

論	文
---	---

UTR-KINKI における原子炉運転特性の データ集録と解析(Ⅰ)

三木良太, 伊藤哲夫, 丹羽健夫,
森嶋彌重, 古賀妙子

Data Acquisition and Analysis of Reactor Operating Characteristics in UTR-KINKI (I)

Ryota MIKI, Tetsuo ITOH, Takeo NIWA,
Hiroshige MORISHIMA and Taeko KOGA

(Received September 28, 1984)

Signals which have direct and/or indirect relation to the safety of a research reactor, UTR-KINKI, are collected from nuclear instrumentation, reactor control system and radiation monitoring system by a computer-controlled data acquisition system. The recorded data are processed and analyzed on-line or off-line to aid the followings: (1) Record of the operating characteristics of reactor and the operation of reactor operator, (2) Monitoring of the characteristics of reactor and early detection and/or diagnosis of malfunctionings, (3) Instruction and warning to the operator, (4) Record of data in the event of misoperation. Some typical examples of the operating characteristics of UTR-KINKI are shown as a set of graphs. Also, to monitor the excess reactivity of reactor, the exact position of control rod (critical point) in the manual critical operation is estimated from the collected data during automatic operation.

KEYWORDS

computer-controlled data acquisition system, nuclear reactor safety, critical point, excess reactivity, operating characteristics, malfunctioning detection

1. 緒 言

本研究の目的は、研究用原子炉施設の核計装・制御系統および放射線モニター系統などからの多種多様な情報信号のうち、原子炉の安全運転に直接または間接に関連をもつ有用なデータを、予め設定したプログラムに従って計算機の制御の下で連続的に収集、記録

し、これらの蓄積されたデータをオン・ラインまたはオフ・ラインで処理、解析することにより、(1)原子炉運転特性と操作状況の記録と表示、(2)炉特性の監視と確認、(3)異常検出と異常診断、(4)運転者に対する指示、警告、(5)誤操作発生時の記録、(6)収録情報のデータ・ベース化など計算機の利用によって研究用原子炉の安全性を向上させる方策を追求することにある。

近畿大炉は熱出力1Wのいわゆるゼロ出力研究炉

三木他：UTR-KINKI における炉運転特性のデータ集録と解析（I）

で、研究実験用以外にも学部学生の炉運転実習や教育実験のため、定常的に利用されている。このため原子炉の起動、停止、出力変更、手動臨界等の操作が頻繁に行われ、他の大学炉の運転パターンとは大きく異っている。更に2分割された燃料タンクの間内部黒鉛反射体領域には、種々の試料、実験装置、検出器などが挿入されることも多い。このような近畿大炉の利用形態から、本研究の第一段階として、UTR-KINKIの運転特性に関する事項をおもな対象として研究を進めた。

2. システム構成の概要

原子炉施設において原子炉の運転操作および運転特

性と関連をもつ情報信号の数は極めて多い。極低出力炉であるため冷却・浄化系などのプロセスシステムをもっていない近畿大炉でも、核計装系統、炉制御系統、スクラム系、インターロック系、警報系などのステータス信号系統、放射線モニター系統およびその他の系統からの情報信号のうち、原子炉の安全性に直接または間接に関係するものとしては、アナログ信号24チャンネル、ステータス・ロジック信号19チャンネル、割り込みロジック信号32チャンネルがある。これらの信号を **Table 1** に示す。表のうち、設計および工事の方法の認可を受け、使用前検査に合格してシステムに接続済みの入力には*を付している。

近畿大炉における運転特性のオン・ライン/オフ・ライン・データ集録・解析システムのシステム・プロ

Table 1 List of the input signals from UTR-KINKI for data acquisition system.

