算は一点近似の動特性方程式に、平均チャンネルの熱計算結果に基づく反応度のフィードバック効果を考慮して数値計算するものである。NSRR デジタル・シミュレータでは、計算時間の短縮のため、熱計算は平均チャンネルに対してのみ行うようにコードの修正を行った。

なお、冷却材流動についてはNSRRでは、自然循環量を特に計算する。これは、熱計算の各時間ステップにおいて冷却材の温度分布に応じた浮力と、その時の流速による流動抵抗の差を加速項とすることにより過渡時の冷却材流速を評価する方法で行う。

また、パルス反応度の挿入については、高速トランジェント棒及び調節用トランジェント棒の特性を考慮して2次式の形で入力することができる。調整棒に対しては、時間対反応度、あるいは時間対制御棒位置のデータを入力することができる。ただし、各データ間は直線で補間される。NSRR デジタル・シミュレータでは、ANACOMとEXCURS-NSRRの結合計算を行う場合、ANACOMで評価された制御棒の移動による反応度変化量がEXCURS-NSRRへ転送される。

4.2 EXCURS-NSRRの計算モデル

4.2.1 核系方程式

一般に一点近似の中性子動特性方程式は次のようになる。

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{(1 + \delta k(t))(1 - \beta) - 1}{\ell} n(t) + \sum \lambda_i c_i(t) \quad (4.1)$$

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{(1 + \delta k(t)) \beta_i}{\ell} n(t) - \lambda_i c_i(t) \quad (4.2)$$

ここで、各記号の意味は以下の通りである。

- $n(t)$: 中性子密度 (n/cm^3)
- $c_i(t)$: 遅発中性子先行核種密度 ($個/cm^3$)
- $\lambda_i(t)$: 遅発中性子先行核種崩壊定数 (sec^{-1})
- ℓ : 即発中性子寿命 (sec)

β : 遅発中性子分率 (-)

$\delta k(t)$: 反応度 (-)

(4.1) および (4.2) 式において, $\delta k(t) \beta$ を二次の微小量として無視し, 定常値に対する比として表わすと,

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\beta}{\ell} ((r(t)-1) n(t) + \sum f_i W_i(t)) \quad (4.3)$$

$$\frac{dW_i(t)}{dt} = -\lambda_i (W_i(t) - n(t)) \quad (4.4)$$

を得る。ここで,

$$\left. \begin{aligned} f_i &= \frac{\beta_i}{\beta} \\ w_i(t) &= \frac{\lambda_i \ell}{\beta_i} c_i \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

である。また, $r(t)$ はドル単位の反応度であり,

$$r(t) = (\delta k_{TR} + \delta k_{BANK} + \delta k_{FB}) / \beta \quad (4.6)$$

で与えられる。 δk_{TR} はトランジェント棒による反応度であり,

$$\delta k_{TR} = at^2 + bt + c \quad (4.7)$$

という形の時間に関する2次式で与えられる。 δk_{BANK} は調整棒のバンク駆動による反応度であり, 一般には折れ線で表わした制御棒引抜き履歴をSカーブにより反応度に変換することによって与えられる。 δk_{FB} はフィードバック反応度であり,

$$\begin{aligned} \delta k_{FB} &= 0.716 \times 10^{-10} (\bar{T}_f - \bar{T}_0)^3 - 0.65 \times 10^{-7} (\bar{T}_f - \bar{T}_0)^2 \\ &\quad - 0.818 \times 10^{-4} (\bar{T}_f - \bar{T}) + 1.28 \times 10^{-4} \bar{T}_c \end{aligned} \quad (4.8)$$

で与えられる。ここで,

\bar{T}_f : 燃料平均温度 (°C)

\bar{T}_0 : 初期平均温度 (°C)

\bar{T}_c : 冷却材平均温度 (°C)

である。

(4.3) および (4.4) 式はルンゲークッターギル法を用いて解かれる。

4.2.2 熱系方程式

熱系方程式については Fig. 10 に示すように, チャンネルを軸方向及び半径方向に分割し, 各点において熱平衡式を導入する。基本的な熱平衡式は, 温度 T を (r, z, t) の関数として表わす

と次のようになる。

(冷却材領域以外)

$$\begin{aligned} (V\rho c_P)_I \frac{dT_I}{dt} &= \left(\frac{kA}{d}\right)_{I,I-1} (T_{I-1} - T_I) \\ &\quad - \left(\frac{kA}{d}\right)_{I,I+1} (T_I - T_{I+1}) + q_1(r, z, t) \end{aligned} \quad (4.9)$$

(冷却材領域)

$$(V\rho c_P)_I \frac{dT_I}{dt} = -v(V\rho c_P) \frac{dT_I}{dZ} + q_2(r, z, t) \quad (4.10)$$

ここで、各記号の意味は次の通りである。

- k : 熱伝導度 (cal/cm sec °C)
- ρ : 密度 (g/cm³)
- c_P : 比熱 (cal/g °C)
- V : 体積 (cm³)
- d : メッシュ幅 (cm)
- v : 流速 (cm/sec)
- q_1 : 発生熱量 (cal/cm³ sec)
- q_2 : 熱流束 (cal/cm² sec)

Fig.10 に示すジルコニウム芯材と燃料の間については接触伝熱を考える。

(4.9) および (4.10) 式はルンゲークッターギル法を用いて解かれる。

4.2.3 除熱モデル

自然循環に対する熱伝達率および循環流量については以下のようにモデル化する。

(1) 熱伝達率

非沸騰時の熱伝達率については一般に垂直平板に対する定常状態の式、例えばオストラッハの近似式、

$$N_u = 0.478 P_r^{1/4} \left(\frac{P_r}{0.861 + P_r} \right)^{1/4} G_r^{1/4} \quad (4.11)$$

が考えられるが、TRIGA 炉によるパルス運転経験から、熱伝達率として強制対流の式を用いた方が実験値と良く一致する。したがって、非沸騰時に対しては強制対流の式、沸騰時には西川・山県の実験式を用いる。

$$\begin{aligned} T_w < T_{sat} + T_{sup} \quad \text{の時} \\ N_u &= 0.023 R_e^{0.8} P_r^{0.4} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$T_W \geq T_{sat} + T_{sup} \text{ の時,}$$

$$q = 31.6 P^{6/5} \Delta T_{sat}^3 \quad (4.13)$$

P = 1.0 として,

$$\alpha = 31.6 \frac{(T_W - T_{sat})^3}{T_W - T_B} \quad (4.14)$$

ここで、各記号の意味は以下に示す通りである。

- N_u : ヌッセルト数 = $\alpha Z / \lambda$
- P_r : プラント数 = ν / k
- G_r : グラスホフ数 = $Z^3 g \beta (T_W - T_B) / \nu$
- α : 熱伝達率 (cal/cm² sec °C)
- λ : 熱伝導率 (cal/cm sec °C)
- Z : 流路下端から上方にとった長さ (cm)
- ν : 動粘性係数 (g sec/cm²)
- k : 温度伝導率 (cm²/sec)
- g : 重力加速度 (cm/sec²)
- β : 熱膨張率 (/ °C)
- T_W : 被覆管表面温度 (°C)
- T_B : 冷却材バルク温度 (°C)
- T_{sat} : 飽和温度 (°C)
- T_{sup} : スーパーヒート (°C)
- P : 冷却材圧力 (ata)

(2) 循環流量計算式

冷却材の循環流量はユニットセル内の冷却材バルク温度で評価し、流路内の液温に対応した浮力と流路の摩擦抵抗のつり合から流量を求める。

$$\frac{rL}{g} \cdot \frac{du}{dt} = (r_0 - r) L - \frac{\bar{r}}{2g} \left(\frac{f \cdot L_c}{d_e} + \xi \right) u^2 \quad (4.15)$$

流路壁の摩擦抵抗 f としてはワイスバッハの式、

$$f = \frac{1}{1000} \left(14.4 + \frac{9.5}{\sqrt{u}} \right) \quad (4.16)$$

を用いる。又、 \bar{r} としては仮想的なチャンネル長さを考える。

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \frac{1}{L} \int_0^L r(z) dz \\ &= \frac{1}{L} \left\{ \int_0^{L_c} r(z) dz + \int_{L_c}^L r(z) dz \right\} \end{aligned} \quad (4.17)$$

ここで、各記号の意味は以下の通りである。

- $\bar{\gamma}$: 冷却材流路内平均比重量 (g/cm³)
- γ_0 : 炉心外の冷却材比重量 (g/cm³)
- L_c : 炉心高さ (cm)
- f : 流路壁の摩擦係数 (-)
- d_e : 流路の流力直径 (cm)
- ξ : 流路の形状圧力損失係数 (-)
- u : 冷却材流速 (cm/sec)

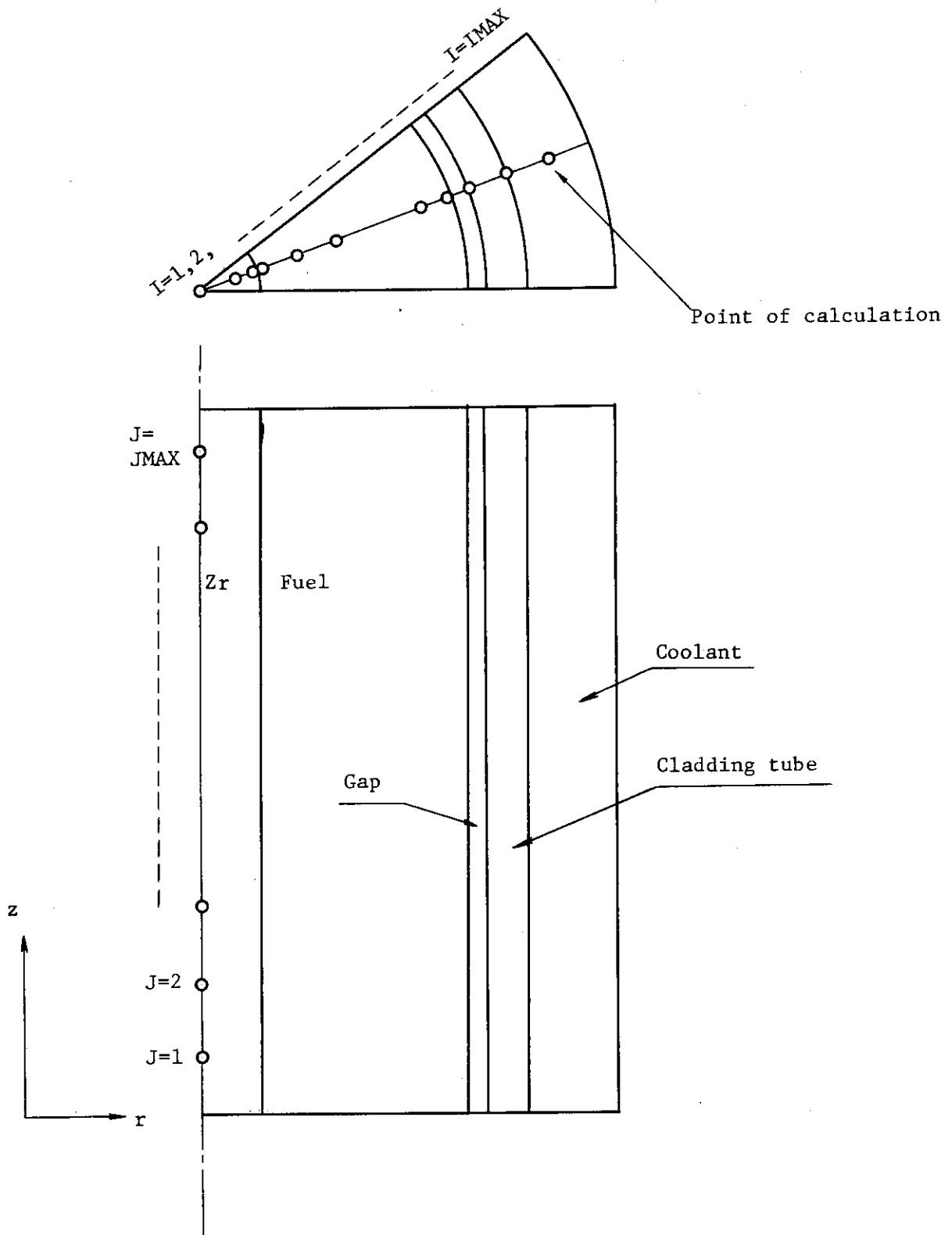


Fig. 10 Calculational model of EXCURS-NSRR

5. NSRR デジタル・シミュレータの使用法

ここでは、主として ANACOM およびそのプロッタールーチンの使用方法について説明する。また、計算機として、日本原子力研究所の FACOM - M 380 の使用を前提としている。

5.1 ファイルおよび JCL

NSRR デジタル・シミュレータ、プロッター・ルーチン、入力データおよび JCL は、Fig. 11 に示すようにそれぞれ別個の GEM ファイルに格納されている。これらのファイルは、Table 3 および 4 に示す JCL によって有機的に結合され、計算および図形処理が実行される。

5.2 入力データ

Table 5 に示すように、NSRR デジタル・シミュレータの入力データは、タイトルデータ、コントロールデータ・ブロック、ANACOM データ・ブロック、および EXCURS データ・ブロックより構成され、各々のデータ・ブロックは TITLE、CONTROL、ANACOM、および EXCURS という入力データによって識別される。すべての入力データの最後に END カードが必要である。また、各データ・ブロックの順序を交換することはできない。

ANACOM のみの実行時では、EXCURS - NSRR のデータは不要であり、EXCURS - NSRR のみの実行時には ANACOM のデータは不要である。ただし、不要なデータが入力されていたとしても、それらは無視される。ANACOM と EXCURS - NSRR の結合時には、当然すべての入力データが必要となる。

5.2.1 タイトルデータ

タイトルデータは、実行する計算を識別するためのものであり、Table 5 に示すように、

TITLE
タイトル (20 A 4)

という 2 枚のカードからなる。

5.2.2 コントロールデータ・ブロック

このデータ・ブロックでは、実行モード、リスタート、ANACOM 計算モード、プリント出力形式等が指定される。(Table 5 参照)

(1) カード 1

CONTROL □□□□ に続き、以下の量を入力する。

- 1) k_1, k_2, \dots, k_{10} (I 1) …… デバック・オプション
- k_1 : ANACOM サブルーチン・トレース
 k_2 : 状態変数ベクトル X のプリント
 k_3 : 主なコモン変数のプリント
 k_4 : 未使用
 k_5 : EXCURS - NSRR ダミールーチンへの切換え
 k_6 : EXCURS - NSRR チェックプリント
 $k_7 \sim k_9$: 未使用
 k_{10} : ANACOM インプットエコーの取消し
- $k > 0$ の時、上記の機能を持つ。入力しなければすべて 0 とみなされる。
- 2) n_g (I 5) : ANACOM の初期定常計算の反復打ち切り回数。入力しなければ 2000 に設定される。
- 3) n_x (I 5) : ブランクとすること。
- 4) n_d (I 5) : 微分ユニットにおける数値微分時の計算階差数。 $1 \leq n_d \leq 8$ 。入力しなければ 5 に設定される
- 5) n_f (I 5) : ブランクとすること。
- 6) ϵ (F10.0) : ANACOM の初期定常計算における収束判定に使用。入力しなければ 1×10^{-5} に設定される。

(2) カード 2

- 1) m (I 1, 1 x) : 実行モード (MODE)
- $m = 0$; カードイメージリストのみ出力。
 $m = 1$; ANACOM 実行モード
 $m = 2$; EXCURS - NSRR 実行モード
 $m = 3$; ANACOM - EXCURS - NSRR 結合モード
- 2) r (I 1, 1 x) : リスタート・フラッグ
- $r = 0$; スタート
 $r = 1$; リスタート
- (注) リスタート時には、あらかじめリスタート・ファイルが作られていなければならない。
- 3) s (I 1) : ANACOM 計算モード
- $s = 0$; 過渡応答計算
 $s = 1$; 初期定常計算
 $s = 2$; 初期定常計算及び過渡応答計算
- 4) ℓ (I 5) : ANACOM のプリント・マス。入力しなければ $\ell = 1$ に設定される。
- 5) h (I 5) : ANACOM のプリント・マス。入力しなければ $h = 1$ に設定される。 $1 \leq h \leq 100$ 。
- (注) ANACOM のプリントは、 ℓ ステップ毎の出力が h ラインまとめて出力される。
- 6) p (I 5) : ANACOM のプロットステップ幅。入力しなければ $p = 1$ に設定される。全プロットステップ数は 2000 点以下。

