

# 原子力

## マグノックス形原子炉制御特性の解析 (II)

川崎工場設計部原子力課 篠田 度

### Analysis of Control Characteristics of Magnox Reactors (II)

Wataru Shinoda

(Atomic Energy Sect., Design Dep't., Kawasaki Works)

#### Synopsis

Dynamic behaviours of a magnox reactor were studied on a general purpose analog computer. Nonlinear characteristics of the reactor control system were simulated on the computer by means of electronic multipliers, diodes and operational amplifiers.

Results obtained were compared with those from the frequency response analysis. Good agreement between the two analyses improves the designing of the control system for magnox reactors.

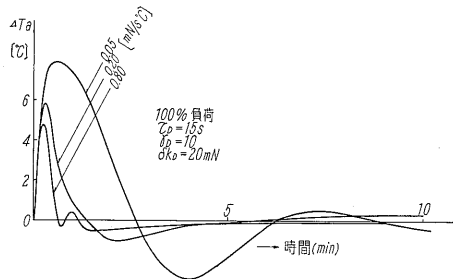
前号において、マグノックス形原子炉の動特性および周波数応答法による解析の結果について述べたが、本文はその続編としてアナログ計算機による解析の結果、両解析の結果の比較および得られた結論についてその概略を述べることにする。

#### V. アナログ計算機による解析

非線形性を含んだ原子炉制御系の過渡応答が、PACEアナログ計算機によって解析された。

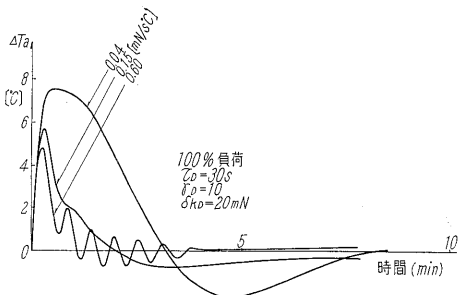
##### 1. 反応度外乱

利得を変えて、過渡応答の変化を計算した結果が第



第15図 過渡応答例(I)

Fig. 15. Examples of transient responses (I)

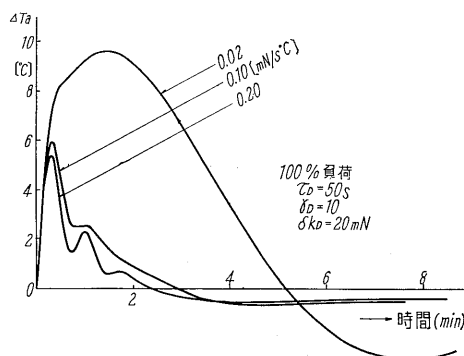


第16図 過渡応答例(II)

Fig. 16. Examples of transient responses (II)

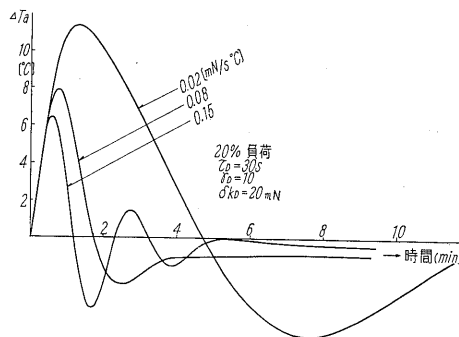
15図、第16図、第17図、第18図、第19図、第20図である。この解析において得られた利得の安定限界を第10図、第11図上に示し、最適利得を第3表に並記し、周波数応答法で得られた結果と比較する。

また、非線形素子を比例項で置き換えた系についての解析を行ない、周波数応答法によって得られた位相余裕と、過渡応答との相関を求めたのが第21図、第22図である。



第17図 過渡応答例(III)

Fig. 17. Examples of transient responses(III)

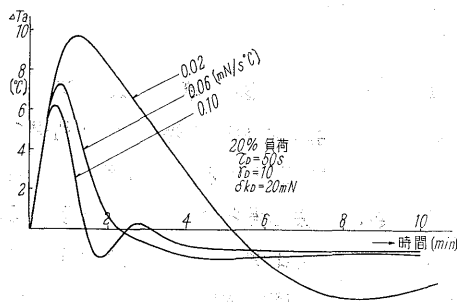


第18図 過渡応答例(IV)