1. 原子炉核計装系統				
起 動 系	レート・メータ	アナログ出力	1	
中 間 出 力 系	Log N 計	*アナログ出力	1	
	ペリオド計	*アナログ出力	1	
線 形 出 力 系	ピコアンメータ	*アナログ出力	1	
	レンジ切替SW	ロジック出力	1	
安 全 系	% 出力計	*アナログ出力	2	
2. 原子炉制御系統				
調 整 棒	位置指示計	*アナログ出力	1	
	操作SW	ロジック出力	2	
シ ム 安 全 棒	位置指示計	*アナログ出力	1	
	操作SW	ロジック出力	2	
安 全 棒 × 2	位置指示灯	ロジック出力	2 × 2	
	操作SW	ロジック出力	1 × 2	
サ ー ボ 系	% 偏差計	*アナログ出力	1	
	手動・自動切替SW	ロジック出力	1	
制 御 棒 電 磁 流	電 流 計	アナログ出力	3	
ク ラ ッ チ 電 流		ロジック出力	3	
3. ステータス表示関係				
ス ク ラ ム 関 係		*ロジック出力	8	
警 報 関 係		*ロジック出力	5	
イ ン タ ー ロ ッ ク 関 係		*ロジック出力	4	
4. その他の計器				
炉 心 温 度 計		アナログ出力	1	
		ロジック出力	1	
水 質 計		アナログ出力	2	
5. 放射線モニター関係				
ガ ス ・ モ ニ タ ー		アナログ出力	1	
ダ ス ト ・ モ ニ タ ー (α)		アナログ出力	1	
ダ ス ト ・ モ ニ タ ー (β・γ)		アナログ出力	1	
水 モ ニ タ ー		アナログ出力	1	
γ線エリア・モニター		アナログ出力	4	
野 外 モ ニ タ ー		アナログ出力	1	
警 報		ロジック出力	9	

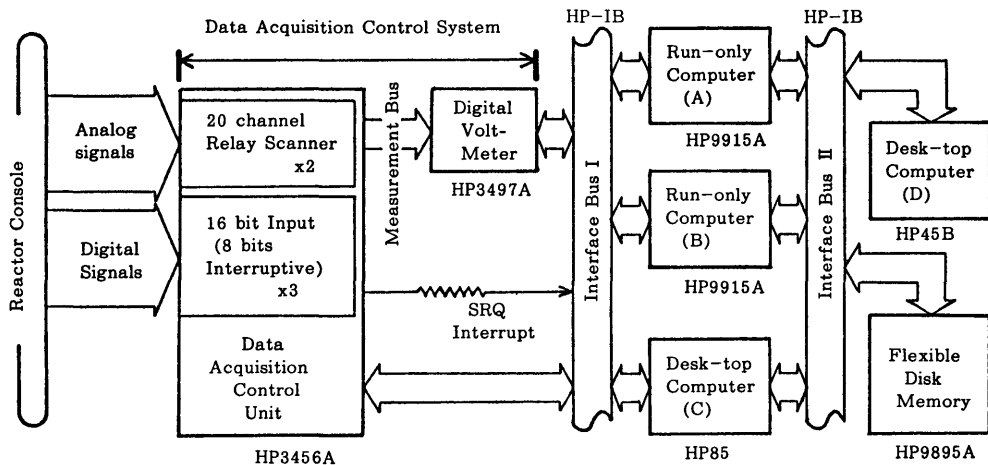


Fig. 1 System block diagram

ック図を Fig. 1 に示す。合計40チャンネルのアナログ入力を取り込むリレー・マルチプレクサ・スキャナーと合計48チャンネルのロジック/割込みロジック入力を取り込むデジタル入力部を備えた多重データ収集コントロール・ユニット、 $1\frac{1}{2}$ 桁デジタル・ボルトメータ、システム・コントローラ・コンピュータ、2台のラン・オンリー・コンピュータ、デュアル・フレキシブル・ディスク・メモリー (2.36Mバイト) およびホスト・コンピュータから成っている。