(注) 例えば、全計算ステップが20,000ステップの時には、 $p \geq 10$ でなければならない。

- 7) t_0 (F10.0): 計算開始時刻 (sec)。
- 8) t_{\max} (F10.0): 計算終了時刻 (sec)。
- 9) Δt_A (F10.0): ANACOM 計算時間ステップ (sec)。
- 10) t_s (F10.0): 計算強制打切時刻 (sec)。

(注) t_s で時刻を指定すれば、その時刻における状態変数ベクトル X 等をリスタートファイルにダンプする。

(3) カード3および4

ANACOM の可変プリントステップ間隔を指定するためのデータ t_i (8F10.0) および ℓ_i (8I10) を入力する。時刻 t_{i-1} から t_i まではステップ間隔 ℓ_i でプリントされる。

(注) ここで、プリント間隔を指定すると、4) の ℓ で指定した固定のプリント間隔は無視される。固定の場合にはカード3および4を入力しない。

5.2.3 ANACOM データ・ブロック

このデータ・ブロックは、ANACOM で使用する各ユニットを定義し、必要なデータを与えると共に、各ユニット間の結合状態を指定するためのものである。

各ユニットの入力データ様式を Table 6 に示す。また、Table 2 をあわせて参照されたい。入力データは通常、ユニット識別記号 (SUM 等)、ユニット識別番号、出力ブランチ番号 (X_0 又は ℓ_0)、入力ブランチ番号 (X_i 又は ℓ_i)、パラメータの順になっている。ここで、 X は状態変数を入・出力するブランチ番号を、 ℓ は論理変数 (0 又は 1) を入・出力するブランチ番号をそれぞれ意味する。以下では、上記の形式以外のユニットデータについて説明する。

- 1) E, STP, TIME, および XIN については入力ブランチ番号が指定されない。逆に、OUTL, OUTP, OUTS については出力ブランチ番号が指定されない。
- 2) SUM, ESW, AND, OR, SW, COMP では複数の入力ブランチ番号が指定される。
- 3) FG では、入力ブランチ番号のデータに続いて折れ線を定義するデータ組数が入力される。このカードに引き続いて、 (x_i, y_i) のデータ対を必要数入力する。
- 4) POLY では、入力ブランチ番号のデータに続いて多項式の次数 + 1 が入力される。このカードの後に、各次数の係数を低次の方から順に入力する。
- 5) DLY では、遅れ時間を定義する n (ステップ数) が必要となる。遅れ時間は $n \Delta t_A$ で定義される。ここで、 Δt_A は ANACOM の計算ステップ幅である。
- 6) XIN, OUTL, OUTP, および OUTS では変数名の定義 (3A4) および単位の定義 (2A4) を行うためのデータが入力できる。特に、OUTL および OUTP では、これらのデータはプリント出力および図形出力を行う際のタイトルとして使用される。
- 7) XIN は、XIN で定義される変数の初期値を設定するためのデータを入力することができる。

Table 7 はユニット・データの作成手順を説明したものである。まず、アナログ計算機を使用する場合と同様の回路図を作成する。次に、各ユニットに対し出力ブランチ番号をつける。これらの出力ブランチ番号はそれぞれ異ったものでなければならない。次に、各ユニットに対しユニ

ット識別番号をつける。ユニット識別番号は各種ユニット内で重複するものがなければよい。ここでは、各出力ブランチ番号に対応した番号をつけることを勧める。最後に、Table 6 の入力様式に従い、ユニット・データを作成する。

Table 3 JCL for the run of NSRR digital simulator

```

00100 //JCLG JOB
00200 // EXEC JCLG
00300 //SYSIN DD DATA,DLM='++'
00400 // JUSER 95402943,KI.ISHIJIMA,0934.01
00500 T.3 C.2 I.3 W.3 SRP
00600 OPTP PASSWORD=NSRR2943
00700 //FORT77 EXEC FORT77,SO='J2943.ACUPDT',A='ELM(*)'
00710 //LINK EXEC LKED77
00720 //RUN EXEC GO,OBSIZE=137
00721 //FT05F001 DD DSN=J2943.ANACOM.DATA(TEST04),DISP=OLD
00730 // EXPAND DISK,DDN=FT02F001
00740 // EXPAND DISKTN,DDN=FT03F001,DSN=J2943.ANAPL2,UNIT=TSSWK
00741 //* EXPAND DISKTO,DDN=FT03F001,DSN=J2943.ANAPL2
00750 // EXPAND DISKTN,DDN=FT04F001,DSN=J2943.EXCPL2,UNIT=TSSWK
00760 //* EXPAND DISKTO,DDN=FT04F001,DSN=J2943,EXCPL2
00770 // EXPAND DISK,DDN=FT09F001
00771 // EXPAND DISK,DDN=FT10F001
00772 // EXPAND DISK,DDN=FT11F001
00773 // EXPAND DISK,DDN=FT12F001
00774 // EXPAND DISK,DDN=FT13F001
00800 ++
00900 //

```

Table 4 JCL for NSRR digital simulator plot routine

```

0100 //JCLG JOB
0200 // EXEC JCLG
0300 //SYSIN DD DATA,DLM='++'
0400 // JUSER 95402943,KI.ISHIJIMA,0934.01
0500 T.2 C.2 I.3 W.2 SRP GRP
0600 OPTP PASSWORD=NSRR2943
0700 //FORT77 EXEC FORT77,SO='J2943.ANAPLT',A='ELM(*)'
0710 //LINK EXEC LKED77,GRLIB=PNL
0720 //RUN EXEC GO
0730 //FT05F001 DD DSN=J2943.ANACOM.DATA(PLT1),DISP=OLD
0740 // EXPAND DISKTO,DDN=FT03F001,DSN=J2943.ANAPL1
0750 // EXPAND DISK,DDN=FT11F001
0770 // EXPAND GRNLP,SYSOUT=N
0800 ++
0900 //

```

Table 5 Input data format

1	2	3	4	5	6	7	8
2	3	4	5	6	7	8	0
3	4	5	6	7	8	0	0
4	5	6	7	8	0	5	0
5	6	7	8	0	5	0	0
TITLE							
Title card							
CONTROL							
1	2	3	4	5	6	7	8
2	3	4	5	6	7	8	0
3	4	5	6	7	8	0	0
4	5	6	7	8	0	5	0
5	6	7	8	0	5	0	0
6	7	8	0	5	0	0	0
7	8	0	5	0	0	0	0
8	0	5	0	0	0	0	0
9	0	5	0	0	0	0	0
0	5	0	0	0	0	0	0
ANACOM							
Data for ANACOM (Element data)							
EXCURS							
Data for EXCURS							
END							
1	2	3	4	5	6	7	8
2	3	4	5	6	7	8	0
3	4	5	6	7	8	0	0
4	5	6	7	8	0	5	0
5	6	7	8	0	5	0	0
6	7	8	0	5	0	0	0
7	8	0	5	0	0	0	0
8	0	5	0	0	0	0	0
9	0	5	0	0	0	0	0
0	5	0	0	0	0	0	0

Table 6 Unit data input format

	1	2	3	4	5	6	7	8										
	1	2	3	4	5	6	7	8										
12345	0	5	0	0	0	0	0	0										
SUM	Unit	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀						
INT	ID No.	X ₀	X ₁	C(F10.0)	← Initial value													
POT		X ₀	X ₁	k(F10.0)	← Multiplier													
MULT		X ₀	X ₁	X ₂														
DIV		X ₀	X ₁	X ₂														
ESW		X ₀	X ₁	X ₂	I ₁													
SQR		X ₀	X ₁															
FBL		X ₀	X ₁															
ABS		X ₀	X ₁															
MAX		X ₀	X ₁															
MIN		X ₀	X ₁															
DZ		X ₀	X ₁	A(F10.0)	B(F10.0)	← Lower and upper limits												
LMT		X ₀	X ₁	A(F10.0)	B(F10.0)	← Lower and upper limits												
LOGT		X ₀	X ₁															
LOGN		X ₀	X ₁															
SIN		X ₀	X ₁															
COS		X ₀	X ₁															
EXP		X ₀	X ₁															
E		X ₀	a(F10.0)		← Constant													
STP		X ₀	a(F10.0)		tc(F10.0)		← Step value and time when it generates											
12345	1	0	5	2	0	3	0	5	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8

Table 6 (Continued)

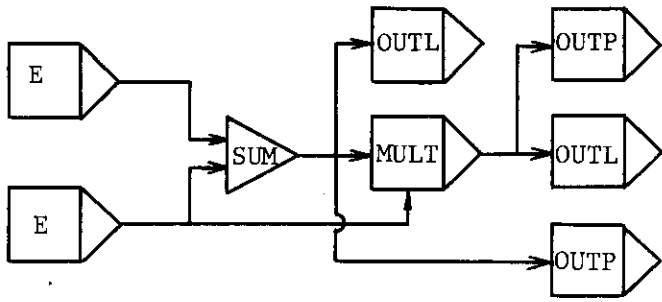
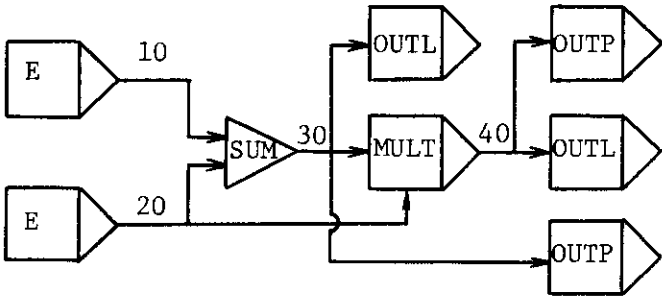
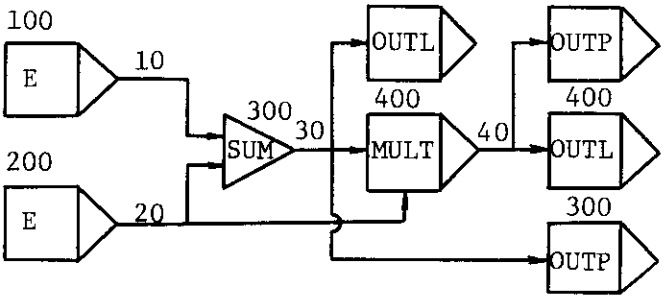
1	2	3	4	5	6	7	8					
1	5	0	2	0	1	5	0					
DER	Unit	X ₀	X ₁	τ(F10.0)	← Gain							
FLG	ID No.	X ₀	X ₁	τ(F10.0)	C(F10.0)	← Time constant and initial value						
FG	(I5)	X ₀	X ₁	n(I5)	← Number of data pairs							
	x ₁ (F10.0)	y ₁ (F10.0)	x ₂	y ₂	x _n	y _n					
POLY	ID No.	X ₀	X ₁	n(I5)	← Order of polynomial + 1							
	a ₀ (F10.0)	a ₁ (F10.0)	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇				
NOT	ID No.	I ₀	I ₁									
AND	(I5)	I ₀	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀
OR		I ₀	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀
SW		X ₀	X ₁	I ₁								
TIME		X ₀										
COMP		I ₀	X ₁	X ₂								
XIN		X ₀			NAME(3A4)	DIM(2A4)	C(F10.0)	← Initial value				
DLY		X ₀	X ₁		n(I5)	← t _d = nΔt _A						
OUTL			X ₁		NAME(3A4)	DIM(2A4)						
OUTP			X ₁		NAME(")	DIM(")						
OUTS			X ₁		NAME(")	DIM(")						
BSSL		X ₀	X ₁									
SPLN		X ₀	X ₁									
SMP		X ₀	X ₁		t _s (F10.6)	← Sampling time						
1	2	3	4	5	6	7	8					
1	0	5	2	0	1	0	0					
1	2	3	4	5	6	7	8					
1	0	5	2	0	1	0	0					

Table 6 (Continued)

1	1	2	3	4	5	6	7	8
2	5	0	5	0	5	0	5	0
3								
4								
5								
PSTP	Unit IDNo.	X ₀	X ₁					

(Note) X₀ : Output branch number (State variable) I5
 X₁ ~ X₁₀ : Input branch number (") I5
 I₀ : Output branch number (Logical variable) I5
 I₁ ~ I₁₀ : Input branch number (") I5

Table 7 Procedure of make-up of unit data

Procedure	Result
<p>Step 1</p> <p>Draw the circuit for calculation</p>	
<p>Step 2</p> <p>Specify output branch numbers</p>	
<p>Step 3</p> <p>Specify unit numbers</p>	
<p>Step 4</p> <p>Prepare unit data</p>	<pre> E 100 10 E 200 20 SUM 300 30 10 20 MULT 400 40 20 30 OUTL 300 30 SUMMER OUT OUTL 400 40 MULTIPLIER OUT OUTP 300 30 SUMMER OUT OUTP 400 40 MULTIPLIER OUT </pre>

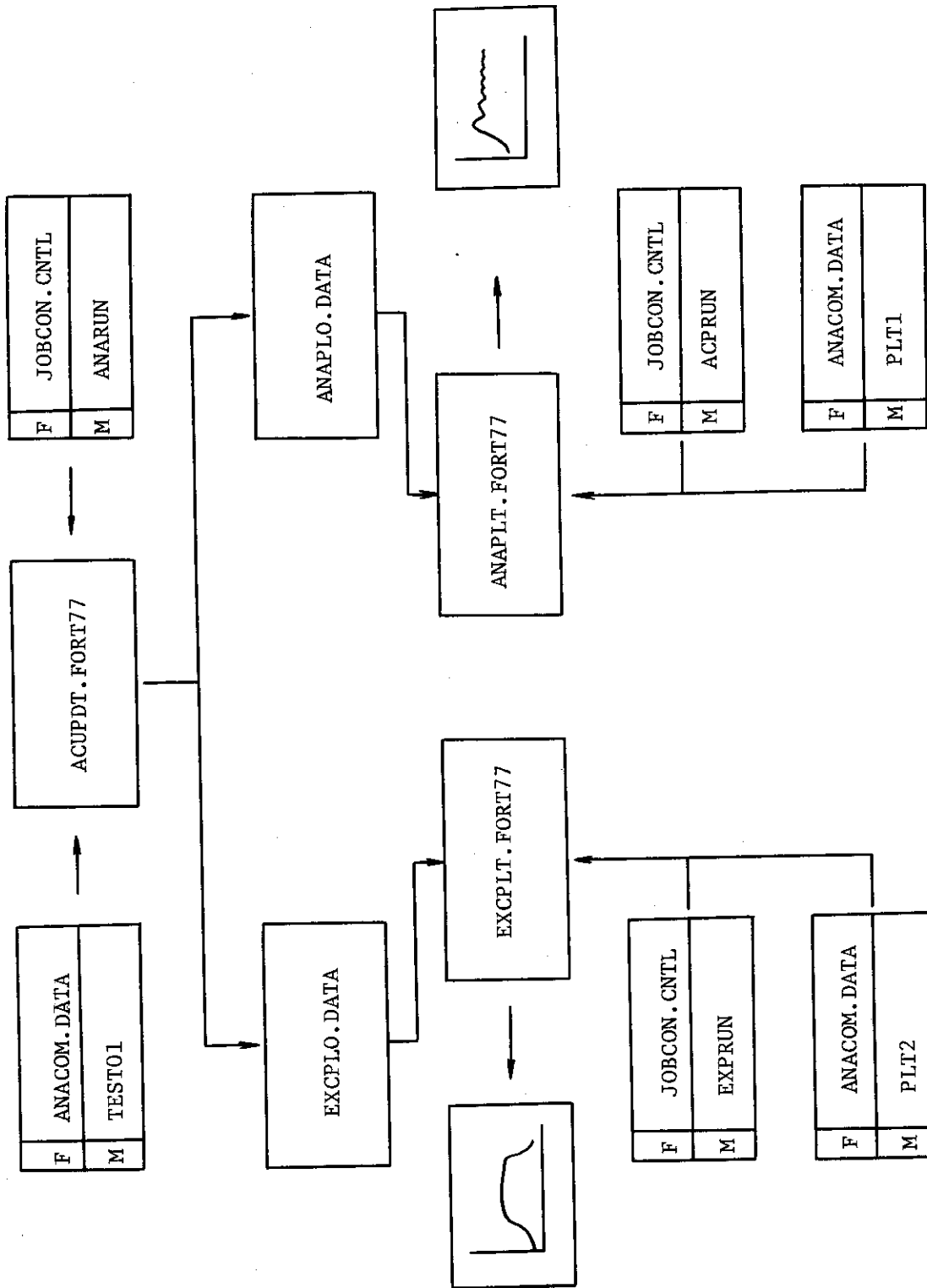


Fig. 11 Files for NSRR digital simulator

6. ANACOM用プロッター・ルーチンの使用方法

ANACOM用プロッター・ルーチンを用いるためのJCLはTable 4に示した通りである。図形処理に必要なデータのほとんどがFig. 11に示したファイルANAPLOに貯えられ、またプログラムACPLOTにも必要なパラメータがあらかじめ設定されているので、入力データとしては図形処理を行いたい出力ブランチ番号を指定するだけでよい。入力データの様式は以下に示すようなものである。

```
& INPUT  NBRNCH = 〇〇  & END
```

