

선형 레귤레이터 기법을 이용한 다변수 발전설비의 최적제어

Optimal Control of multivariable Generating System
Based on Linear Regulator

金 東 和*
(Dong-Hwa Kim)

요 약

선형 다변수 원자력 발전설비에 있어서 순환펌프 동력변화, 스톱 밸브 개도등의 변화에 따라 plenum chamber 물온도, core inlet 온도, 연료에 미치는 온도등의 응답이 상호간섭을 받지 않고 최적제어 될 수 있는 방법을 선형 레귤레이터 기법을 이용해 고찰하였다. 그 결과 순환펌프의 동력변화, 스톱 밸브 개도의 외란에 대해 plenum chamber 물온도, 노심입구 물온도, 연료 온도 변화 등이 적어 비간섭화 된 안정된 제어가 될 수 있음을 나타냈다.

Abstract

This paper suggested the optimal decoupling control problem of multivariable nuclear power control system using linear regulator technique.

The resultant represents response of stable control system and shows that the variation of temperature of the water of plenum chamber, core inlet temperature, fuel temperature, etc., against to the disturbance of the power change of the feedwater pump, throttle valve opening is very small. Also this results provides that system is decoupled between inputs or outputs.

1. 서 론

현재와 같은 원자력 발전설비의 동특성 기술 기법이 Nordheim에 의해 개발된후 이를 이용한 시스템 해석, 설계등의 연구가 주로 원자로

에 대해 많이 수행되어 왔다.^{1)~3)}

원자력 발전설비가 기저부하용으로 이용되던 개발 당시는 Bellman의 동적계획법⁴⁾⁵⁾, Pontryagin의 최대원리등을 이용한 반응도제어, Xenon독작용 제어^{6)~10)}, 동특성 해석등이 주요 연구대상이 되어 왔으나 최근 원자력 발전설비의 단위기 용량이 증가하고 부하부담이 증가하

*正會員 : 한국원자력연구소 선임기술원

면서 경제성, 안전성, 부하 추종성등에 대한 연구의 중요성이 인식되어 현대제어 이론을 이용한 플랜트 제어문제가 증가하고 있는 추세이다. ^{11)~14)} 특히 최근의 플랜트는 안전성 신뢰성 향상등을 위해 제어변수가 증가하여 하나의 입력이 다수의 출력에 영향을 미치는 다변수계로서 변수간의 상호 간섭으로 이들 변수를 최적 제어하는 것은 대단히 어렵다.

이와 같은 다변수 제어계 설계시 만족되어야 할 요건으로는 안정도, 시스템 성능, 적은 간섭 작용, 컴퍼넌트 고장시 지정된 범위내에서의 파라메터 변위에 대한 안전성 유지등을 들고 있다. ⁸⁾

이러한 설계조건을 만족하면서 다변수 제어기를 설계하는 경우 입,출력 변수상호간의 간섭으로 안정영역의 결정등이 어렵고 차수가 높은 경우에는 대단히 복잡한 구조를 갖게 되어 설계 해석은 더욱 어렵게 된다.

다변수 제어기의 설계에 있어서 연구된 많은 기법들이 주로 이러한 문제들을 극소화시켜 가능한 단일루프 시스템의 설계기법을 이용하여 설계하고자 하는 것들이다. ^{1),7),9),10)}

그중 주파수 영역에서의 설계기법으로는 역나이퀴스트 배열법(INA)^{9),10)}, 근계적법¹²⁾, 궤환차 방식¹⁶⁾등이 있고 특히 Rosenbrock^{10), 14)}의 INA기법은 설계과정에서 대각화의 정도, 안정도등을 판단할 수 있어 최근까지 많이 이용되고 있으나^{6),14)} 대부분의 경우 시스템의 입출력수가 같은 경우만을 다루고 있어 그 실용성에는 상당한 제약을 받게 된다.

이러한 관점에 입각하여 본 논문에서는 최적레귤레이터 기법을 이용해 입,출력 수에 관계없이 비간섭 되어 최적제어 될 수 있는 방법을 고찰하고 선형 다변수 원자력 발전설비의 모델에서 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 입증하고자 한다.