2台のラン・オンリー・コンピュータは、パス・コントロール・プログラムにより、交互にシステムのサブ・コントローラとして動作するように選択され、多重データ収集コントロール・ユニットとの間のバスの制御権をもち、予め設定されている複数のデータ収録プログラムのうちのひとつに従って、データを取り込む。一方のラン・オンリー・コンピュータがデータ収集を行っている間、他方は待機状態にあり、データの外部メモリーへの転送やデータ処理・解析などの分散処理が可能である。パス・コントロール・プログラムによるラン・オンリー・コンピュータの切替の所要時間は、約 550 msec であり、コンピュータの故障時のバックアップも充分に果すことができる。

システム・コントローラ・コンピュータは、CRT、プリンタおよびキーボードをもち、主として割り込みロジック発生時に、その処理および割り込みロジックの緊急度に応じたデータ収録プログラムの変更、運転者に対する指示、警告、注意音の発生などを行うと共に、データ解析結果のグラフ表示と出力を受け持つ。大量データの解析処理は、オフ・ラインでホスト・コ

ンピュータによって行う。通常のデータ収集や解析処理の制御を、ラン・オンリー・モジュラー・コンピュータに行わせるのは、主として設定プログラムの不測の変更や集録データの処理に人為的ミスが入るなどのトラブルを避けるためである。なおシステム設計に当たり、開発に要する経費と時間を考慮してハードウェアは汎用性に富む標準インターフェース・バス (IEEE-488) を備えた市販の製品とし、研究の重点をシステム・コントロールおよびデータ解析・処理などのソフトウェアの開発においた。

3. データ集録と解析

近畿大炉における炉運転特性データの収録の対象としている情報信号は Table 1 に示すとおりであるが、信号取り込みを行うためには法的手続きを必要とする個所も多く、特にロジック/割込みロジック出力は、すべて設計および工事の方法の認可を受けて使用前検査に合格しなければ、本システムとの接続が行えなかったため、当初は模擬信号によりシステムの動作を検証する段階に止まっていたが、昭和59年1月に重要な情報信号源について法的手続きが完了した。

最終的には Table 1 に示すように、アナログ入力として核計装系統から 6ch., 原子炉制御系統から 6ch., 放射線モニター系統から 9ch., その他の計測系統から 3ch. の合計 24ch. の信号を、データ収録コントロール・プログラムに従ってシステムに収録する一方、核計装系統 1ch., 原子炉制御系統 11ch., インターロック関係 4ch., スクラム関係 8ch., 警報関係

5ch., 放射線モニター系統 9ch., その他 3ch. の合計 41ch. のステータス/割込みロジック入力は、それぞれの発生時にシステムに収録する予定である。収録されたこれらの信号は、その重要度、緊急度に応じて、オン・ラインまたはオフ・ラインでデータ処理・解析され、その結果はコントローラ・コンピュータまたはホスト・コンピュータの CRT 上に表示されると共に、異常発生時には緊急度に応じ周波数を数段階変えた信号音を発生して、運転者に指示、警報等を与える。また運転特性等の記録は、随時、表およびグラフ化して出力する。

計算機化によるデータ解析の対象とする項目は次のとおりである。

- (1) 原子炉起動前点検および停止点検の記録とミス・チェック
- (2) 起動時および手動停止時の運転者の操作状況の記録と炉特性の確認
- (3) 定常自動運転時の炉特性の監視とサーボ系の動作状態のチェック
- (4) 過剰反応度および試料の炉心挿入時の反応度マージンの確認
- (5) 原子炉特性および放射線モニター値の異常診断および判定
- (6) 誤操作および異常信号発生時の記録と発生系統および関連系統への影響の確認
- (7) 異常信号発生時における運転者に対する異常拡大防止措置と警告および防止措置の確認
- (8) 運転記録表の作成と定期自主検査および定期検査の記録作成