Table 7に示す例では、

```
& INPUT  NBRNCH = 30  & END
```

```
& INPUT  NBRNCH = 40  & END
```

となる。このように、図形出力を行いたい数だけ、上記のデータを繰り返せばよい。ここで注意すべきことは以下の点である。まず、当然のことであるが、図形出力を得たい出力ブランチに対しては、Table 7に示すように、OUTPを用いてその旨宣言し、必要なデータをファイルANAPLOに貯えておくことが必要である。また、図形出力のx軸は時間となり、y軸にはOUTPで指定したタイトルがつけられる。図形出力の例としては、Fig. 18～Fig. 34等を参照されたい。

7. 使用上の注意

以下に、本コードを使用するにあたって注意すべき点をまとめて示す。

7.1 実行モードに関する注意

- (1) ANACOM-EXCURS-NSRR 結合モード (MODE=3) の時には、EXCURS-NSRRの計算時間ステップ (Δt_E) は必ずANACOMの計算時間ステップ (Δt_A) 以下でなければならない。すなわち、

$$\Delta t_E \leq t_A$$

- (2) ANACOM単独モード (MODE=1) の時には、他のプログラム、例えば、EXCURS-NSRRからの入力 (XIN) なしで系の状態が決まるようなデータを与えることが必要である。
- (3) EXCURS-NSRR単独モード (MODE=2) の時には、他のプログラム、例えば、

6. ANACOM用プロッター・ルーチンの使用方法

ANACOM用プロッター・ルーチンを用いるためのJCLはTable 4に示した通りである。図形処理に必要なデータのほとんどがFig.11に示したファイルANAPLOに貯えられ、またプログラムACPLOTにも必要なパラメータがあらかじめ設定されているので、入力データとしては図形処理を行いたい出力ブランチ番号を指定するだけでよい。入力データの様式は以下に示すようなものである。

```
& INPUT  NBRNCH = 00 & END
```

Table 7に示す例では、

```
& INPUT  NBRNCH = 30 & END
```

```
& INPUT  NBRNCH = 40 & END
```

となる。このように、図形出力を行いたい数だけ、上記のデータを繰り返せばよい。ここで注意すべきことは以下の点である。まず、当然のことであるが、図形出力を得たい出力ブランチに対しては、Table 7に示すように、OUTPを用いてその旨宣言し、必要なデータをファイルANAPLOに貯えておくことが必要である。また、図形出力のx軸は時間となり、y軸にはOUTPで指定したタイトルがつけられる。図形出力の例としては、Fig.18～Fig.34等を参照されたい。

7. 使用上の注意

以下に、本コードを使用するにあたって注意すべき点をまとめて示す。

7.1 実行モードに関する注意

- (1) ANACOM-EXCURS-NSRR 結合モード (MODE=3) の時には、EXCURS-NSRRの計算時間ステップ (Δt_E) は必ずANACOMの計算時間ステップ (Δt_A) 以下でなければならない。すなわち、

$$\Delta t_E \leq t_A$$

- (2) ANACOM単独モード (MODE=1) の時には、他のプログラム、例えば、EXCURS-NSRRからの入力 (XIN) なしで系の状態が決まるようなデータを与えることが必要である。
- (3) EXCURS-NSRR単独モード (MODE=2) の時には、他のプログラム、例えば、

ANACOMからの入力 (OUTS) なしで系の状態が決まるようなデータを与えることが必要である。

7.2 初期値に関する注意

- (1) XINで指定された出力ブランチの初期値は、ユニット・データで指定しなければ0となる。
- (2) DERで指定された出力ブランチの初期値は0とする。すなわち、DERの入力ブランチの微分係数は0とする。
- (3) 微分方程式系のユニット (INT, FLG) の初期値は入力データで与える。入力がなければ0となる。

7.3 ANACOM入力データ作成時の注意

- (1) ユニット識別番号は正の整数とする。ユニット識別番号は同一ユニット内では重複したものがあってはならない。
- (2) 出力ブランチ番号は3桁以下の正の整数とする。また、OUTL, OUTP, OUTS以外のユニットの出力ブランチ番号は必ず定義されていなければならない。
- (3) 入力ブランチ番号は3桁以下の正の整数とする。また、E, STP, TIME, XIN以外のユニットの入力ブランチ番号は必ず定義されていなければならない。
- (4) OUTLで指定できるプリント出力の変数は8個以下とする。
- (5) OUTPで指定できるプロット出力の変数は100個以下とする。
- (6) OUTSで指定できる他ルーチン (EXCURS - NSRR等) への出力は100個以下とする。
- (7) XINで指定できる他ルーチン (EXCURS - NSRR等) からの入力は100個以下とする。
- (8) FGで指定するデータ点 P_i ($i=1\sim n$) の個数は $2 \leq n \leq 50$ とする。
- (9) POLYで指定する多項式の次数は7以下とする。
- (10) DERで指定できる微分ユニット数は20個以下とする。
- (11) INT, FLGで指定する微分方程式系のユニット数は200個以下とする。
- (12) 全ユニット数は1000個以下でなければならない。さらに、ユニットデータ用作業領域のサイズは30,000 wordsであり、全ユニットデータのサイズはこの値を越えることはできない。
- (13) DLYで使用する遅れ時間 t_d は

$$t_d = n \Delta t_A$$

で定義される。ここで、 n は200以下の値でなければならない。

- (14) FLGで用いる時定数 τ は、計算を安定して進めるために Δt_A よりも大きい値を指定した方がよい。

7.4 エラー・メッセージ

NSRR デジタル・シミュレータは、入力データおよび計算の状態に応じて Table 8 に示すようなエラー・メッセージを出す。エラー番号 10 (ユニット識別番号の重複) 以外は、すべて計算打切りとなる。

Table 8 List of error messages

Error No.	Routine	Comment	F/W(*)
10	CHKNUM	ELEMENT NUMBER DUPLICATED	W
100	RDCONT ISTORE	READ ERROR DETECTED IN ANACOM DATA	F
200	RDCONT	ENCOUNTERD END OF FILE WITHOUT END CARD	F
300	IALLOC	LACK OF WORK STORAGE FOR ELEMENT DATA	F
400	CHKOUT	BRANCH OUTPUT DUPLICATED	F
500	CHKIN	BRANCH INPUT UNDEFINED	F
600	ISORT	ORDERING ALGEBRAIC SIMULTANEOUS EQUATIONS IMPOSSIBLE	F
700	ITER	NOT CONVERGED ON APPROXIMATELY SUCCESSIVE METHOD	F
800	INIT	NOT CONVERGED ON CALCULATION FOR STABILITY	F
900	TITLE	INPUT DATA SET EMPTY	F

(Note) (*) F = Fault (Run will not be executed.)
W = Warning (Run will be executed.)

8. サンプル計算

NSRR デジタル・シミュレータの計算能力を試すためにサンプル計算を行った。以下に、サンプル計算の内容と結果について説明する。

8.1 ANACOM 単独ラン (サンプル計算 No.1)

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} + 5x + y &= 0 \\ \frac{dy}{dt} + 3y - x &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

という連立一次微分方程式の解は、初期値を $x_0 = 1$, $y_0 = 1$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} x &= e^{-4t} (1 - 2t) \\ y &= e^{-4t} (1 + 2t) \end{aligned} \right\} \quad (8.2)$$

で与えられる。

Fig. 12 は、方程式 (8.1) を解くための回路図を示したものである。Table 9 に、Fig. 12 に基づいて作成した入力データを示す。計算は、計算ステップ幅を 1 msec とし、0 秒から 5 秒まで実施した。Fig. 13 および Fig. 14 に計算結果を示す。

Table 10 は数値計算の結果と (8.2) 式の厳密解を比較したものである。1 秒までの計算誤差はほぼ 1% 以下であり、5000 ステップ後 (5 秒) での計算誤差は約 3.5% であった。これは、累積誤差によるものの他、計算結果の絶対値が低下したために生じた誤差が加わったものであると考えられる。計算誤差は計算時間ステップを小さくすることによってさらに減少させることも可能であり、ANACOM は単独モードで良好に動作することが示された。

8.2 関数近似ユニット・チェック (サンプル計算 No.2)

NSRR の動特性シミュレーションを行う場合、関数近似の対象となるのは制御棒の S カーブ (制御棒位置の関数としての反応度曲線) である。そこで、BSSL および SPLN ユニットを用いて S カーブの近似曲線の作成を試みた。

S カーブ用データとしては (制御棒位置, 反応度) というデータ対を 160 組与えた。BSSL および SPLN ユニットで作成した S カーブをそれぞれ Fig. 15 および Fig. 16 に示す。BSSL による近似曲線の誤差は反応度で最大 1 セント程度であった。SPLN による近似曲線の誤差もまた 1 セント以下である。曲線の滑らかさにおいては SPLN ユニットの方が格段にまさっている。

8.3 ANACOMとEXCURS - NSRRの結合ラン

ANACOMとEXCURS - NSRRの結合時の計算能力をチェックするために、各種制御方式を用いたNSRRの出力急昇運転のシミュレーション計算を行った。

(1) 閉ループ出力制御 (サンプル計算No.3)

Fig. 17にサンプル計算の回路を示す。また、入力データをTable 11に示す。Table 12はEXCURSデータ・ブロックを示したものであり、以後の計算においてもこのデータ・ブロックを共通して用いた。

ここで、Fig. 17の制御系について簡単に説明する。この制御系では原子炉出力をフィードバックして炉制御を行う閉ループ制御と、制御棒の位置制御により炉制御を行う開ループ制御が可能である。これらの制御様式の切換えはE 7により行う。すなわち、E 7が0であれば開ループ制御、1であれば閉ループ制御となる。開ループ制御では制御棒の位置指令がFG 21より発生され、SUM 30により誤差信号を発生する。誤差信号はPID回路を経由せずにサーボアンプ系へ与えられる。駆動機構 (INT 80) からの出力は、原子炉を経由せずにSUM 30へフィード・バックされる。ただし、駆動機構からの出力は、Sカーブ (FG 22) を経て原子炉へ入力される。閉ループ制御では、原子炉出力指令がSUM 30に与えられる。Fig. 17では原子炉出力指令はE 11で折れまがる2本の直線によって表わされる。誤差信号はPID回路を経てサーボ・アンプへ与えられる。駆動機構の出力はSカーブを経由して原子炉に与えられ、対数出力がSUM 30へフィード・バックされる。

本サンプル計算ではE 7を1として閉ループ制御系で解析を行った。計算は時間ステップ幅を2 m secとし、20秒まで実施した。

計算結果をFig. 18～Fig. 27に示す。Fig. 23に示すように、15 Wから1 MWまでの出力上昇をペリオド1秒で行うように指令を与えたところ、原子炉出力はFig. 18に示すように指令信号にほぼ追従した挙動を示した。ただし、Fig. 19の線形出力より明らかなように、原子炉出力は約11秒の時点で0.06 MW程度のオーバ・シュートを生じている。原子炉出力が1 MWに達した時点での原子炉の積分出力はFig. 20より1.6 MW sec程度である。

本制御系では、5%の原子炉出力のずれに対し、制御棒が最高速度 ($7.5 \text{ cm/sec} \div 157.48 \text{ ユニット/sec}$) で駆動するように制御系のゲインを定めている。Fig. 24に示すように、最大誤差は出力急昇指令を与えた直後に生じており、大きさは約3.8%であった。それに対応して、制御棒は約120 ユニット/sec ($= 5.7 \text{ cm/sec}$) の早さで抜かれている (Fig. 26参照)。Fig. 24～Fig. 27に示すように、誤差信号は急速に低下しており、異常な振動も生じていない。

本サンプル計算の結果より、対数出力を用いた閉ループ制御により、原子炉出力の急昇過程を制御できる可能性が示された。

(2) 開ループ出力制御 (サンプル計算No.4)

本計算では、Fig. 17に示す制御系においてE 7を0に設定し、15 Wから1 MWまでの出力上昇を開ループ出力制御、すなわち、制御棒位置のみを制御する場合についての検討を行った。

この場合の計算結果をFig. 28～Fig. 34に示した。Fig. 30に示すように、制御棒を215 ユニットから300 ユニットまで1秒で引抜き、以後300 ユニットに保持するという指令を与えた

ところ、Fig.33のように制御棒位置は指令通りにほぼ制御された。その結果、原子炉出力はFig.28に示すように8秒後に約1MWに達し、以後ゆるやかに低下した。原子炉出力が1MWに達した時点での積分出力は約1.6MWsecであり、閉ループ出力制御を用いた場合と大差はなかった。しかしながら、開ループ出力制御の方が約4秒早く1MWに上昇した。

開ループ出力の場合の誤差信号を見ると、Fig.31に示すように最大値は約3.2%であり、やはり引抜き開始直後に生じている。制御棒の最高引抜き速度は、Fig.32に示すように100ユニット/sec (= 4.8cm/sec)である。この場合も、原子炉出力や制御系信号の振動はほとんどなく、この方式は一定出力制御との併用により、炉特性改良に伴なうNSRRの原子炉出力制御方式の変更にあたり、考慮すべき制御方式の一つであることがわかった。

Table 9 Input data for sample calculation No.1

```

1234567890112345678902123456789031234567890412345678905123456789061234567890712345678908
TITLE
*** DIFERENTIAL EQUATION SOLUTION CHECK ***
CONTROL 0000000000
1 0 0 5 20 5 0.0 5.0 0.001 0.0
ANACOM
** NETWORK DATA
POT 100 10 40 -5.0
POT 200 20 50 -1.0
POT 300 30 50 -3.0
INT 400 40 60
INT 500 50 70
SUM 600 60 10 20
SUM 700 70 30 40
**
OUTL 400 40 X( T ) * * * *
OUTL 500 50 Y( T ) * * * *
**
OUTP 400 40 X( T ) * * * *
OUTP 500 50 Y( T ) * * * *
**
** END OF NETWORK DATA
END

```


Table 10 Error in sample calculation No.1

Time (sec)	X (t)			Y (t)		
	ANACOM	Exact	Error (%)	ANACOM	Exact	Error (%)
0.005	9.7032×10^{-1}	9.7040×10^{-1}	0.0082	9.9000×10^{-1}	9.9000×10^{-1}	0
0.010	9.4142×10^{-1}	9.4157×10^{-1}	0.016	9.8000×10^{-1}	9.8001×10^{-1}	0.0010
0.015	9.1329×10^{-1}	9.1351×10^{-1}	0.024	9.7001×10^{-1}	9.7002×10^{-1}	0.0010
0.020	8.8590×10^{-1}	8.8619×10^{-1}	0.033	9.6004×10^{-1}	9.6004×10^{-1}	0
0.025	8.5924×10^{-1}	8.5960×10^{-1}	0.042	9.5007×10^{-1}	9.5008×10^{-1}	0.0010
0.030	8.3329×10^{-1}	8.3371×10^{-1}	0.050	9.4012×10^{-1}	9.4014×10^{-1}	0.0021
0.035	8.0803×10^{-1}	8.0850×10^{-1}	0.058	9.3020×10^{-1}	9.3021×10^{-1}	0.0011
0.040	7.8345×10^{-1}	7.8397×10^{-1}	0.066	9.2029×10^{-1}	9.2032×10^{-1}	0.0033
0.045	7.5952×10^{-1}	7.6010×10^{-1}	0.076	9.1042×10^{-1}	9.1044×10^{-1}	0.0022
0.050	7.3623×10^{-1}	7.3686×10^{-1}	0.085	9.0057×10^{-1}	9.0060×10^{-1}	0.0033
0.1	5.3529×10^{-1}	5.3626×10^{-1}	0.18	8.0428×10^{-1}	8.0438×10^{-1}	0.012
0.2	2.6844×10^{-1}	2.6960×10^{-1}	0.43	6.2877×10^{-1}	6.2906×10^{-1}	0.046
0.3	1.1946×10^{-1}	1.2048×10^{-1}	0.85	4.8148×10^{-1}	4.8191×10^{-1}	0.089
0.4	3.9603×10^{-2}	4.0190×10^{-2}	1.46	3.6290×10^{-1}	3.6341×10^{-1}	0.14
0.5	-5.4134×10^{-4}	0	—	2.7013×10^{-1}	2.7067×10^{-1}	0.20
1.0	-1.8315×10^{-2}	-1.8316×10^{-2}	0.0055	5.4654×10^{-2}	5.4947×10^{-2}	0.53
2.0	-9.9567×10^{-4}	-1.0064×10^{-4}	1.07	1.6559×10^{-3}	1.6773×10^{-3}	1.28
3.0	-3.0135×10^{-5}	-3.0721×10^{-5}	1.91	4.2131×10^{-5}	4.3009×10^{-5}	2.04
4.0	-7.6637×10^{-7}	-7.8775×10^{-7}	2.71	9.8434×10^{-7}	1.0128×10^{-6}	2.81
5.0	-1.7901×10^{-8}	-1.8550×10^{-8}	3.50	2.1861×10^{-8}	2.2673×10^{-8}	3.58

