研究論文

243. 実験用高速増殖炉 EBR-1 の過渡特性

海老塚佳衛*, 中西和義**, 進藤益男*

The Transient Responses of EBR-1

By Yoshie EBIZUKA, Kazuyoshi NAKANISHI and Masuo SHINDO

The linearized transfer functions from various input quantities to reactor power are derived. The transient responses of EBR-1, Mark II core to step changes in impressed reactivity, coolant flow and inlet coolant temperature are calculated to the interpretation of the dynamic behaviors observed in terms of these transfer functions.

緒 言

アメリカの実験用高速増殖炉 EBR-1 の Mark II 炉心の動特性において、問題にされているいくつかの実験事実として、

- (1) 苛酷な運転操作条件下における周期が25~30秒程度のはげしい出力振動
- (2) 冷却材流量率変化に対する炉出力の過渡応答
- (3) 周波数応答における冷却材流量率が低下した条件下の炉出力のいちじるしい共鳴ピーク
- (4) 出力上昇試験中の燃料一部の melt down などがある^①。

(2), (4) の特性によって正の出力係数の存在が認められ、これが不安定性の一因をなすものとして、その機構が一時非常に問題視された。現在では炉心の半径方向の発熱量分布にもとづく燃料棒の内側わん曲によるものと考えられている。

従来、(4) の melt down の問題は正の出力係数の存在によって充分解釈できたものと見なされ、不安定性に関する研究はほとんど周波数応答に関する(3)の問題の解明に努力が払われてきた。しかし、それらの理論において、この不安定の主要原因とされた負の出力係数の大きい遅れの機構が明らかにされなかった。

著者らは前報^②において Mark II 炉心の共鳴不安定における負の反応度の10秒に達する遅れ機構を明らかにし、燃料棒わん曲の除去を目標として設計された Mark II 炉心が安定化したことについて検討を行なった。正の出力係数が除かれたこと以外に、結果として

負の反応度の大きな遅れが減ぜられていることがこの安定化を非常に促進しているという知見を提出した。

本報は前報において導入した Mark II についての伝達関数構成の方法にもとづいて、残されている(1), (2)の過渡特性を検討したものである。

I. 伝達関数とブロック線図

われわれは EBR-1 のフィードバック反応度をつぎのように表わした。

$$\frac{n_0 \delta k_f(s)}{\delta n(s)} \equiv H(s) = \alpha_c \frac{n_0 \delta \bar{T}_c(s)}{\delta n(s)} + (\alpha_f + \alpha_B) \frac{n_0 \delta \bar{T}_f(s)}{\delta n(s)} + \alpha_s \frac{n_0 \delta T_s(s)}{\delta n(s)} \quad (1)$$

ただし、 δk_f : フィードバック反応度

n : 中性子密度, n_0 : 定常値

α : 反応度温度係数

α_B : 燃料棒わん曲にもとづく反応度の温度係数

T : 温度

$\bar{T}$: 炉心軸方向の炉心長についての平均値

δ : 定常値よりの偏差量

(s): Laplace 変換の変数

添字 c, f, s は冷却材, 燃料, 構造材を表す

(1)式において、第1項は冷却材の密度にもとづく負の反応度、第2項は燃料密度にもとづく負の反応度

* 東京工業大学 原子炉研究施設 (Res. Lab. of Nucl. Reactor, Tokyo Inst. of Technology)

** 三菱原子力工業(株) (Mitsubishi Atomic Power Ind., Inc.)

とわん曲にもとづく正の反応度，第3項は構造材(燃料棒支持板)の膨脹にもとづく負の反応度である。

これらの反応度は炉内の温度分布に依存する。炉内温度分布に影響する操作因子は炉出力，冷却材流速(冷却材流量率)，冷却材入口温度である。これらの関係を第1図にブロック線図で表わした。

第1図 原子炉のブロック表示

いま，外部から与える反応度 δk_c ，冷却材流速変化，冷却材炉心入口温度変化をこの原子炉系に対する入力とし，これらの入力に対する炉出力の伝達関数を導こう。

炉内温度分布は次式によってきまるものとする。

$$l \geq x \geq 0$$

$$\begin{aligned} C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} &= Kn \sin \frac{\pi}{l} x - k(T_f - T_c) \\ C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} &= k(T_f - T_c) - C_c v \frac{\partial T_c}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$L \geq x \geq l$$

$$\begin{aligned} C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} &= -k'(T_f - T_c) \\ C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} &= k'(T_f - T_c) - C_c v \frac{\partial T_c}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.2)$$

ただし， C_f, C_c ：燃料棒，冷却材の炉心単位長当りの熱容量

k ：炉心単位長当りの熱伝達に関する係数

v ：冷却材流速

x ：炉心軸方向座標(炉心入口で $x=0$)

l ：炉心発熱部の x 方向長さ

L ：炉心入口から燃料棒支持板までの距離

Kn ：炉心単位長当りの発熱量($x=l/2$)

k' は炉心出口より上方におけるそれぞれの量に対応している。

(2)式において，炉を燃料棒に沿った軸方向について2領域に分割している。(2.1)式は高濃縮燃料の装てんされている領域(炉心)に関するもので，ここで正弦状の発熱量分布を仮定している。(2.2)式は炉心出口より燃料棒支持板までの領域，すなわち上部ブランケットと燃料棒のハンドルといわれている部分に関するもので，この領域では発熱量はないとしている。