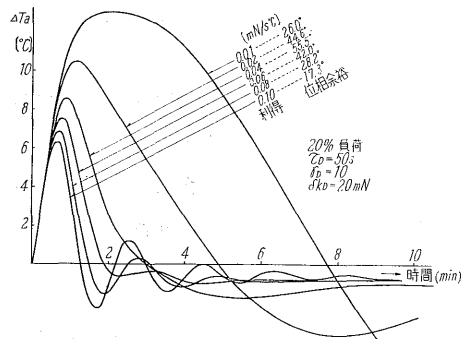
Fig. 18. Examples of transient responses(IV)

第3表 共振周波数および最適利得  
Table 3. Resonance frequency and optimum gains

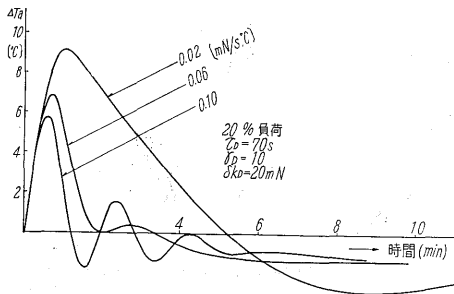
負 荷	$\tau_D$	周 波 数 応 答 法 解 析					アナログ解析
		$\omega_1$	$\omega_2$	最大振幅値	MP法による最適利得	最大位相余裕を与える利得	
100	0	—	—	—	—	0.09	0.06
100	15	0.11	0.035	1.27	0.306	0.200	0.35
100	30	0.12	0.021	1.19	0.143	0.130	0.146
100	50	0.11	0.014	1.15	0.103	0.084	0.090
20	0	—	—	—	—	0.030	0.060
20	30	0.025	0.016	1.43	0.060	0.042	0.070
20	50	0.040	0.010	1.28	0.054	0.037	0.060
20	70	0.043	0.007	1.27	0.042	0.032	0.050
%	sec	rad/sec	rad/sec		mN/sec°C	mN/sec°C	mN/sec°C



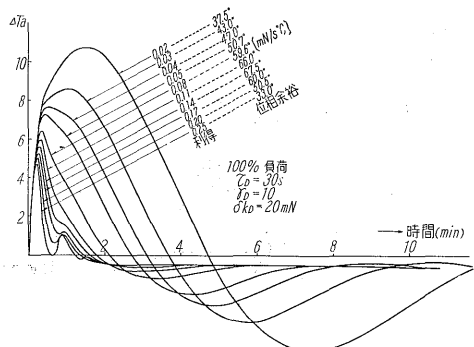
第19図 過渡応答例(V)  
Fig. 19. Examples of transient responses(V)



第22図 過渡応答および位相余裕(II)  
Fig. 22. Transient behaviours and phase margins(II)



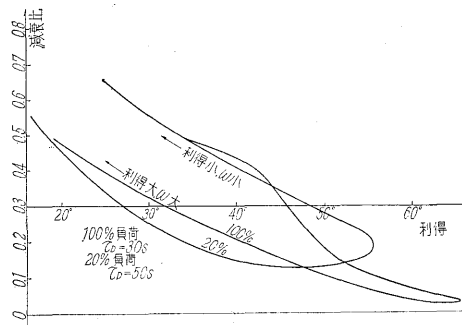
第20図 過渡応答例(VI)  
Fig. 20. Examples of transient responses(VI)



第21図 過渡応答および位相余裕(I)  
Fig. 21. Transient behaviours and phase margins(I)

最適の  $\tau_D$  値としては、100% 負荷時で 20 sec、20% 負荷時で 60 sec となる。これは、段階的に与えられた  $\tau_D$  値から内そうした値である。

過渡応答のよさを表す目安として、負ピーク値と正ピーク値の比をとって減衰比とする。ただし、高周波振動が重畳される場合には、重畳された振動の振幅と正ピーク値の比の2倍を減衰比と考える。これは、熱サイクル効果を考慮に入れたためである。減衰比と位相余裕の関係が第 23 図に示される。