Table 11 Input data for sample calculation No.3

1 2 3 4 5 6 7 8
 123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

TITLE

*** CLOSED LOOP CONTROL SIMULATION PERIOD=1.0 SEC MODKFFIED LOGIC ***

CONTROL 0000000000 0 0 1
 3 0 0 50 20 5 0.0 20.0 0.004 0.0
 0.1 20.0
 1 10

ANACOM

** NETWORK DATA

TIME 100 10

** SWITCH 0.0=OPEN , 1.0=CLOSED

E 70 7 1.0
 E 110 11 -11.10746
 E 230 23 13.81551
 E 270 27 2.70805
 FIG 510 51 76 0.010 0.0
 FIG 520 52 51 0.010 0.0
 FIG 530 53 70 0.025 0.0
 FIG 550 55 40 0.010 0.0
 FIG 560 56 99 0.005 0.0

**

COMP 120 12 10 11

**

Table 11 (Continued)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890
SUM	180	18	14	27				
SUM	200	20	19	24				
SUM	300	30	75	62				
SUM	350	35	65	85				
**								
POT	610	61	52	3157.895				
POT	620	62	77	-1.0				
POT	650	65	55	1.0				
POT	660	66	65	0.001				
**								
ESW	750	75	21	20	7			
ESW	760	76	40	35	7			
ESW	770	77	80	56	7			
**								
SW	140	14	10	13				
SW	190	19	18	13				
SW	240	24	23	12				
**								
INT	800	80	53	212.5				
INT	850	85	66	0.0				
**								
LOGN	990	99	15					

Table 11 (Continued)

1234567890 ¹	1234567890 ²	1234567890 ³	1234567890 ⁴	1234567890 ⁵	1234567890 ⁶	1234567890 ⁷	1234567890 ⁸
OUTL 150	15 XIN 1	...	(POWER)				
OUTL 160	16 XIN 2	...	(NVT)				
OUTL 750	75 ESW 75	...	(REFRNC)				
OUTL 400	40 DIV 40	...	(ERROR)				
OUTL 760	76 ESW 76	...	(SIGNAL)				
OUTL 700	70 LMT 70	...	(VELOCT)				
OUTL 800	80 INT 80	...	(RODPOS)				
OUTL 220	22 FG 22	...	(REACTV)				
OUTP 150	15 XIN 1	...	(POWER)				
OUTP 160	16 XIN 2	...	(NVT)				
OUTP 750	75 ESW 75	...	(REFRNC)				
OUTP 400	40 DIV 40	...	(ERROR)				
OUTP 760	76 ESW 76	...	(SIGNAL)				
OUTP 700	70 LMT 70	...	(VELOCT)				
OUTP 800	80 INT 80	...	(RODPOS)				
OUTP 220	22 FG 22	...	(REACTV)				

**

** END OF NETWORK DATA

EXCURS

EXCURS DATA BLOCK

END

Table 12 EXCURS data block

NSRR DIGITAL SIMULATOR INPUT DATA LIST

LINE NO.	1	2	3	4	5	6	7	8
51	OUTL	400	40	DIV 40...	(ERROR)			
52	OUTL	760	76	ESW 76...	(SIGNL)			
53	OUTL	700	70	LMT 70...	(VELOC)			
54	OUTL	800	80	INT 80...	(RODPS)			
55	OUTL	220	22	FG 22...	(REACT)			
56	OUTP	250	25	FG 25...	(CLOSED)			
57	OUTP	750	75	ESW 75	*****			
58	OUTP	760	76	ESW 76	-----			
59	OUTP	770	77	ESW 77	+++++++			
60	OUTP	700	70	LMT 70				
61	OUTP	800	80	INT 80				
62	OUTP	220	22	FG 22				
63	OUTP	400	40	DIV 40				
64	OUTP	650	65	PDT 65	(PDT)			
65	OUTP	950	95	DER 95	(DER)			
66	EXCURS							

67	POWER RISE	15	WATT (INIT 212.5	CAP 0.0	PUL 0.0)			
68	0	0	0	1	0	1		
69		7	0	0	0	0		
70	212.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	0.0	435.294	1.0	489.412	4.0	489.412		
72	7.3	532.353	10.6	575.0	14.0	624.667		
73	40.0	624.667						
74		1						
75	20.0	50.0						
76		1						
77	20.0	0.002						
78		1	100	1	1			
79	0.1	E 00 0.0	0.3	E-02 0.1	E-09 0.1	E-01		
80	0.1	E-03 0.1	E-04 0.73	E-02 0.30	E-04 0.0	E+00		
81	0.0	E+00 0.0	E+00 0.2	E 02 0.5	E-03 0.1	E+01		
82	0.1	E+01 0.1	E+01 0.1	E+01 0.1	E+01 0.1	E+01		
83	0.1	E+01 0.330	E-01 0.2190	E+00 0.1960	E+00 0.3950	E+00		
84	0.1150	E+00 0.42	E-01 0.1244	E-01 0.3051	E-01 0.1114	E+00		
85	0.3013	E+00 0.11362	E+01 0.30135	E+01 0.1	E+01 0.0			
86	0.0	E+00 0.4772	E+00 0.5	E-01-0.1	E+01 0.0	E 00		
87	0.38	E+02 0.0	E+00 0.588	E+03 0.11	E+30 0.15	E-30		
88	0.2	E+00 0.0	0.0	0.0	0.128	E-03		
89	0.0	E+00-0.1	E+01 0.3	E-02-0.1	E+01 0.53	E+02		
90	0.2	E-01 0.1147	E+03 0.1	E+02-0.35	E-01 0.1044	E-01		
91	0.85	E-01-0.818	E-04-0.65	E-07 0.716	E-10 0.782	E+01		
92	0.138	E+00 0.172	E+00 0.864	E+00 0.307	E+00 0.465	E-01		
93	0.782	E+01 0.138	E+00 0.1356	E+00 0.38	E+02 0.84	E+01		
94	0.0	E+00-0.05	0.0	0.1	E+01-0.1	E+01		
95	0.1	E-01 0.2726	E-03 0.2726	E-06 0.2	E 02 0.9	E+01		
96	0.370	E 03 0.9999999E+30	0.8	E 00 0.1	E 01 0.8	E 03		
97	0.2	E 01 0.1	E-02 0.2	E 01 0.1	E+01 0.1	E 01		
98	0.0	E+00 0.5	E 03 0.1	E+01 0.0	E+00 0.696	E+02		
99		101	189	1	1			
100	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03			

EXCURS DATA BLOCK

NSRR DIGITAL SIMULATOR INPUT DATA LIST

LINE NO.	1	2	3	4	5	6	7	8
101	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
102	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0		
103	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
104	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
105	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
106	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
107	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0		
108	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
109	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
110	0.536	E-01 0.0	E+00 0.0	E+00 0.325	E-01 0.3429	E-04		
111	0.0	E+00 0.1322	E-02 0.5375	E-05-0.2313	E-07 0.325	E-01		
112	0.3429	E-04 0.0	E 00 0.6112	E+01 0.0	E+00 0.0	E+00		
113	0.7909	E 01-0.433	E-03 0.0	E 00 0.1000337E+01	E+01-0.7005	E-04		
114	-0.3533	E-05 0.7909	E 01-0.433	E-03 0.0	E 00 0.794	E-01		
115	0.1617	E-03 0.0	E+00 0.1157	E 00 0.4478	E-04 0.0	E 00		
116	0.100075	E+01-0.125	E-03 0.1875	E-05 0.1157	E+00 0.4478	E-04		
117	0.0	E 00 0.2665	E-02 0.7297	E-05 0.2373	E-08			
118		201	206	1	1			
119	0.66	E+30 0.0	0.0	0.000	0.000			
120	0.000							
121		301	353	1	1			
122	0.274	E+00 0.275	E+00 0.1779	E+01 0.1822	E+01 0.1873	E+01		
123	0.219	E+01 0.222	E+01 0.13753	E+01 0.38	E+02 0.74	E+01		
124	0.1	E+02 0.2	E+01 0.15	E+02 0.344	E-01 0.65	E+01		
125	0.72	E-01 0.539	E-01 0.6112	E+01 0.976	E-01 0.36	E-01		
126	0.78	E+01 0.12	E+00 0.1364	E-02 0.1	E+01 0.1	E+01		
127	0.36	E-01 0.78	E+01 0.12	E+00 0.05	E+00 0.23	E-02		
128	0.6477	E-04 0.757809	E-04 0.25	E+02 0.1	E+01 0.5	E-01		
129	0.5	E-01 0.5	E-01 0.852	0.854	0.856			
130	0.862	0.868	0.875	0.884	0.895			
131	0.913	0.936	0.865	0.996	1.041			
132	1.096	1.192	1.292					
133		369	370	1	1			
134	0.0	E 00-0.1	E 01					
135		371	384	1	1			
136	-0.1	E 01-0.1	E 01 0.5452	E+01 0.36	E+01 0.1	E 01		
137	0.29	E+01 0.0	E 00 0.23	E 03 0.58	E 03 0.2	E 00		
138	0.0	E 00 0.95	E 03 0.11	E 06 0.13	E 06			
139		391	397	-1	1			
140	0.1	E 01 0.1145	E 01 0.4318	E-04 0.505206	E-04 0.0	E 00		
141	0.5	E 07 1.50	E+01					
142	END							

LINE NO.	1	2	3	4	5	6	7	8
----------	---	---	---	---	---	---	---	---

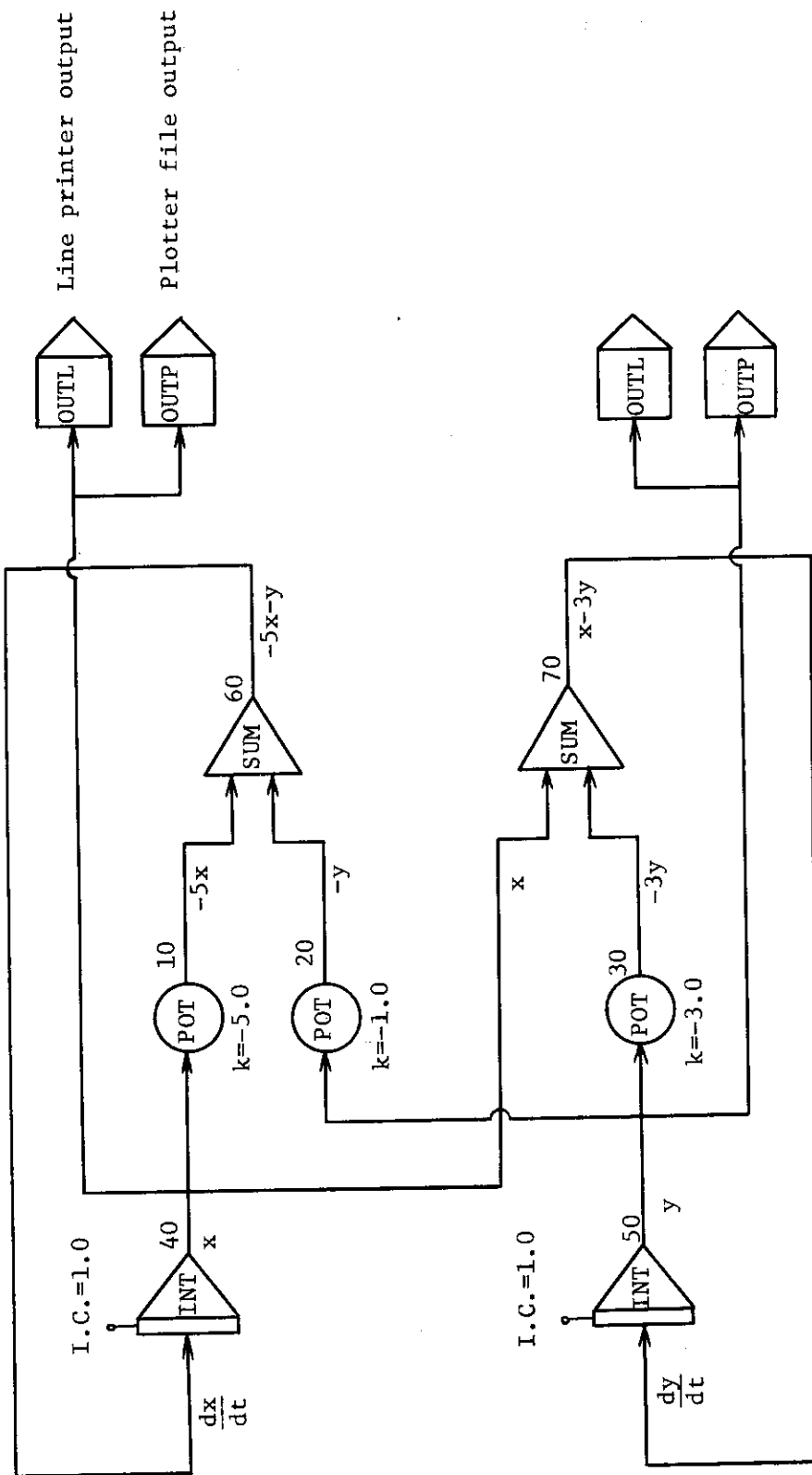
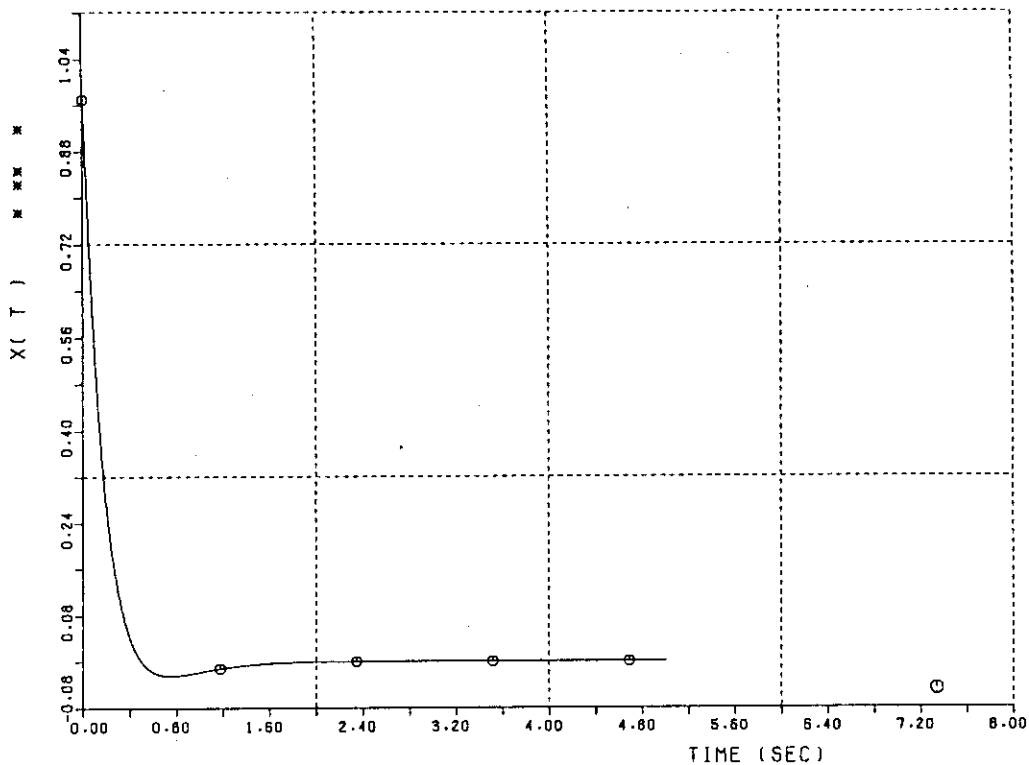