2. 플랜트 모델

본 연구에서 사용한 플랜트 모델을 그림1에 나타내고 모델을 방정식으로 요약하면 다음과

같다 ^{15)~17)}

2.1. 노심 동특성

노심 동특성은 중성자 출력 N, 지발중성자 C에 관계된 식으로 기술될 수 있으므로

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dK - B}{l} N + \lambda C \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{BN}{l} - \lambda C \dots\dots\dots(2)$$

$$\delta K = \delta K_{ex} - \delta K_{dop} - \delta K_a$$

$$\delta K_{dop} = (C_1 + \frac{C_2 Q}{A_h}) (T_f - T_{fo})$$

$$\delta K = 11.5 (a_{co}^2 - a_c^2)$$

$$A_h = 2\pi R n L_f$$

와 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

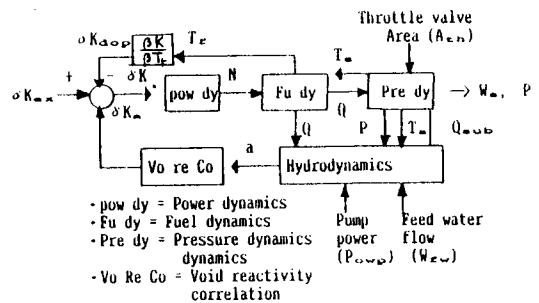


그림 1. 블록다이어그램
Fig. 1. Block diagram

2.2. 핵연료 동특성

연료에서 핵분열에 의해 생성되는 열은 냉각제에 전달되는데 이때 연료의 평균온도 T_f, 열전달율 Q라 할때 다음과 같이 에너지 동특성을 유도할 수 있다.

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{N}{\tau_1 A_h H_f} - \frac{1}{\tau_1} (T_f - T_s) \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\tau_2} (N - Q) \dots\dots\dots(4)$$

2.3. 유체 동특성

노심입구에서 냉각제 유속을 고려한 유체운동 방정식은

$$\frac{dV_{in}}{dt} = \frac{1}{K_i \sigma_f} (\delta P_p - \delta P_f - \delta P_{acc}) \dots\dots\dots(5)$$

이 되고 여기서

$$\begin{aligned} \delta P &= P_{owp}(a_0 - a_1 W_a - a_2 W_a^2) \\ \delta P_f &= [K_1 + K_{2c} L_c + K_{3c} L_c A(X_c) + K_{3r} L_r A(X_r) \\ &\quad + K_{2d} L_d] \frac{\sigma_f V_{in}^2}{g_c} \end{aligned}$$

$$\delta P_{acc} = \frac{\sigma_f(1 - \alpha_{ex}) + \sigma_g \alpha_{ex} S_c^2 \sigma_f}{\sigma_f(1 - \alpha_{ex}) + \sigma_g \alpha_{ex} S_c} - 1$$

$$\delta K_1 = [L_c + \frac{A_c}{A_r} L_r + \frac{A_c}{A_a} L_a]$$

이 된다.

2.4. 노심입구 온도특성

노심 입구에서의 냉각재 온도는 lower plenum chamber의 열 용량에 의해 변하므로

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W_a}{V_{ip}} (T_a - T_i) \dots\dots\dots(6)$$

주어진다.

2.5. 압력 동특성

과도현상을 고려한 압력 동특성은

$$\frac{dp}{dt} = \frac{W_{fw} - W_s + \frac{r}{h_{fg}} (Q - Q_{sub})}{\mu + \frac{r m_f c_p}{h_{fg}} \frac{dT_s}{dP}} \dots\dots\dots(7)$$

이 되고 여기서

$$\begin{aligned} Q_{sub} &= W_a \sigma_f C_p (T_s - T_i) \\ r \frac{1}{\sigma_g} - \frac{1}{\sigma_f} \end{aligned} \dots\dots\dots(8)$$

$$\mu = m_g \left\{ \frac{d}{dP} \left(\frac{1}{\sigma_g} \right) \right\} \dots\dots\dots(9)$$

$$m_f = \sigma_f [A_{ar} L_{we} + A_r L_r (1 - \alpha_r) + L_c A_c (1 - \alpha_c)] \dots\dots\dots(10)$$

$$m_{g1} = \sigma_g [L_c A_c \alpha_c + L_r A_r \alpha_r + (L_{ar} - L_{we}) A_{ar} + L_{we} A_{ar} \alpha_{ar}]$$

2.6. 보충수 계통

보충수 유속과 증기유속 사이의 관계는

$$\frac{dW_{fw}}{dt} = K_{fw1}(W_{fw} - W_s) + K_{fw2}(L_{we} - L_{wLo}) \dots\dots\dots(11)$$

$$W = C_1 A_{th} (\overline{P} \sigma_r)$$

로 쓸 수 있다.