4. 結果および考察

1. 原子炉運転特性の記録

原子炉起動時から低出力（0.01W）点検を経て1W定常自動運転に入るまでの原子炉運転特性をグラフ化した一例を Fig. 2 に示す。この例では、データ集録のサイクル・タイムは 1.75 sec である。起動に際しての中性子源手動挿入により、ペリオド計が急激にプラス側に振れ、5 sec 以下の短ペリオド・スクラムが発生し、約 52 sec 後に∞に復帰し、一方 LogN 計もステップ状に 10^{-11} A のオーダーに増加する様子が明瞭に示されている。次いで安全棒 #1 と #2 の引き抜きによる Log N 計とペリオド計のゆるやかな増加を経て、起動開始から約 385 sec 後にシム安全棒と調整棒が“同時に”引き抜きを開始され、以後双方の

引き抜きを連続的に行ったこと、出力 0.01W 近傍の臨界直前の中性子源引き抜きによるペリオド計の急激な瞬間的変化と Log N 計のディップ、低出力（0.01W）自動運転に入ってから調整棒の大きなストロークの上下動、低出力点検後の出力上昇および定格出力近接時のシム安全棒と調整棒の操作状況、定格出力自動運転時の調整棒の安定した動作など、従来の運転記録表の記入事項のみでは把握できなかった点まで詳細はグラフ化されており、炉運転特性全般を一目で知ることができ、運転管理の上で極めて有用である。なお 2 sec サイクルでデータ集録を行った場合、フロッピー・ディスクを交換することなく、約24時間の連続自動集録が可能で、現在の近畿大炉の運転状況の場合、1枚のディスクに1週間分のデータ集録を行うことができる。

2. ステータス・ロジック信号の集録

ステータス・ロジック信号は、発生時に割り込みを行って、発生系統と発生時刻が記録される。スクラム信号や警報信号など異常状況の発生と関連する特に重要なステータス・ロジック発生時には、以後特別の集録プログラムへ切替えて集録を行う。現在のシステムでは、2つのステータス信号の時間々隔が 130 msec 以上では弁別して収録が可能であるが、時間々隔が約 120 msec 以下になると、ハードおよびソフト上の制約から弁別できない。通常はあまり問題とならないが、異常発生時に重要な情報が欠けるおそれがある。また割り込みが発生してから特別集録プログラムへの切替えに要する時間は約 550 msec で、主としてハード面での改善が必要であることが認められた。

3. 臨界点の判定と過剰反応度の測定

前述のように近畿大炉の利用において、過剰反応度の測定を必要とする場合が少くない。通常過剰反応度の測定は、低出力で手動臨界をとってから正ペリオド法により求めるか、校正した制御棒微分反応度から算出する方法が用いられる。しかし手動で正確に臨界をとるのは、意外に時間を要するものであり、かつ若干の誤差を伴う。このため自動運転時の集録データから、臨界点の調整棒位置を実用的な誤差範囲で推定することができれば、過剰反応度の確認や試料の等価反応度の測定にも有用であると考え、以下の検証実験を行った。