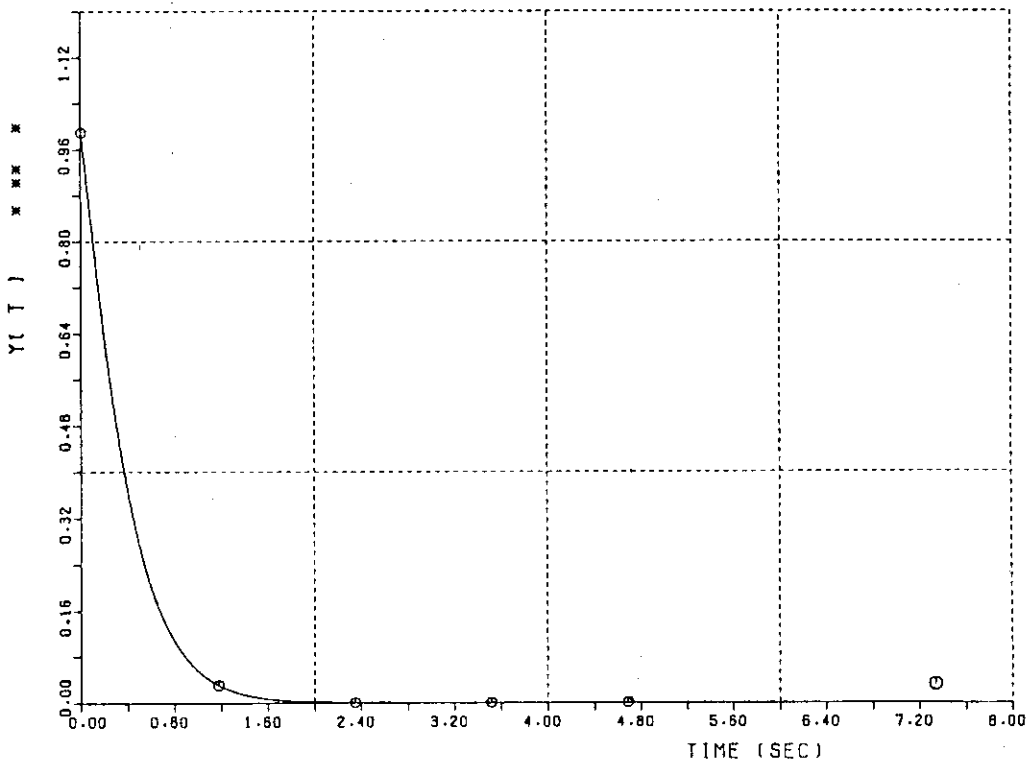
Fig. 12 Diagram for the calculation of a system of differential equations



*** DIFFERENTIAL EQUATION SOLUTION CHECK ***

PL 1

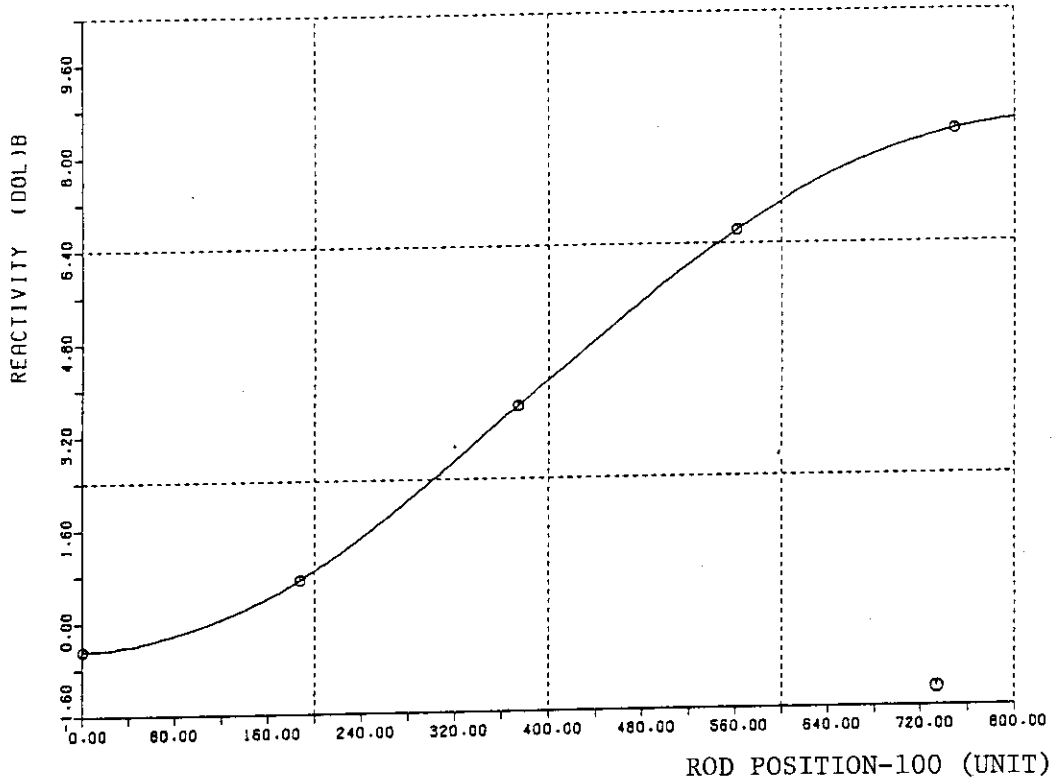
Fig. 13 Result of sample calculation No.1 (x (t))



*** DIFFERENTIAL EQUATION SOLUTION CHECK ***

PL 2

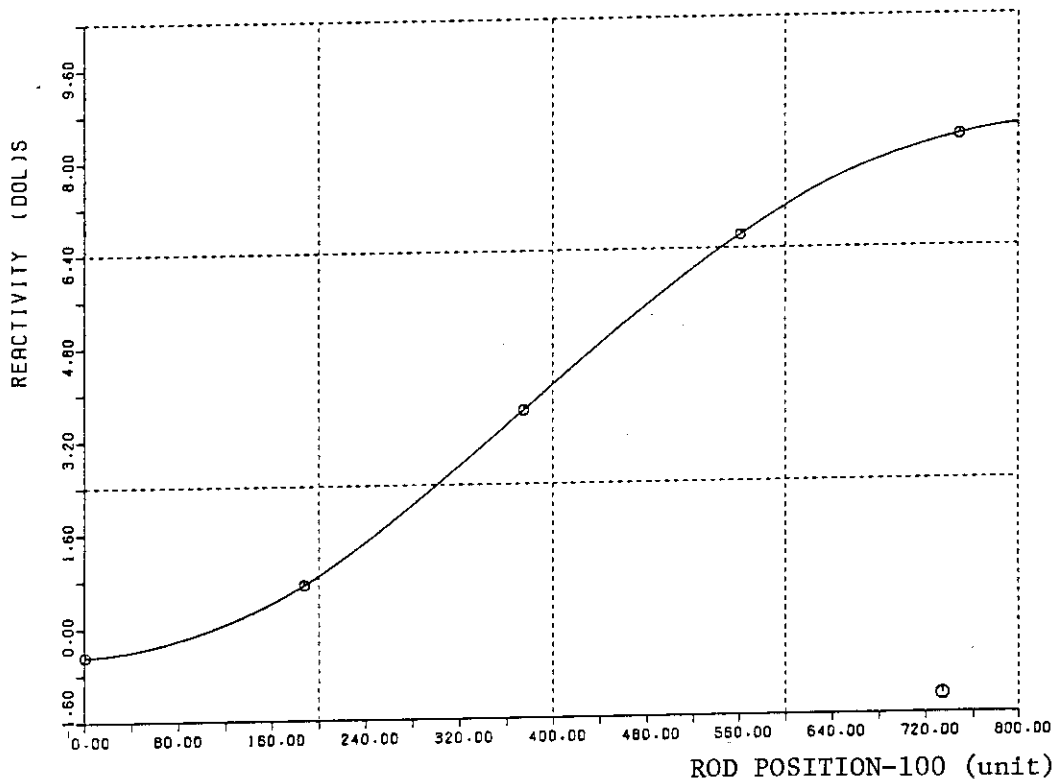
Fig. 14 Result of sample calculation No.1 (y (t))



*** SCURVE CHECK CALCULATION--SCURVE CHECK ***

PL 1

Fig. 15 Scurve calculated by BSSL unit



*** SCURVE CHECK CALCULATION--SCURVE CHECK ***

PL 2

Fig. 16 Scurve calculated by SPLN unit

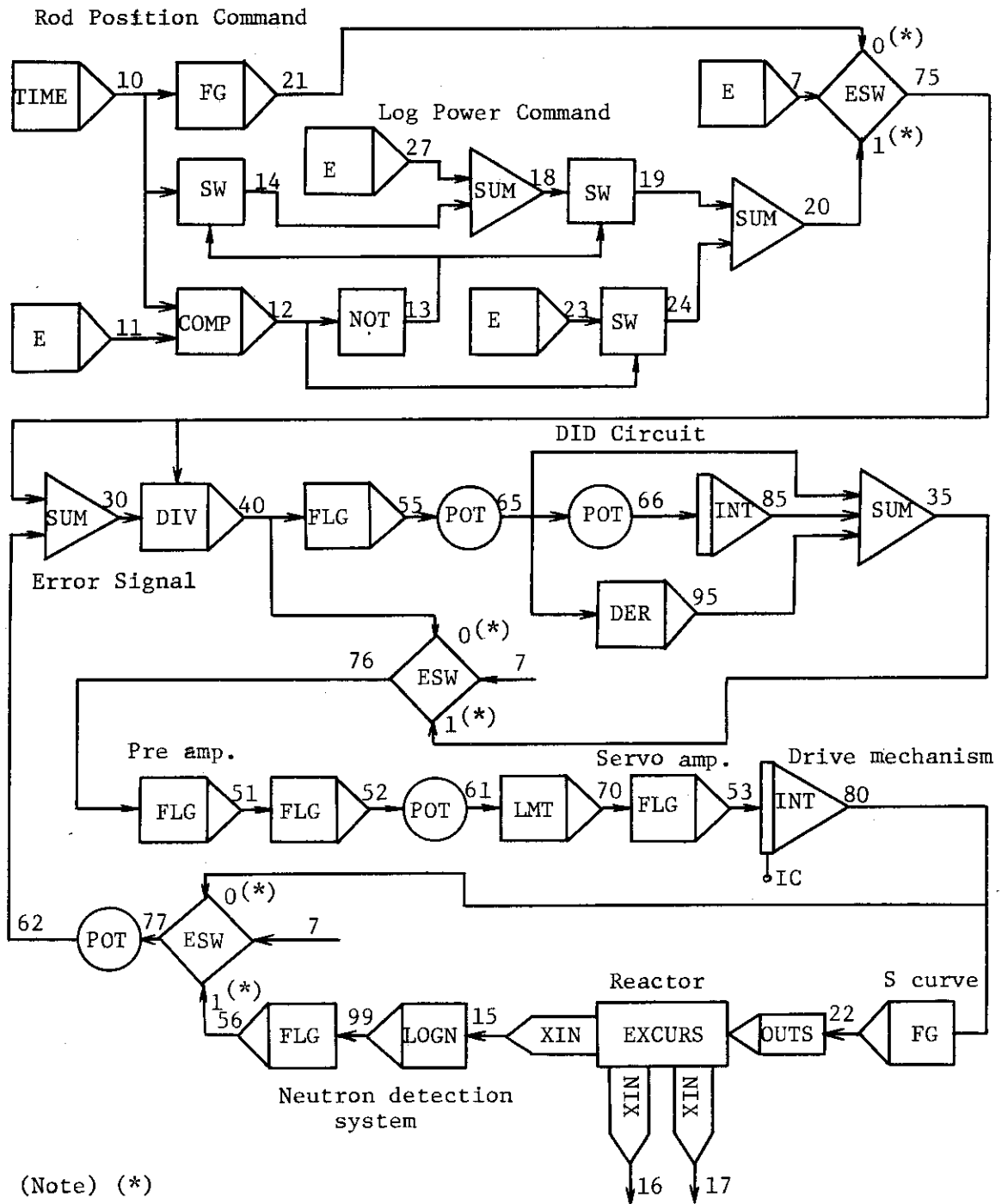
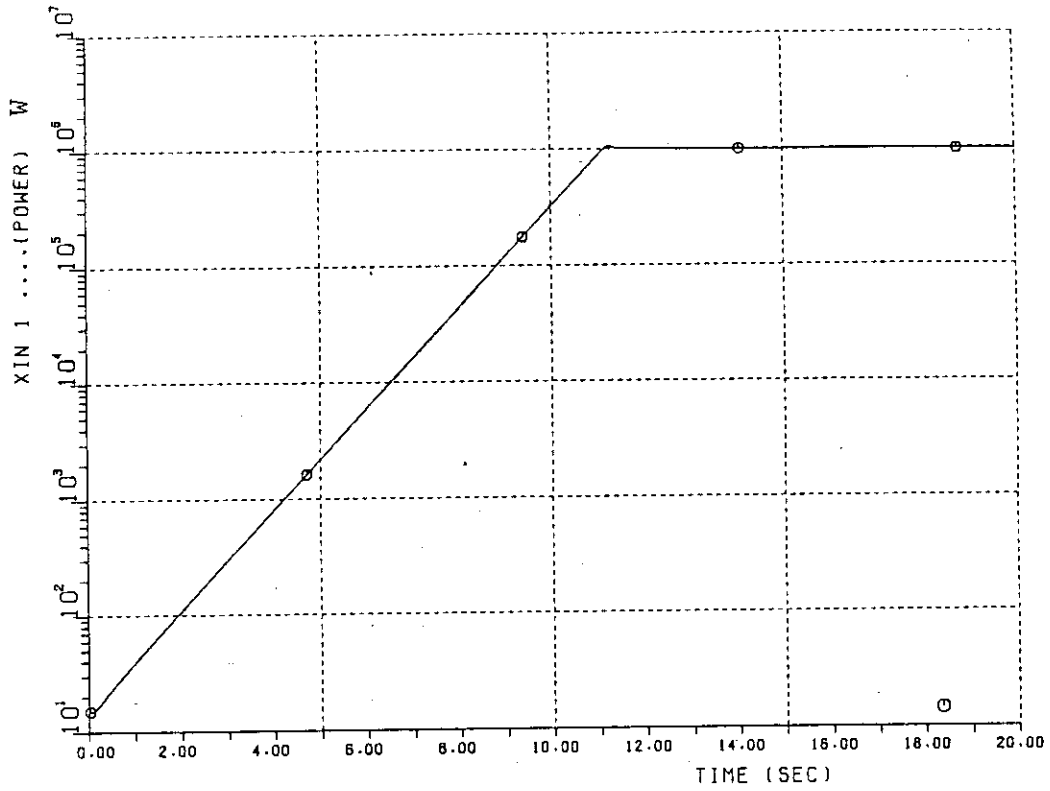


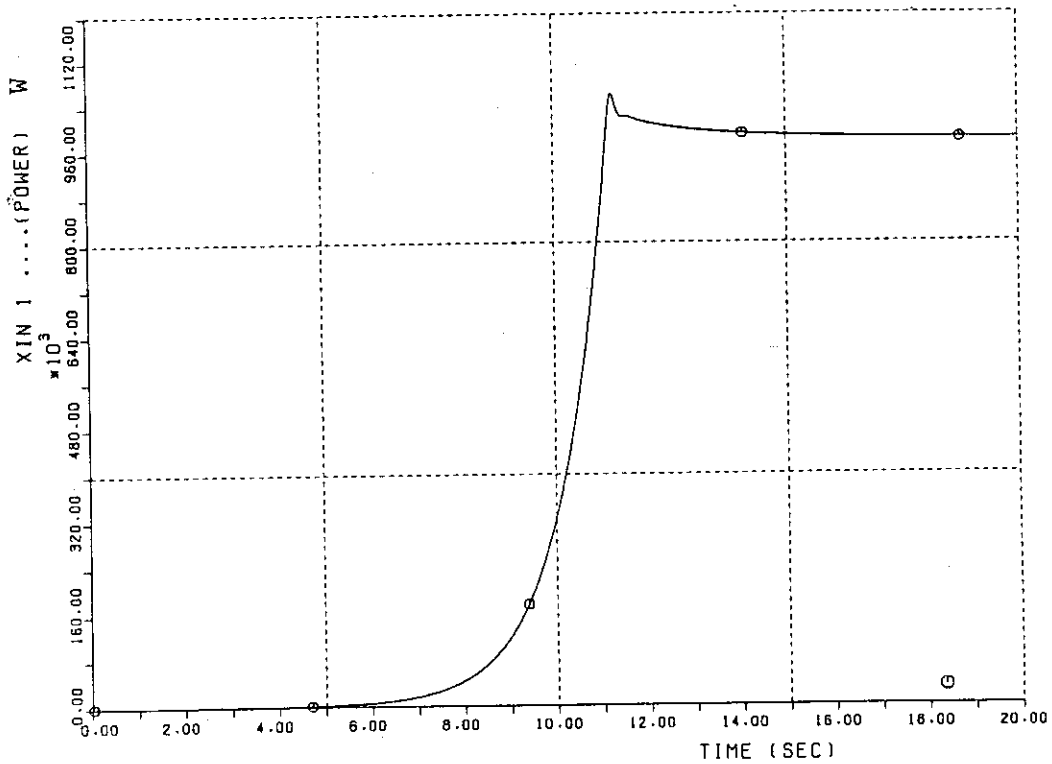
Fig. 17 Diagram for Sample Calculation No.3 & 4