2.7. 증기발생 드럼계통

증기발생 드럼과 노심입구의 plenum chamber사이에는 보충수가 혼합되므로 수송지연 효과를 고려하여

$$T_a(t) = T_m(t - \tau) \dots\dots\dots(12)$$

τ = transport delay

$$T_m = T_s - (T_s - T_{fw}) \frac{W_{fw}}{W_a \sigma_f}$$

3. 선형모델

제2절에서 유도한 모델을 동작점 부근에서 Taylor급수를 이용해 선형화시켜 상태 변수형으로 나타내면 식(13)과 같다.

$$\dot{X} = AX + BU \dots\dots\dots(13)$$

여기서

$$X^T = [\delta N, \delta C, \delta T_f, \delta Q, \delta V_{in}, \delta T, \delta P, \delta W_{fw}, \delta T_a]$$

$$U^T = [\delta K_{ex}, \delta P_{owp}, \delta A_{th}]$$

이 된다.

4. 최적제어 이론

식(13)으로 나타낸 선형 시불변 시스템에서 제어법칙

$$U = KX \dots\dots\dots(14)$$

을 이용한 제어문제를 생각한다.

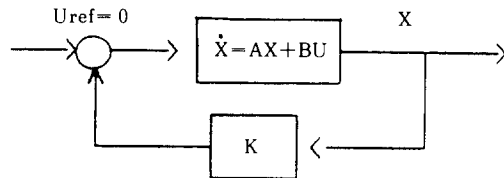


그림 2. 상태공간 레귤레이터 제어

Fig. 2. Linear regulator control by state by state feedback

여기서 K는 평가함수

$$J = (X^T Q X + U^T R U) dt \dots\dots\dots(15)$$

에 대해 시스템이 최적제어가 되도록 할 수 있는 상수이득 행렬이고, Q, R은 각각 nxn, mxm 가중행렬이다.

레귤레이터 문제에서 Uref=0일때 시스템이 가제어이면 K는

$$K = -R^{-1}B^T P \dots\dots\dots(16)$$

이 된다. 따라서 제어벡터는 식(14)에 의해

$$U = -R^{-1}B^T P X \dots\dots\dots(17)$$

이고 P는 정상상태시 Riccati방정식

$$PA - A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \dots\dots\dots(18)$$

을 만족하는 nxn양한정 행렬이다.

식(18)의 해를 얻는데 여러가지 방법이 있으나 본 연구에서는 Davison & Man 기법과 Newton-Rapson기법을 이용한다.

Q,R은 페루프계의 응답이 양호한 값이 되도록 선정하고 또한 J가 최소가 되도록 반 양한정과 양한정 값을 취한다.

5. 다변수 원자력 발전소에 대한 선형 레귤레이터 이론의 적용

제4절에서 기술한 레귤레이터 이론을 시스템 (13)에 적용한다.

제어변수로서 순환펌프 전력, 스톱 밸브 면적을 채택하고 가중행렬은 각각

$$Q = \text{Diag}(1, 0, 0, 0, 1, 1, 100, 100, 1) \dots\dots\dots(19)$$

$$R = \text{Diag}(10, 1) \dots\dots\dots(20)$$

로 선정하였다.

즉 리액터 압력, 보충수 유속, plenum chamber에서 입구물의 온도등이 가중되었다.

6. 시뮬레이션 결과 및 검토

6.1. 시뮬레이션 결과 및 검토

제어기 및 P행렬을 표1에 그리고 시뮬레이션 결과를 그림 3,4,5에 나타낸다. 제어법칙 (14)를 적용한 페루프 효과를 나타내기 위해 각각의 입력변수에 대해 개 루프인 경우와 페루프인 경우를 나타냈다.

그림 3(a)에서 스톱 밸브 면적을 고려한 개루프 응답의 경우는 스톱 밸브를 닫으면

노심 축에서 불때 스팀압력과 유속의 변수는 대단히 중요하여 외란에 의한 반응으로 나타난다. 그 결과 초기의 스팀유량의 서지작용으로 압력이 증가하여 노심압, 노심입구, 물온도, 유속등이 많은 값으로 변하고 상태도 불안정하나 그림3(b)의 최적제어의 경우는 스톱 밸브 면적 변화에 따라 순환펌프 동력 보상에 의한 결합 작용으로 개 루프일 경우보다 빨리 정상상태로 복귀하고 과도응답도 훨씬 적게 나타난다. 또한 R행렬값을 변화시키므로서 이들 응답은 더욱 최적화 시킬수 있다.