まず少なくとも20分以上の充分長い時間、一定出力で自動運転を行い、集録したデータから調整棒の平均位

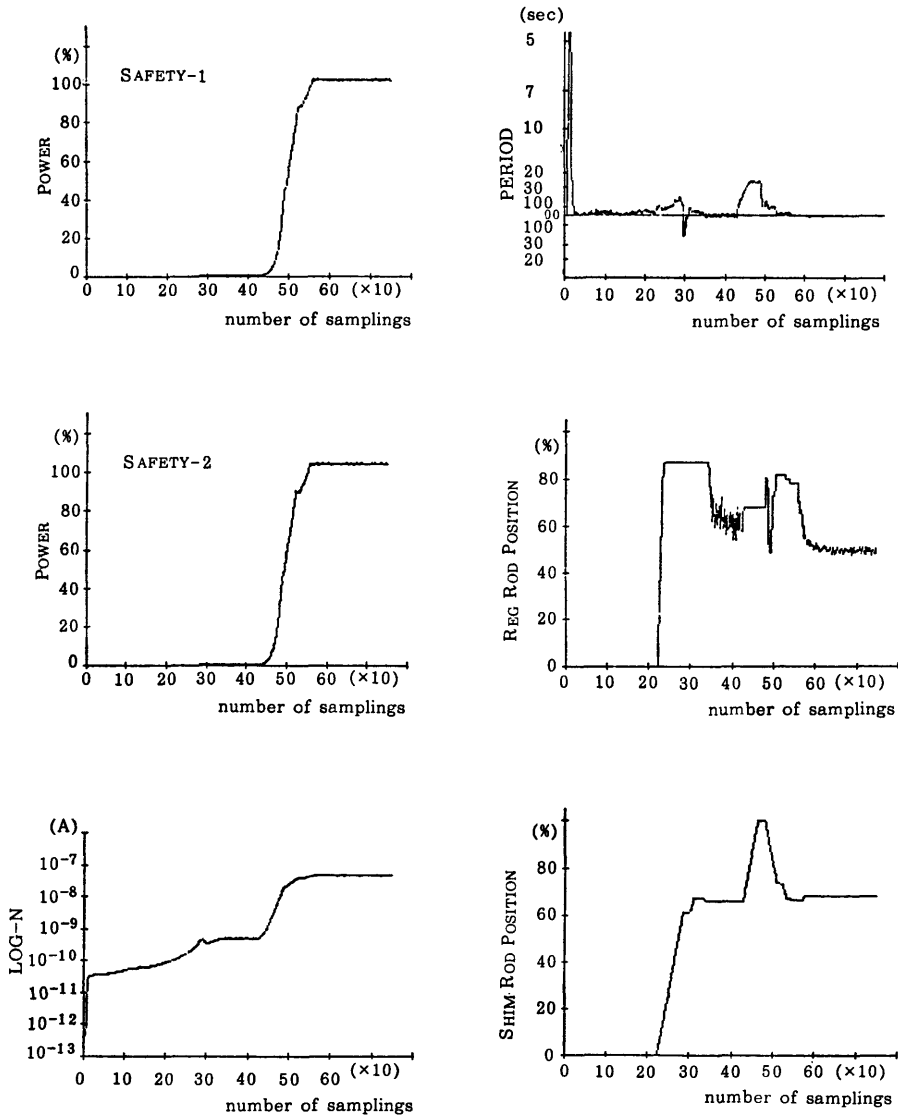


Fig. 2 Operating characteristics of UTR-KINKI from start-up to full power automatic operation.