PL 1

*** CLOSED LOOP CONTROL PERIOD = 1 SEC MODIFIED LOGIC ***

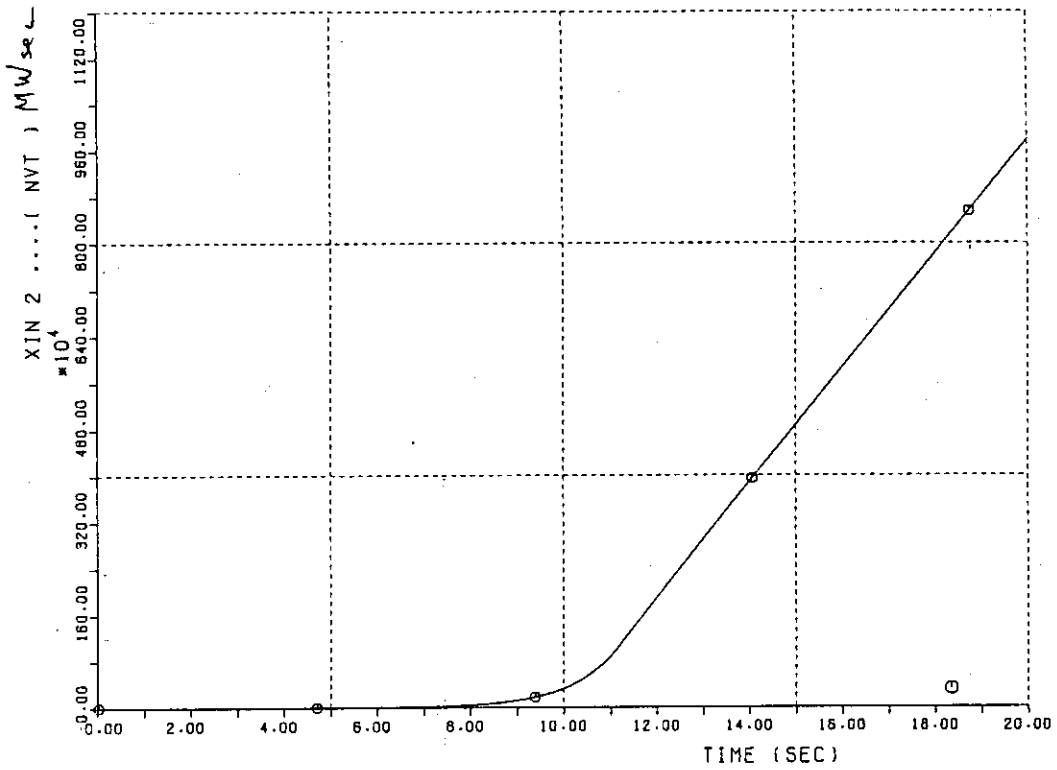
Fig. 18 Result of sample calculation No.3 (Reactor power)



PL 2

*** CLOSED LOOP CONTROL PERIOD = 1 SEC MODIFIED LOGIC ***

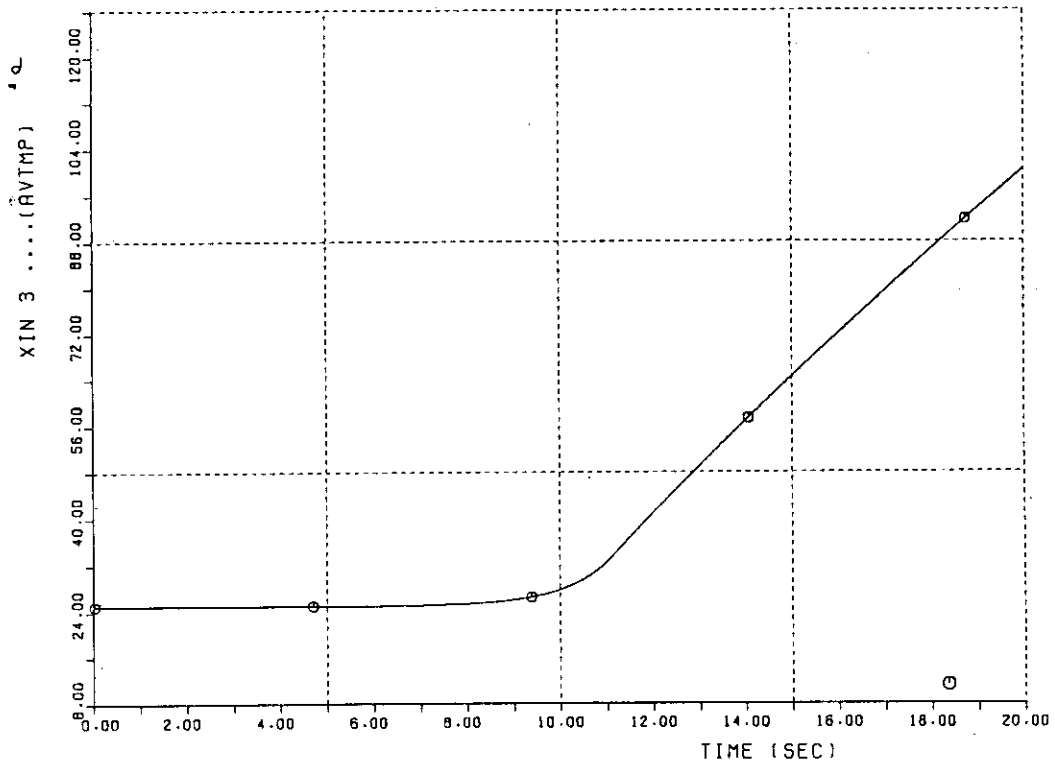
Fig. 19 Result of sample calculation No.3 (Reactor power)



PL 3

*** CLOSED LOOP CONTROL PERIOD = 1 SEC MODIFIED LOGIC ***

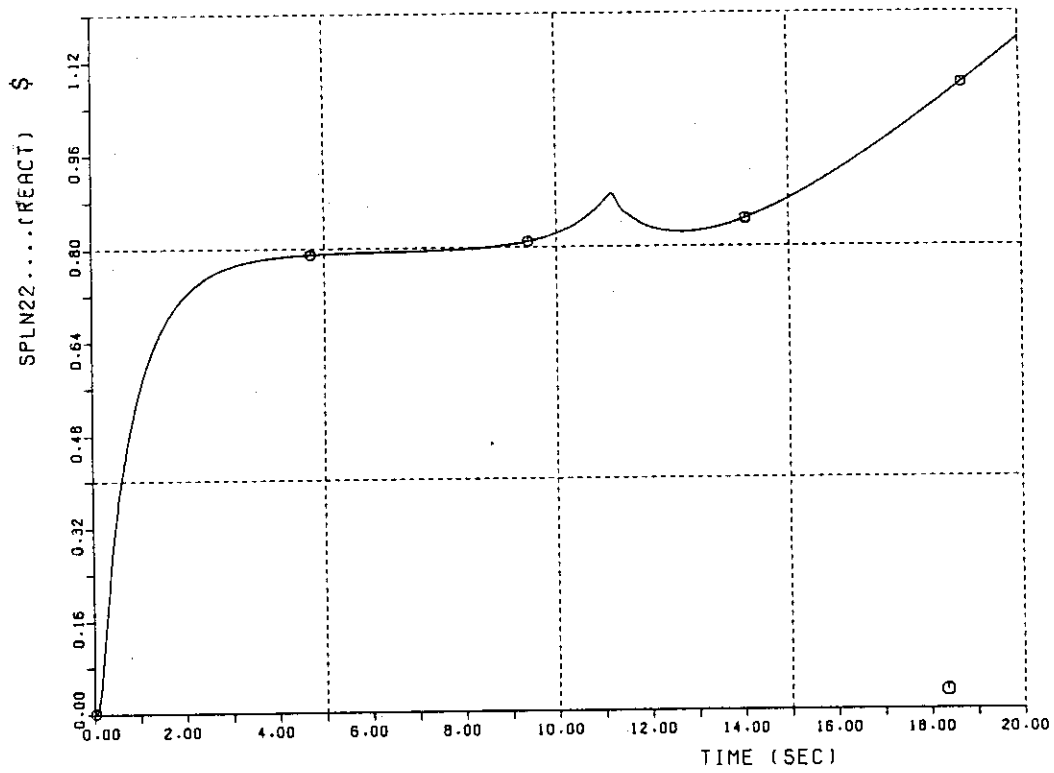
Fig. 20 Result of sample calculation No.3 (Core Energy Release)



PL 4

*** CLOSED LOOP CONTROL PERIOD = 1 SEC MODIFIED LOGIC ***

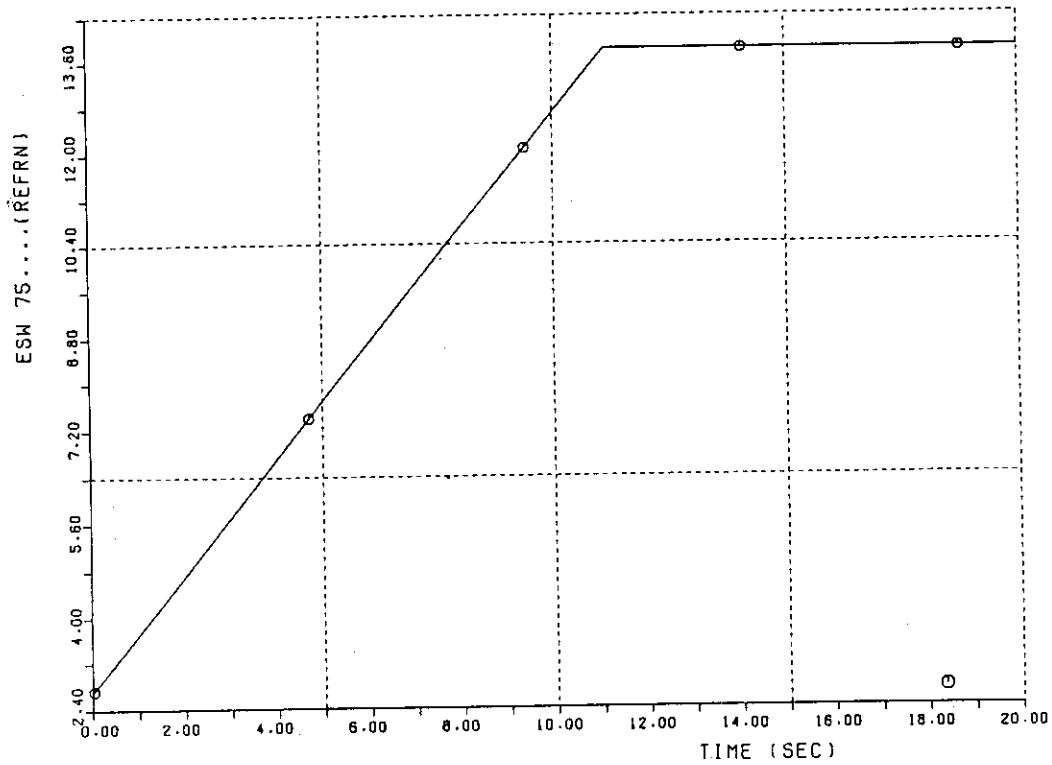
Fig. 21 Result of sample calculation No.3 (Average Fuel Temperature)



PL 5

*** CLOSED LOOP CONTROL PERIOD = 1 SEC MODIFIED LOGIC ***

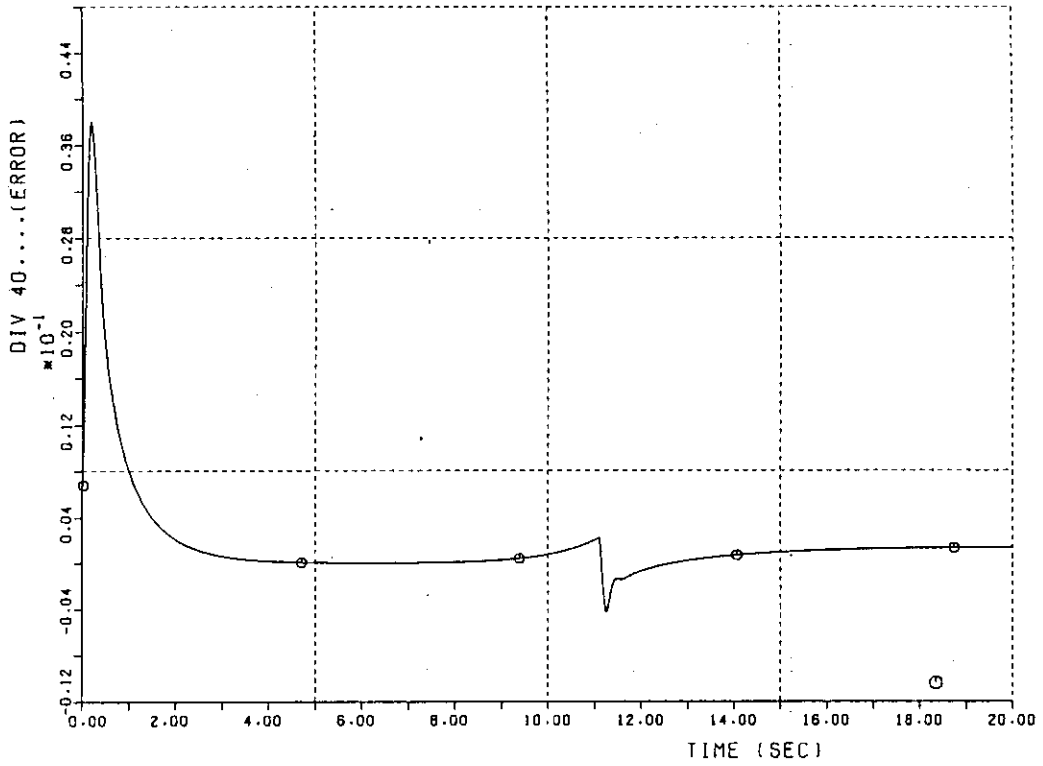
Fig. 22 Result of sample calculation No.3 (Reactivity)



PL 6

*** CLOSED LOOP CONTROL PERIOD = 1 SEC MODIFIED LOGIC ***

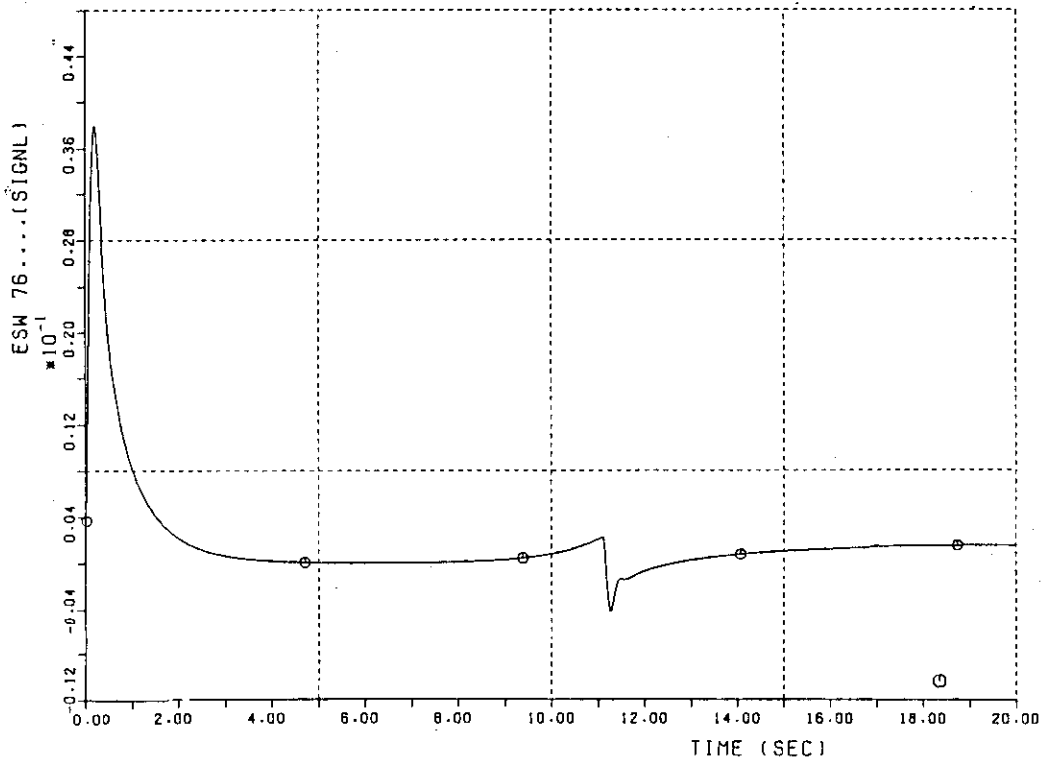
Fig. 23 Result of sample calculation No.3 (Reference signal)