그림 4의 순환펌프 동력을 10% 감소시킨 경우는 펌프동력 감소에 따라 유속이 감소하고 그 결과 냉각재 작용이 감소하므로 노심압, 노심입구 물온도, lower plenum chamber 입구 물온도등은 증가한다.

최적제어를 적용한 경우는 펌프동력변화에 따라 노심출력 및 스팀압 조절로 적은 과도기간을 거쳐 안정상태로 환원되고 그 과도응답도 극히 적어 노심각부 및 연료온도에 미치는 영향이 적음을 알 수 있다.

그림5의 lower plenum chamber 입구 물온도가 갑자기 변할 수 있는 충격 외란을 고려하였을 때 즉 +5%의 lower plenum 온도 변화는 lower plenum chamber 열용량 만큼 지연되어 노심입구 온도를 증가시킨다.

노심입구 온도증가는 스팀발생에 관련된 비등기간을 짧게하고 그에 따라 기포도 증가하는데 이 기포는 마이너스 반응도를 증가시킨다.

또 운전 설정점에서의 스팀 발생 증가는 리액터 압력을 증가시키는데 이 압력증가에 의한 포화온도 증가와 기포의 파괴등으로 반응도 궤환이 증가하게 된다.

6.2. 비간섭 및 안정성에 대한 고찰

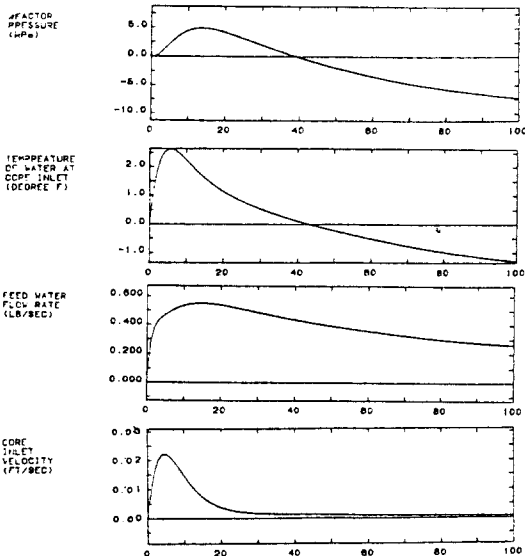
주어진 시스템은 입력3, 출력4, 상태변수9개를 가진 다변수 시스템으로서 스톱 밸브 30% 변화, 펌프동력-10% 변화, 노심입구 물온도 변화등에 대해 변수 또는 루프간의 간섭현상으로 노심압력, 급수유속, 노심입구 물온도등의 응답특성이 대단히 복잡할 것이 예상되나 시뮬

레이션 결과는 외란 및 진동없이 안정된 결과를 보이고 있어 이 제어기는 각 소 시스템 간의 간섭도 잘 배제시켰음을 알 수 있다. 이때 과도상태에서 완만한 곡선변화를 보이는 것은 유체 및 기계적인 여러 특성으로 급격히 따라

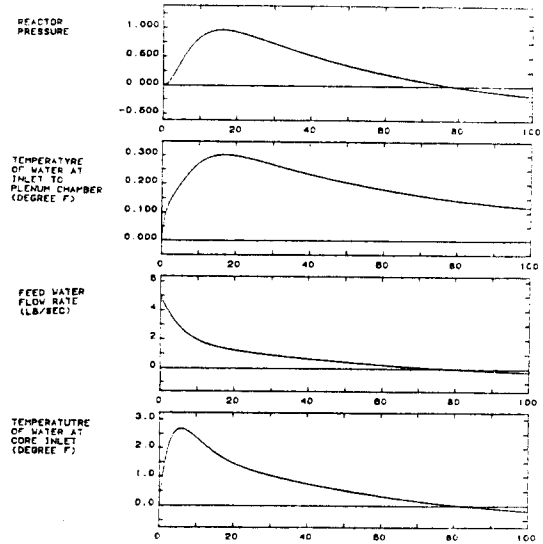
갈 수 없음을 의미하는 것으로 볼 수 있다.