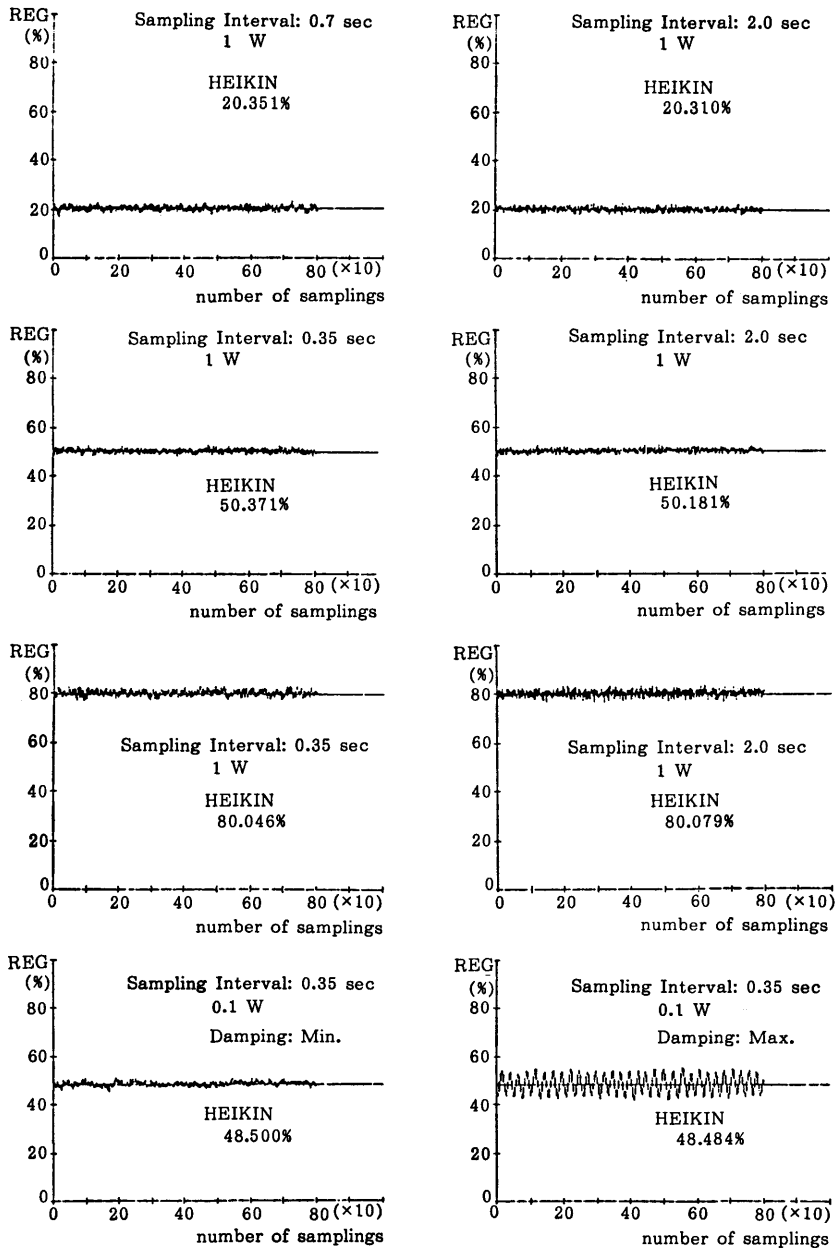


Fig. 3 Changes of regulating rod position during various automatic operating conditions.

Table 2 Differences between mean regulating rod positions during automatic operation and positions in manual critical operation.

出力 (W)	測定間隔 (sec)	シム安全 棒位置 (%)	自動運転時 平均調整棒 位置 (A) (%)	手動臨界時 調整棒位置 (B) (%)	調整棒自動 平均値・手 動臨界時位 置差 (A-B)(%)	手動臨界時誤差 (%Δk/k)	ペリオド 換算 (hr)	反応度誤差 (%Δk/k)	備 考
1.0	2.0	75	20.310	20.278	0.032	2.34×10^{-5}	115.94	6.18×10^{-5}	
1.0	0.70	75	20.351	"	0.073	"	"	1.11×10^{-4}	
1.0	2.0	68	50.181	50.227	-0.046	6.66×10^{-5}	38.17	-2.10×10^{-5}	
1.0	0.35	68	50.371	"	0.144	"	"	3.26×10^{-4}	
1.0	2.0	62	80.079	79.942	0.137	-3.11×10^{-5}	-82.43	6.75×10^{-5}	
1.0	0.35	62	80.046	"	0.104	"	"	4.38×10^{-5}	
1.0	2.0	52	20.171	20.271	-0.100	0.86×10^{-5}	339.0	-1.16×10^{-4}	
1.0	0.35	52	20.432	"	0.161	"	"	1.97×10^{-4}	
1.0	2.0	44	49.614	49.701	-0.087	5.34×10^{-5}	47.24	-1.04×10^{-4}	
1.0	0.35	44	49.922	"	0.221	"	"	4.52×10^{-4}	
1.0	2.0	37	79.771	80.089	-0.318	-3.27×10^{-5}	-81.28	-2.62×10^{-4}	
1.0	0.35	37	80.047	"	-0.041	"	"	-6.22×10^{-5}	
0.1	0.35	44	51.691	51.751	-0.060	1.41×10^{-4}	18.02	1.08×10^{-4}	ダンピング (MAX)
0.1	0.35	44	51.679	"	-0.073	"	"	0.98×10^{-4}	ダンピング (MIN)