PL 7

*** CLOSED LOOP CONTROL PERIOD = 1 SEC MODIFIED LOGIC ***

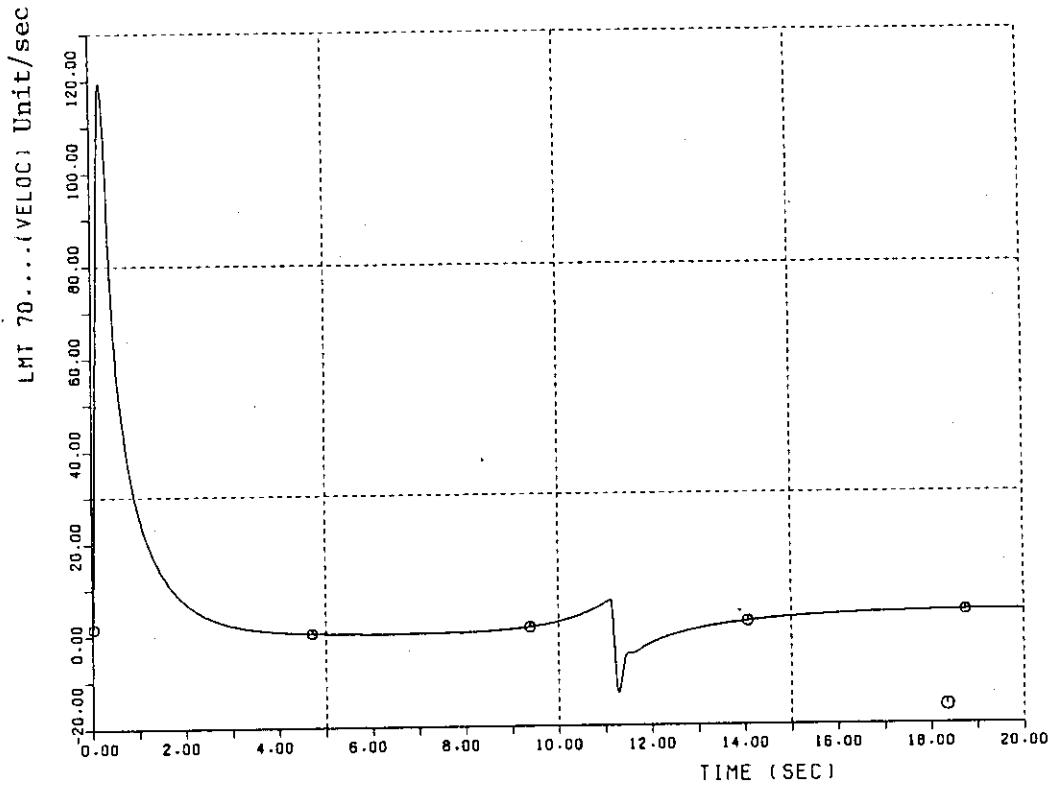
Fig. 24 Result of sample calculation No.3 (Error signal)



PL 8

*** CLOSED LOOP CONTROL PERIOD = 1 SEC MODIFIED LOGIC ***

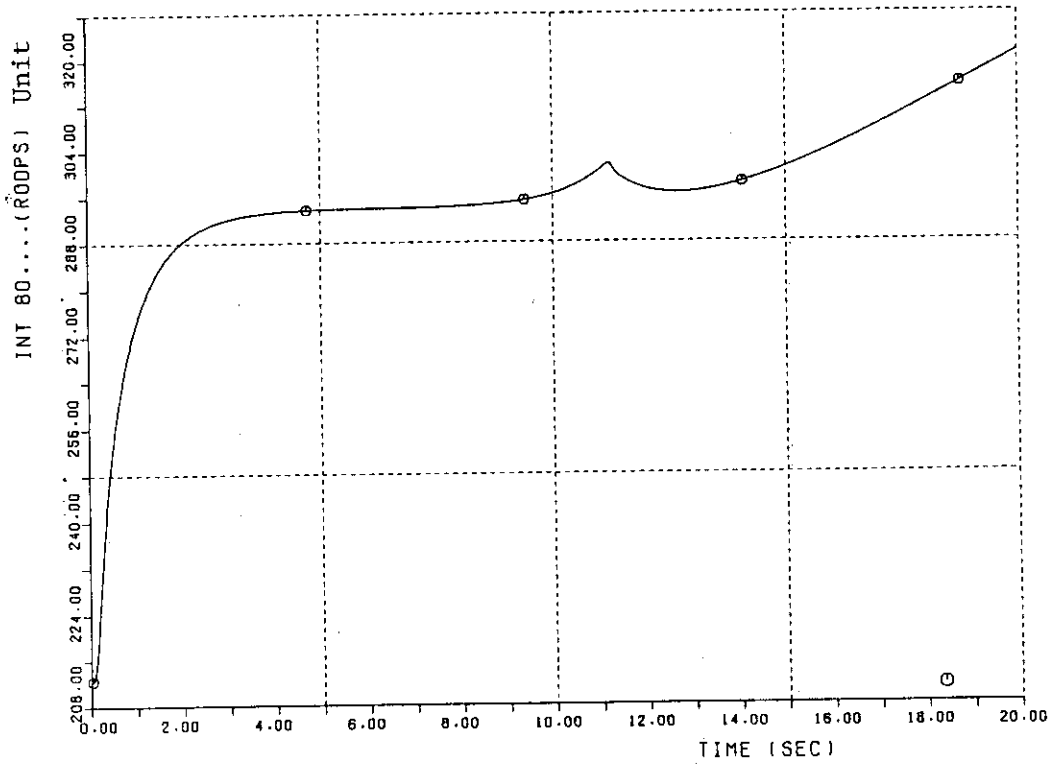
Fig. 25 Result of sample calculation No.3 (PID output)



*** CLOSED LOOP CONTROL PERIOD = 1 SEC MODIFIED LOGIC ***

PL 9

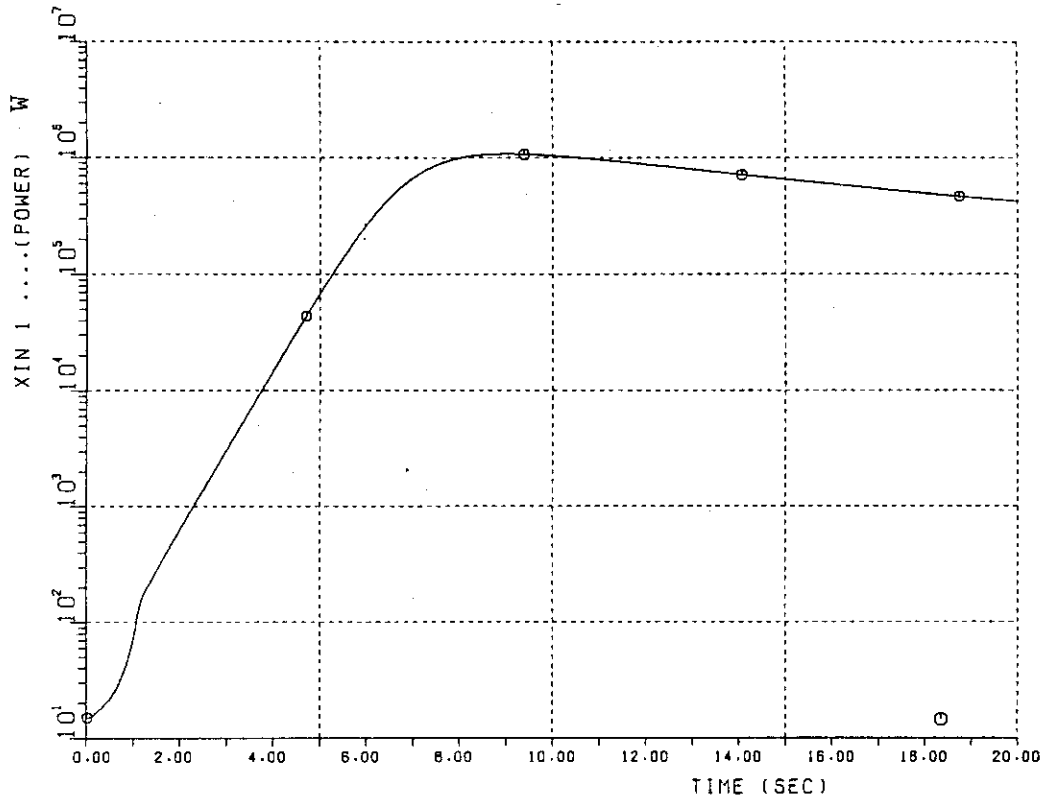
Fig. 26 Result of sample calculation No.3 (Rod velocity)



*** CLOSED LOOP CONTROL PERIOD = 1 SEC MODIFIED LOGIC ***

PL 10

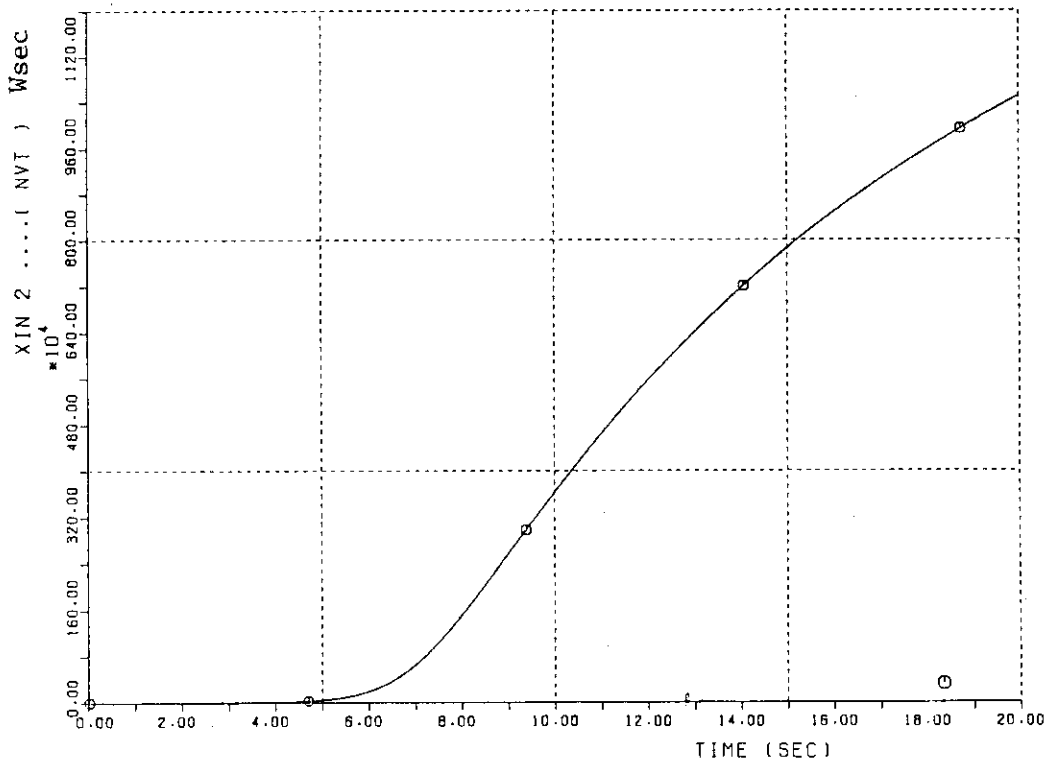
Fig. 27 Result of sample calculation No.3 (Control rod position)



PL 1

*** OPEN LOOP CONTROL PERIOD = * SEC ***

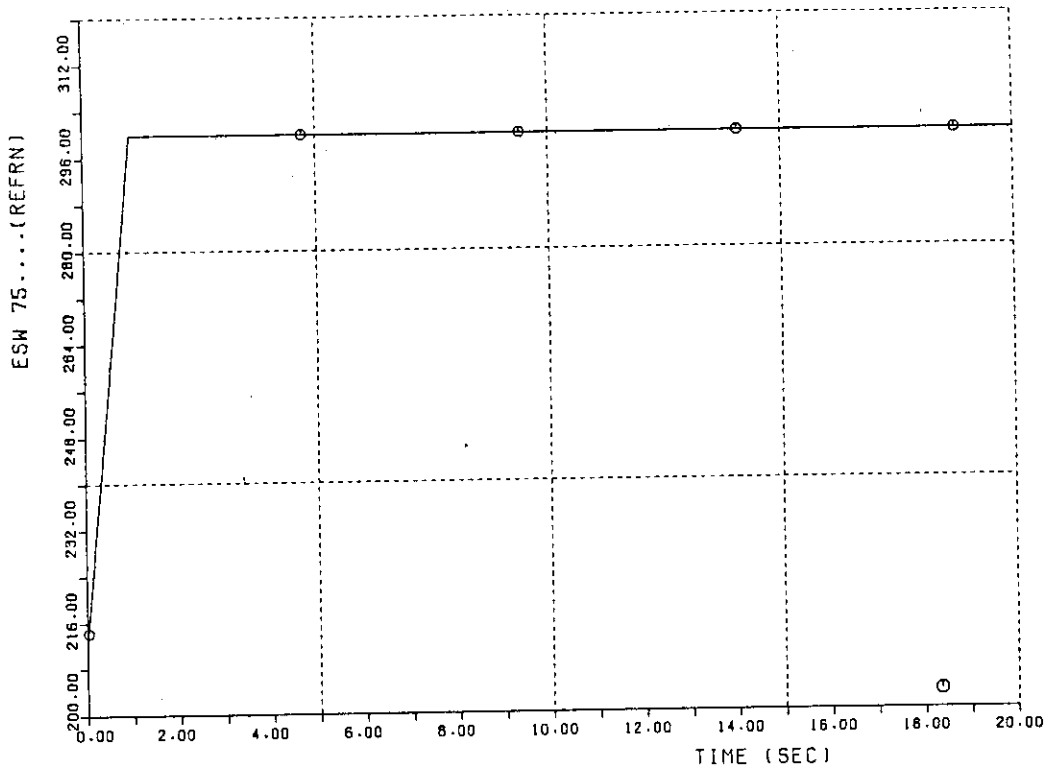
Fig. 28 Result of sample calculation No.4 (Reactor Power)



PL 2

*** OPEN LOOP CONTROL PERIOD = * SEC ***

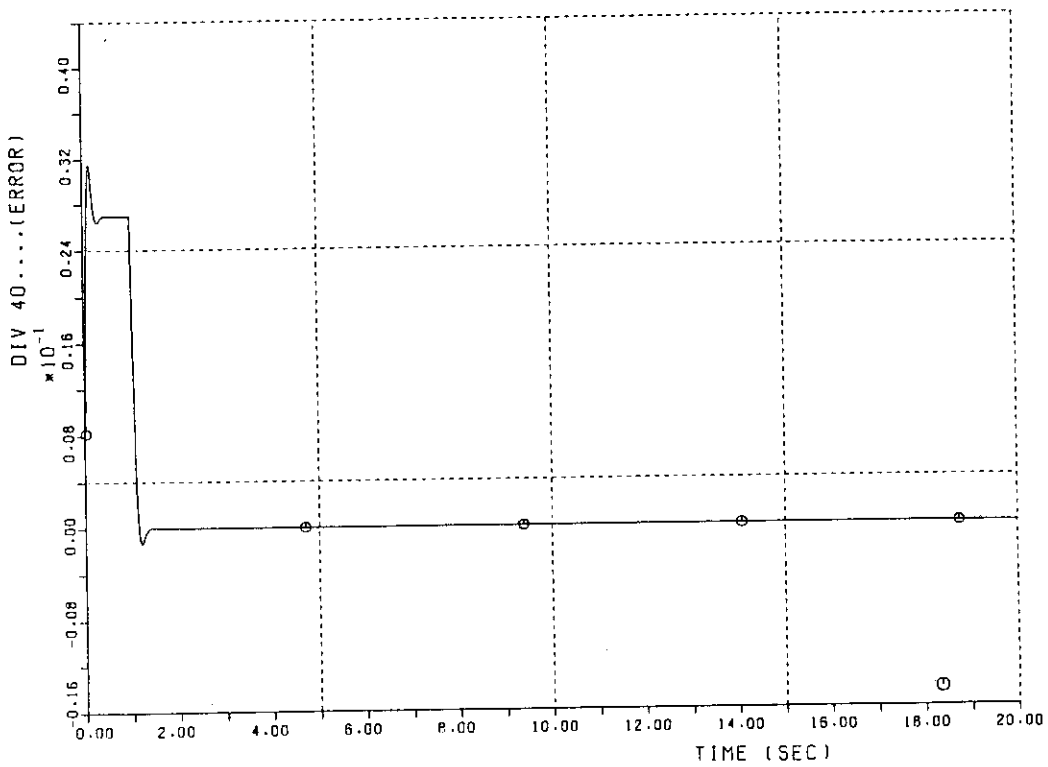
Fig. 29 Result of sample calculation No.4 (Core Energy Release)