7. 결 론

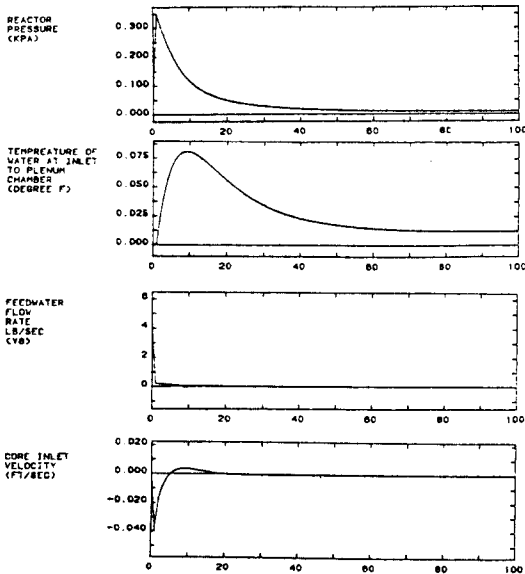
선형화된 원자력 발전소의 다변수 제어에 레



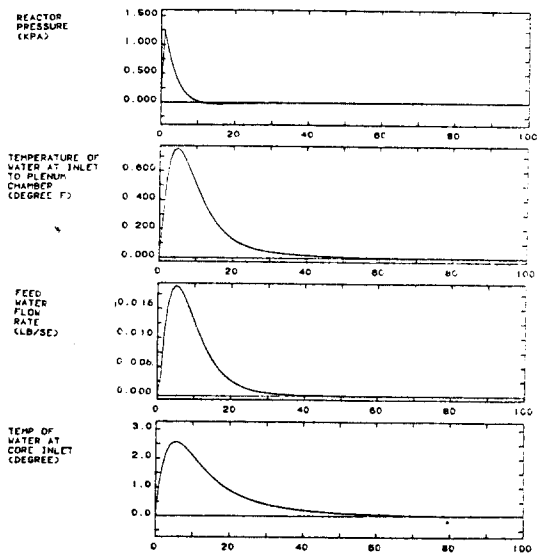
(a) 개루프 응답 (a) open loop response



(a) 개루프 응답 (a) open loop response



(b) 폐루프 응답 (b) closed loop response



(b) 폐루프 응답 (b) closed loop response

그림 3. 스톨 밸브 -30%의 외란에 대한 응답
Fig. 3. Response to disturbance of throttle valve area (-30%)

그림 4. 순환펌프 동력 -10% 외란에 대한 응답
Fig. 4. Response to disturbance of power of circulation pump

플래티너 기법을 이용한 최적제어 문제를 검토하였다.

그 결과 주 증기밸브의 개도를 외란으로 취급하고 냉각재 순환펌프의 동력, 리액터 반응도를 입력 변수로 하였을 때 노심압력,

plenum chamber의 온도, 연료온도등 노심특성에 미치는 영향이 적어 설계된 최적제어의 궤환이득 행렬을 이용한 응답은 만족스런 결과를 보이고 있음을 알 수 있었으며 가중행렬의 값에 의해 더 좋은 응답을 얻을 수 있을 것으로 본다.

한편 다변수 시스템에서는 변수간의 간섭현상이 심하여 하나의 입력 또는 출력을 제어하는게 대단히 어렵다. 따라서 이들을 비간섭화시키기위해 INA, DNA, CL기법이 이용되는데 본 연구에서는 시스템 응답의 진동, 변형이 없는 점으로 보아 선형 레귤레이터 기법을 이용하여서도 시스템이 비간섭 제어될 수 있음을 입증하고 있다.

향후 이와 유사한 연구에 도움이 될 것으로

기대된다.