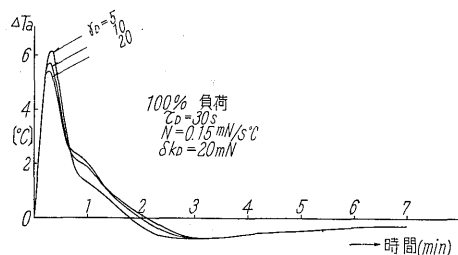
第23図 減衰比および位相余裕の関係  
Fig. 23. Relation between damping ratio and phase margin

第23図から、次のように結論できる。利得が大きくて高周波の優勢な場合では、減衰比0.3が位相余裕30度に相当し、利得が小さくて低周波の優勢な場合では、45度に相当する。原子炉においては、熱サイクルの効果を考慮して、減衰比は0.3以下であることが推奨されるため、制御系を周波数応答法で設計する場合には、従来の位相余裕の基準を次のように変更しなければならない。高周波の優勢な側では、位相余裕は30度以上、かつ、低周波の優勢な側では、位相余裕は45度以上でなければならない。

最適利得の決定は、過渡応答の形状の比較によって行なった。この際、過渡振動、とくに重畳される高周波振動の小さいこと、応答の速いこと、ピーク値の小さいことを基準とした。

すべての解析を通じて、通常の外乱(20mN)によっては、被覆材料温度が許容温度を越えることはないことが判明した。

$\gamma_D$  値を変えて解析を行なった結果を第24図に示す。 $\gamma_D$  を変えることによる影響は、過渡応答にはほとんど現われない。



第24図  $\gamma_D$  値変化による過渡応答

Fig. 24. Transient behaviours vs.  $\gamma_D$  value variation

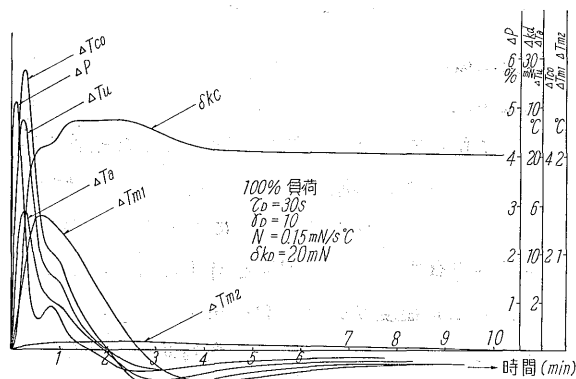
外乱が20mNのときと、40mNのときは、過渡応答は多少異なる。これは系の非線形性によるものであり、制御系を設計する際には、外乱の仮定に充分の考慮を払わねばならないことが判明した。この非線形性の影響は、周波数応答法では解析することはできない。ちなみに、燃料棒取換時に、燃料棒を炉内に落とすことによって100mN程度の反応度外乱を生じる。

各部温度および出力の過渡状態を第25図、第26図に示す。

## 2. 流量外乱

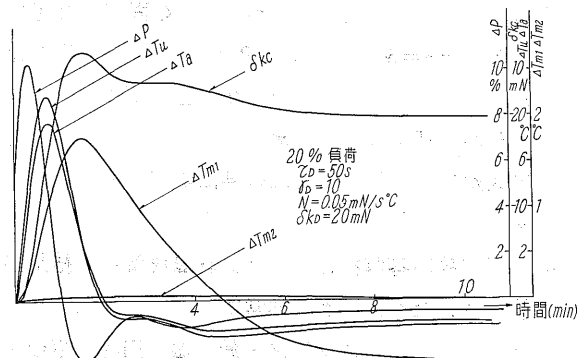
流量外乱に対する応答例を第27図、第28図に示す。

反応度外乱に対して設計された制御機構によって、充分満足な応答が得られている。



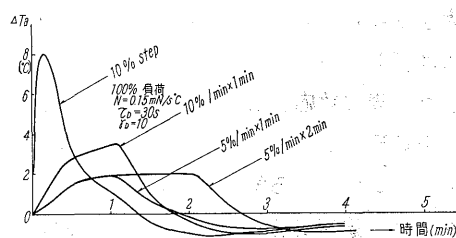
第25図 各部定数の過渡応答 (I)