*** OPEN LOOP CONTROL PERIOD = * SEC ***

PL 3

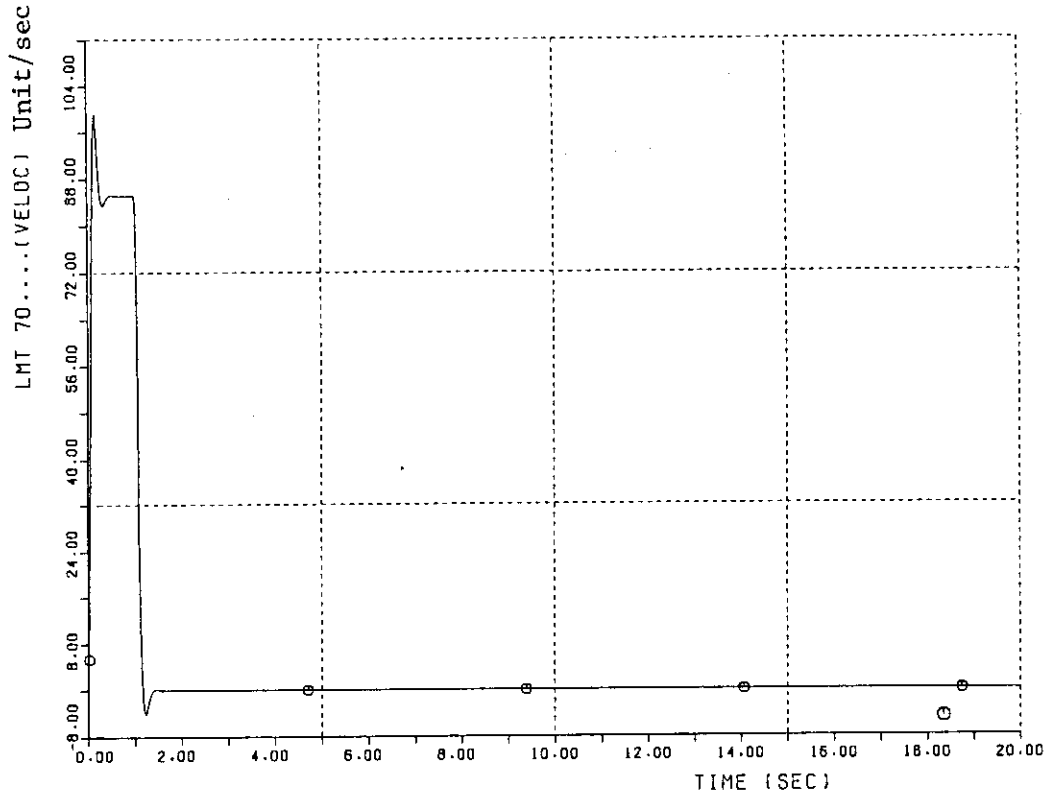
Fig. 30 Result of sample calculation No.4 (Reference Signal)



*** OPEN LOOP CONTROL PERIOD = * SEC ***

PL 4

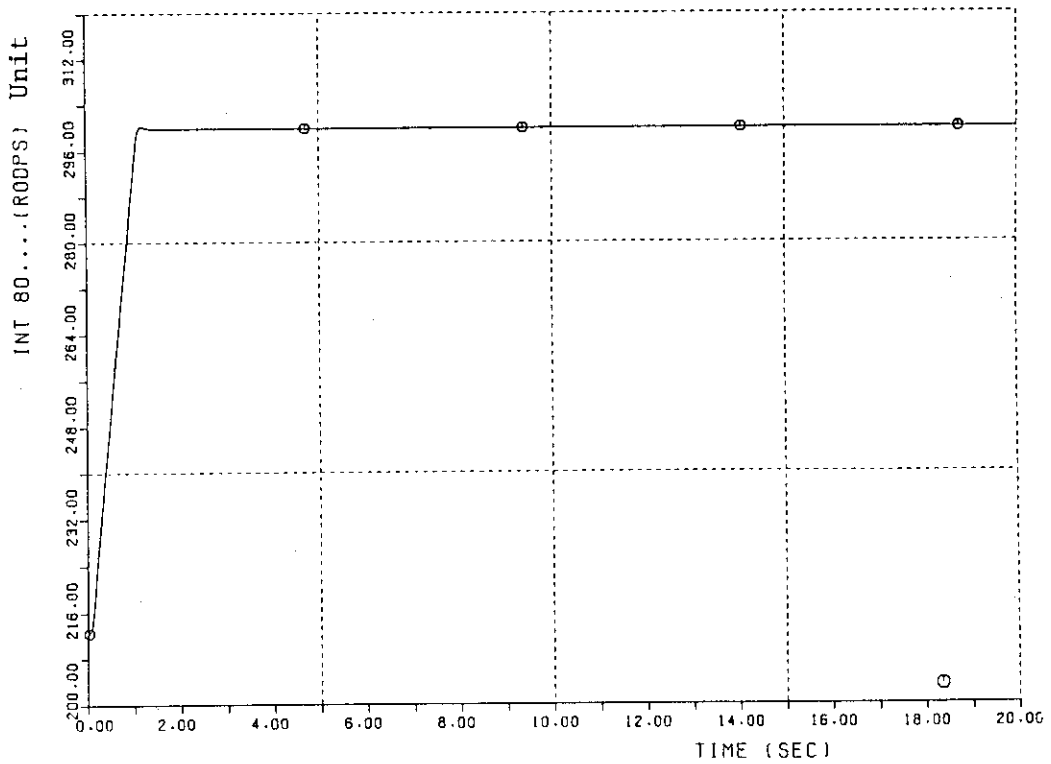
Fig. 31 Result of sample calculation No.4 (Error Signal)



PL 6

*** OPEN LOOP CONTROL PERIOD = * SEC ***

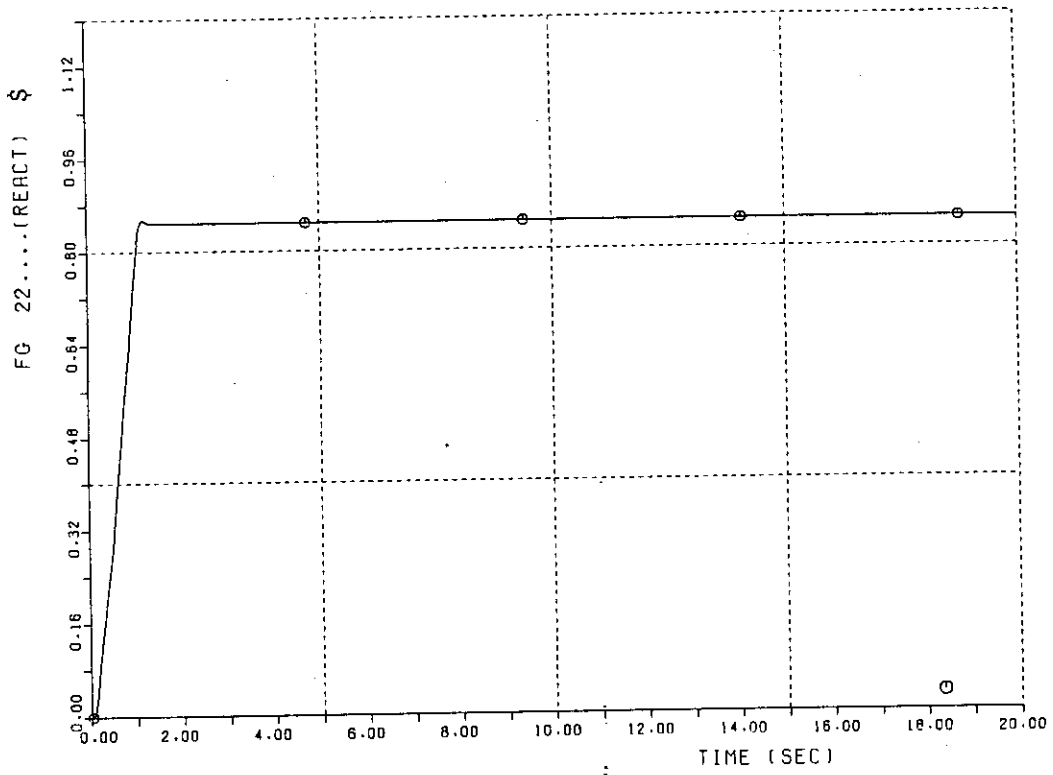
Fig. 32 Result of sample calculation No.4 (Control Rod Velocity)



PL 7

*** OPEN LOOP CONTROL PERIOD = * SEC ***

Fig. 33 Result of sample calculation No.4 (Control Rod Position)



*** OPEN LOOP CONTROL PERIOD = * SEC ***

PL 8

Fig. 34 Result of sample calculation No.4 (Inserted Reactivity)

9. ま と め

NSRRの炉特性改良に伴う原子炉制御系変更設計のため、制御系を含めたNSRRの動特性シミュレーションが可能なNSRRデジタル・シミュレータを開発した。NSRRデジタル・シミュレータは、アナログ計算機と同等の機能を有するデジタル・プログラムであるANACOMと、NSRRの動特性解析用プログラムEXCURS-NSRRを結合し、整理したものである。

ANACOMは以下のような特徴を有している。

- 1) 他の動特性コードとの結合は容易であり、広い範囲での応用が可能である。
- 2) アナログ計算機用の計算回路図をもとに、容易に入力データを作成できる。
- 3) 結線まちがい等のデバッグ機能を豊富に有している。
- 4) ポテンショメータの係数等の設定値は、その数値の大小にとらわれることなく、任意に入力できる。
- 5) アナログ計算機特有のオーバー・フロー現象は、ほとんど生じない。
- 6) 従って、スケール変換の手続きは一切不要であり、何桁にもわたる変数の変化を許容しながら、実際の単位系で設定値を定めることができる。

数例について、NSRRデジタル・シミュレータを用いたサンプル計算を行った。その結果、NSRRの出力急上昇過程の制御方式として、対数出力系を用いたペリオド一定制御、または制御棒位置を制御する開ループ出力制御が有望であるという貴重な知見が得られ、NSRRデジタル・シミュレータが今後の制御系の設計手段の一つとして十分実用に耐えることがわかった。

謝 辞

NSRRデジタル・シミュレータの開発にあたっては、プログラム作成等に関して富士電機原子力エンジニアリング株式会社の高谷純一氏に御協力頂いた。また、反応度安全研究室長齊藤伸三氏には開発の期間中貴重な助言を与えていただいた。以上の方々に対してここに謹んで感謝の意を表わします。

参考文献

- (1) ISHIKAWA, M., et al., : "A Study of Fuel Behavior under Reactivity Initiated Accident Conditions-Review", J. Nucl. Mater. 95 (1980)
- (2) 星鷲雄, 他 : "反応度事故条件下における未照射燃料の破損挙動", 日本原子力学会誌, vol. 20, No.9 (1978)
- (3) 市田浩三他 : "スプライン関数とその応用 : シリーズ新しい応用の数学 20", 教育出版 (1979)
- (4) SAITO, S., : "EXCURS-A Computing Program for Analysis of Core Transient Behavior in a Sodium Cooled Fast Reactor", JAERI-M 7280, (1977)

9. ま と め

NSRRの炉特性改良に伴う原子炉制御系変更設計のため、制御系を含めたNSRRの動特性シミュレーションが可能なNSRRデジタル・シミュレータを開発した。NSRRデジタル・シミュレータは、アナログ計算機と同等の機能を有するデジタル・プログラムであるANACOMと、NSRRの動特性解析用プログラムEXCURS-NSRRを結合し、整理したものである。

ANACOMは以下のような特徴を有している。

- 1) 他の動特性コードとの結合は容易であり、広い範囲での応用が可能である。
- 2) アナログ計算機用の計算回路図をもとに、容易に入力データを作成できる。
- 3) 結線まちがい等のデバッグ機能を豊富に有している。
- 4) ポテンショメータの係数等の設定値は、その数値の大小にとらわれることなく、任意に入力できる。
- 5) アナログ計算機特有のオーバー・フロー現象は、ほとんど生じない。
- 6) 従って、スケール変換の手続きは一切不要であり、何桁にもわたる変数の変化を許容しながら、実際の単位系で設定値を定めることができる。

数例について、NSRRデジタル・シミュレータを用いたサンプル計算を行った。その結果、NSRRの出力急上昇過程の制御方式として、対数出力系を用いたペリオード一定制御、または制御棒位置を制御する開ループ出力制御が有望であるという貴重な知見が得られ、NSRRデジタル・シミュレータが今後の制御系の設計手段の一つとして十分実用に耐えることがわかった。

謝 辞

NSRRデジタル・シミュレータの開発にあたっては、プログラム作成等に関して富士電機原子力エンジニアリング株式会社の高谷純一氏に御協力頂いた。また、反応度安全研究室長齊藤伸三氏には開発の期間中貴重な助言を与えていただいた。以上の方々に対してここに謹んで感謝の意を表わします。

参考文献

- (1) ISHIKAWA, M., et al., : "A Study of Fuel Behavior under Reactivity Initiated Accident Conditions-Review", J. Nucl. Mater. 95 (1980)
- (2) 星 篤 雄, 他 : "反応度事故条件下における未照射燃料の破損挙動", 日本原子力学会誌, vol. 20, No.9 (1978)
- (3) 市田浩三他 : "スプライン関数とその応用 : シリーズ新しい応用の数学 20", 教育出版 (1979)
- (4) SAITO, S., : "EXCURS-A Computing Program for Analysis of Core Transient Behavior in a Sodium Cooled Fast Reactor", JAERI-M 7280, (1977)

9. ま と め

NSRRの炉特性改良に伴う原子炉制御系変更設計のため、制御系を含めたNSRRの動特性シミュレーションが可能なNSRRデジタル・シミュレータを開発した。NSRRデジタル・シミュレータは、アナログ計算機と同等の機能を有するデジタル・プログラムであるANACOMと、NSRRの動特性解析用プログラムEXCURS-NSRRを結合し、整理したものである。

ANACOMは以下のような特徴を有している。

- 1) 他の動特性コードとの結合は容易であり、広い範囲での応用が可能である。
- 2) アナログ計算機用の計算回路図をもとに、容易に入力データを作成できる。
- 3) 結線まちがい等のデバッグ機能を豊富に有している。
- 4) ポテンショメータの係数等の設定値は、その数値の大小にとらわれることなく、任意に入力できる。
- 5) アナログ計算機特有のオーバー・フロー現象は、ほとんど生じない。
- 6) 従って、スケール変換の手続きは一切不要であり、何桁にもわたる変数の変化を許容しながら、実際の単位系で設定値を定めることができる。

数例について、NSRRデジタル・シミュレータを用いたサンプル計算を行った。その結果、NSRRの出力急上昇過程の制御方式として、対数出力系を用いたペリオド一定制御、または制御棒位置を制御する開ループ出力制御が有望であるという貴重な知見が得られ、NSRRデジタル・シミュレータが今後の制御系の設計手段の一つとして十分実用に耐えることがわかった。

謝 辞

NSRRデジタル・シミュレータの開発にあたっては、プログラム作成等に関して富士電機原子力エンジニアリング株式会社の高谷純一氏に御協力頂いた。また、反応度安全研究室長齊藤伸三氏には開発の期間中貴重な助言を与えていただいた。以上の方々に対してここに謹んで感謝の意を表わします。

参考文献

- (1) ISHIKAWA, M., et al., : "A Study of Fuel Behavior under Reactivity Initiated Accident Conditions-Review", J. Nucl. Mater. 95 (1980)
- (2) 星鷲雄, 他 : "反応度事故条件下における未照射燃料の破損挙動", 日本原子力学会誌, vol. 20, No.9 (1978)
- (3) 市田浩三他 : "スプライン関数とその応用 : シリーズ新しい応用の数学 20", 教育出版 (1979)
- (4) SAITO, S., : "EXCURS-A Computing Program for Analysis of Core Transient Behavior in a Sodium Cooled Fast Reactor", JAERI-M 7280, (1977)