참고문헌

- 1) ANL-7664
- 2) ANL-7530
- 3) ANL-7668
- 4) N.Kallay, "Dynamic programming and Nuclear reactor systems design", Nuc Sci & Eng, VO.8, p315-325, 1960.
- 5) M.Ash, "Application of Dynamic programming to optimal control shutdown control," Nuc Sci & Eng, VO.24, p.77-86, 1966.
- 6) J.J.Roberts, "Experimental Application of the timeoptimal Xenon shutdown program", Nuc Sci & Eng, VO.27, p.573-580, 1967.
- 7) W.M.Stacey, "Optimal control of Xenon power spatial transients", Nuc Sci & Eng, VO.33, p.162-168, 1968.
- 8) A.M.Christie, "On the control of spatial Xenon oscillations", Nuc Sci & Eng VO. 51,

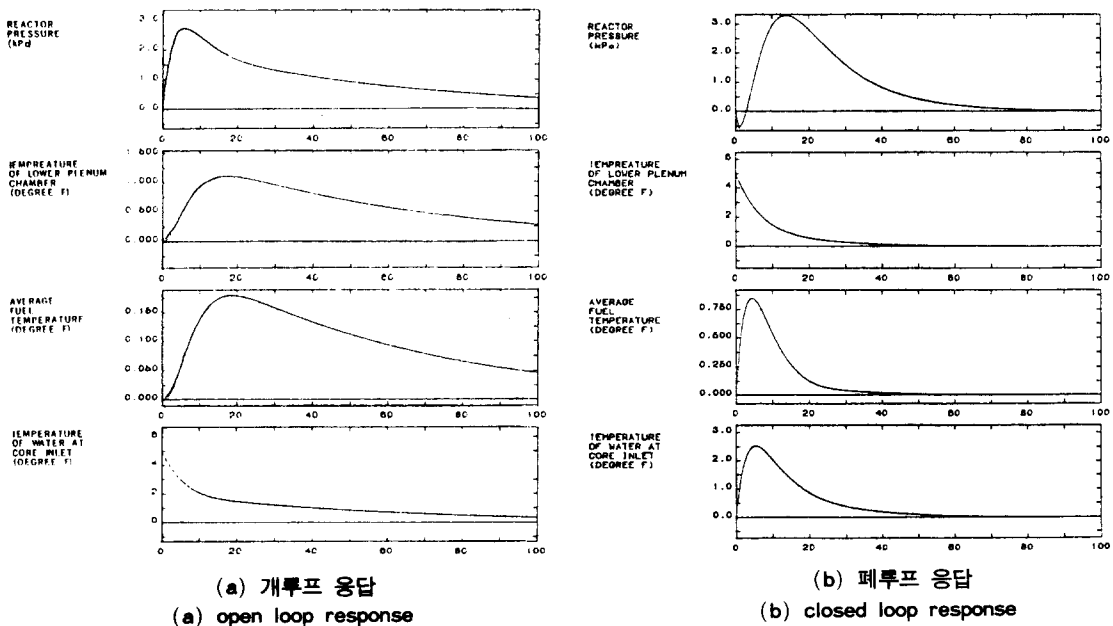


그림 5. plenum chamber 입구 물온도 외란에 대한 응답

Fig. 5. Response to disturbance of temperature of water at inlet to plenum chamber

- p.10-24, 1973.
- 9) A.A Eibassion, "Minimal time control of spatial Xenon oscillations in nuclear power reactors", Nuc Sci & Eng, VO.54, p.166-176, 1974.
 - 10) W.M. Stacey, "Control of Xenon spatial oscillation", Nuc Sci & Eng, VO.38, p.229-243, 1969.
 - 11) K.Asatani, "Suboptimal control of Nuclear Reactor with distributed parameters using singular perturbation theory", Nuc Sci & Eng, VO.62, NO.9, p.19, 1977.
 - 12) S.Mankin, "Application of linear optimal control technique to control of a Nuclear optimal control technique to control of a Nuclear Reactor Plant", J.Nuc Sci & Tec, VO.12, NO.12, NO.12, p.727-731, 1975.
 - 13) W.C.Lipinski, "Optimal digital computer control of Nuclear Reactors", IEEE NS-17, NO.1, p.510-516, 1970.
 - 14) D.C Wade, "Optimal control of nuclear reactor depletion, Nuc Sci & Eng, VO.45, p.199-217, 1971.
 - 15) H.S.Cheng, "A space time analysis of void reactivity feedback in boiling water reactor", Nuc Tech, VO.41, p.283-298, 1978.
 - 16) S.Mankin, "Application of linear optimal regulator technique to control of a nuclear reactor plant", J.Nuc Sci & Tec, VO.12,NO.12, p.727-734, 1975.
 - 17) Kazuo Monta, "Time optimal digital computer control of Nuclear reactors", J.Nuc Sci & Tec, VO.3, NO.6, p.227-236, 1966.