Fig. 25. Transient behaviours of reactor parameters (I)



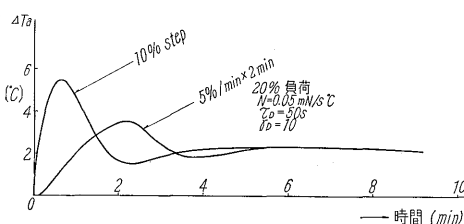
第26図 各部定数の過渡応答 (II)

Fig. 26. Transient behaviours of reactor parameters (II)



第27図 流量外乱による過渡応答 (I)

Fig. 27. Transient response to flow disturbance (I)



第28図 流量外乱による過渡応答 (II)

Fig. 28. Transient response to flow disturbance (II)

## VI. む す び

以上に概略を述べてきたように、マグノックス形原子炉制御系について、周波数応答法およびアナログ計算機によって解析を行なった結果、次のような結論を得た。

- 1) マグノックス形原子炉は、燃料の燃焼が進むにつれて、正の温度係数を持つようになるが、このために、原子炉自体固有の不安定性を有するようになる。
- 2) ガス出口温度制御方式を採用することによって、安定な応答が得られ、さらに、直列進相補償を行なうことによって、相対安定度は著しく増加する。
- 3) 制御定数 ( $\tau_D$ ,  $\gamma_D$ , 利得) には、ある最適点が存在し、周波数応答法およびアナログ計算機解析により、これらを決定することができる。この最適定数は、出力水準とともに変化するが、一つの固定した定数、たとえば  $\tau_D=30 \text{ sec}$ ,  $\gamma_D=10$  によって、全出力範囲にわたって、安定な制御を行なうこともできる。

しかし利得は、出力水準とともに変化するような方式が望ましく、これは容易に実現することが可能である。

- 4) 周波数応答解析とアナログ計算機解析の結果が比較検討されたが、両者は非常によい一致を示した。

とくに、ナイキスト線図と最大振幅円法を駆使することにより、ある程度、過渡応答を予測することもでき、これのみで、かなり満足な制御系を設計することも充分可能であることが明らかとなった。ただし、これは一定の外乱のみに対する制御であり、種々の種類と大きさの外乱に対しては、周波数応答法のみでは容易には扱えない。

また、周波数応答法では、非線形性を扱えないので、非線形性が大きな影響をもつような場合には、アナログ計算機による解析が必要となる。また周波数応答法では、過渡応答のピーク値などの定量を行なうこ

とができない。一方、アナログ解析では、解は定量的に得られるが、この解から最適点を見出すことが困難である。

- 5) 制御特性に要求される条件が、定量的に与えられ、「最適な特性」が明確化されることが必要であり、このために、燃料の熱サイクル効果および制御棒駆動機構の疲労、そして、回路内の雑音などの解明が行なわれなければならない。
- 6) 制御系を設計する際には、系の定数の変動によって系の伝達関数が余り変動せず、過渡応答にも影響が大きく現われないような考慮が必要である。とくに、制御対象がマグノックス形原子炉の場合のように、低利得でも、高利得でも不安定となり得る場合には重要な条件である。
- 7) この解析は、天然ウラン黒鉛減速ガス冷却形、とくにマグノックス形原子炉の動特性を理解し、これに制御系を設計する際の問題点の抽出、および制御設計法の会得、すなわち、周波数応答法解析とアナログ解析の両者を比較検討して、設計手順を確立することを目的として行なわれて、充分所期の目的に達することができた。

報告を終わるにあたって、解析遂行上、種々のご指導とご援助を賜った日本原子力研究所・東海研究所・計測制御研究室の須田信英氏に深く感謝の意を表する。

## 参考文献

- (1) T.J. O'NEILL: 2nd Geneva Conf. P/21
- (2) M.A. SHULTZ: CONTROL OF NUCLEAR REACTORS AND POWER PLANTS
- (3) 電気学会: 自動制御の理論と応用
- (4) S.L. CHANG: SYNTHESIS OF OPTIMUM CONTROL SYSTEM
- (5) JAERI 6006 アナログ計算機の概要と計算法
- (6) 原 研: 計測制御研究室経過報告 No.6 (DACHR-III)



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。