置を算出し、次に同一の条件下で同様に充分時間をかけて可能な限り完全に手動臨界をとり、両者の差を求めた。自動運転時の調整棒の動きは、調整棒微分等価反応度がS字型特性をもつため、ストローク幅が中央付近で最も小さく、上下端付近で大きい。また低出力ほどストローク幅が大きくなる。このため出力0.1Wと1Wについて、調整棒位置がそれぞれ20%、50%、80%附近になるようにシム安全棒位置を調整して補償し、またデータ集録のサイクル・タイムを0.35 secおよび2.0 secとして、サイクル・タイムを変えた場合の影響も調べた。なお0.1W時については、出力計のピコアンメーターのダンピング条件も変えてデータ集録を行った。自動運転時に集録した調整棒位置の変動状況をグラフ化して一例をFig. 3に示す。

調整棒位置変動のストローク幅は、微分反応度の大きい50%近くで最も小さく、上限および下限に近い20%と80%附近ではやや大きくなっており、0.1Wでは1Wよりもストローク幅が大きくなっていることが示されている。また0.1Wでピコアンメーターのダンピング時定数を最大(3 sec)とした場合、ストローク幅が極めて大きくなり、かつ周期的な変動を示した。図中にHEIKINと示した値は、集録データから算出した調整棒平均位置である。

Table 2は、このようにして求めた自動運転時の調整棒平均位置とはほぼ同一条件の下で手動臨界をとった時の調整棒位置との差から求めた臨界点のズレを手動臨界時の誤差を補正して反応度誤差として示したもので、臨界点の反応度誤差は最大でも $4.5 \times 10^{-4} \% \Delta k/k$ 以下であり、充分実用的に利用できることが判った。なお表中に示した手動臨界時誤差とは、出力計のデータ解析から求めた完全な臨界点からのズレを示し、参考までにこの誤差をペリオドに換算した値を右欄にhr単位で示してある。なお出力、調整棒位置、ピコアンメーターのダンピング時定数などの影響はほとんど認められなかった。自動運転用のサーボ・コントローラの設定条件を変えれば、誤差を更に低下させることも可能と思われるが、原子炉の自動運転特性への影響も考えられるので、変更は試みなかった。

5. ま と め

自動データ集録・解析システムの導入によって、近畿大炉の運転特性が詳細に把握され、運転管理上非常に役立つことが示されたほか、臨界点の判定にも実用的な誤差範囲で利用しうることが確認された。現在は人為的にボイド等を発生させた場合の異常検出および

三木他：UTR-KINKI における炉運転特性のデータ集録と解析（I）

診断について研究を進めている。

本研究は、昭和56、57年度文部省科学研究費、特定研究(1)「原子炉の安全性向上に関する研究」（研究代表者柴田俊一京大教授）の一部として実施したものである。

なお本研究は昭和56年度理工学部原子炉工学科卒業生千葉恵三、泉良和、大味重良の諸君の協力によって実施した。以上の諸君に謝意を表します。

参考文献

1) 三木良太他：近畿大炉における原子炉運転特性の

オン・ライン／オフ・ライン・データ集録と解析，文部省科学研究費特定研究(1)「原子炉の安全性向上に関する研究」報告書。pp. 15～24 (1982)

- 2) 三木良太，伊藤哲夫：近畿大炉における炉運転特性データ集録と解析（I），日本原子力学会「昭和58年秋の分科会」要旨集。F 5 (1983)
- 3) 三木良太他：近畿大炉における原子炉運転特性のオン・ライン／オフ・ライン・データ集録・解析，「原子炉の安全性向上のための計算機利用」短期研究会報告書（京都大学原子炉実験所）。pp. 114～120 (1984)