中性子密度が δn ，冷却材流速が δv ，冷却材入口温度が δT_{c0} だけ定常値より変化した場合の炉心内の温度変化は，(2.1)式において流速の変化は炉心のどの位置においても同様であるとし， $\delta v(\partial \delta T_c / \partial x)$ を2次の微少量として無視することにする，

$$\begin{aligned} \delta T_c(s, x) &= \frac{F(s, x)}{1 + \tau_{fs}} \frac{\delta n(s)}{n_0} - F(s, x) \frac{\delta v(s)}{v_0} \\ &\quad + T_{c0} e^{-\lambda(s)x} \cdot \frac{\delta T_{c0}(s)}{T_{c0}} \\ \delta T_f(s, x) &= \left\{ \frac{F(s, x)}{(1 + \tau_{fs})^2} + \frac{Kn_0 \sin \pi x / l}{k(1 + \tau_{fs})} \right\} \frac{\delta n(s)}{n_0} \\ &\quad - \frac{F(s, x)}{1 + \tau_{fs}} \frac{\delta v(s)}{v_0} + \frac{T_{c0} e^{-\lambda(s)x}}{1 + \tau_{fs}} \frac{\delta T_{c0}(s)}{T_{c0}} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし，

$$\begin{aligned} F(s, x) &\equiv \frac{Kn_0 l}{C_c v (\pi^2 + \lambda^2(s) l^2)} (l \lambda(s) \sin \pi x / l \\ &\quad - \pi \cos \pi x / l + \pi e^{-x \lambda(s)}) \\ \lambda(s) &\equiv \frac{s}{v_0} \left(1 + \frac{C_f / C_c}{1 + \tau_{fs}} \right) \\ \tau_{fs} &\equiv C_f / k \end{aligned}$$

燃料棒支持板の温度変化は冷却材との温度差を無視し， $x=L$ における冷却材温度変化で表わすことにする。そうすると(2.1)，(2.2)式より

$$\begin{aligned} \delta T_c(s) &= \delta T_c(s, L) = \delta T_c(s, l) e^{-\phi(s)} \\ &= \left\{ H_{11}(s) \frac{\delta n(s)}{n_0} + H_{12}(s) \frac{\delta v(s)}{v_0} \right. \\ &\quad \left. + H_{13} \frac{\delta T_{c0}(s)}{T_{c0}} \right\} H_L(s) \end{aligned} \quad (4)$$

ただし，

$$\begin{aligned} H_{11}(s) &\equiv \frac{F(s, l)}{1 + \tau_{fs}}, & H_{12}(s) &\equiv -F(s, l) \\ H_{13}(s) &\equiv T_{c0} e^{-\lambda(s)l}, & H_L(s) &\equiv e^{-\phi(s)} \\ \phi(s) &\equiv \frac{L-l}{v_0} s \left(1 + \frac{C_f / C_c}{1 + \tau_{fs}} \right), & \tau_{fs} &\equiv C_f / k \end{aligned}$$

(3)式より炉心内冷却材，燃料の温度変化の x についての平均値を求めれば，

$$\delta \bar{T}_c(s) = H_{c1}(s) \frac{\delta n(s)}{n_0} + H_{c2}(s) \frac{\delta v(s)}{v_0} + H_{c3}(s) \frac{\delta T_{c0}(s)}{T_{c0}}$$

観測されている出力振動を第4図に示した。この出力振動は異常な運転条件下において、運転中に炉の出力レベルを変えようとした場合に観測され、とくに高出力の場合にそのようであったと報告されている(運転条件を示す量は示されていない)⁽¹⁾。

第4図 EBR-1, Mark II の出力振動

第3図の計算値において、冷却材流量率が低下した場合、周期25秒程度の観測されているものと同様の傾向の出力振動がえられている。第4図の出力振動はこのような運転条件下において観測されたものと推定される。

また、冷却材流量率が定格で、炉の出力レベルが高い場合にもはげしい出力振動がえられているが、この場合には振動周期は前の場合より短くなっている。

このような特性は当然の周波数特性に対応している。共鳴の主要原因は大きい遅れを伴う構造材にもとづく負の反応度であり、その大きさは冷却材流量率の低下、出力レベルの上昇によって増大し、共鳴は

いちじるしく、すなわち振動はいちじるしくなる。この負の反応度の遅れは主として(4)式の $e^{-\phi(t)}$ にもとづいて生ずる。この遅れは冷却材流速に反比例して増大し、95 g/m 程度の流量率の場合、約10秒のむだ時間に相当する大きさに達する。共鳴周波数は流量率の低下に従って低周波数に移行する⁽²⁾⁽³⁾。

第3図における応答の振幅は第4図の場合と比べて小さく計算されている。

(7)式の $H_1(s)$ は n_0 に依存しているから、周波数応答における共鳴ピークは基準出力に依存する。共鳴の程度がいちじるしい場合、僅かの基準出力の変化が共鳴ピークの大きさに与える影響はいちじるしい。過渡応答における振幅は周波数応答における共鳴ピークに対応し、基準出力の僅かの違いによってその大きさは非常に変化するものである。したがって、実測値とこの例の計算値との振幅にかなりの差異があっても、明記されていない実測値の基準運転出力という操作量は大きく違わないと考えられる。

流量率変化の実験は出力 7.1 kW 流量率 45 g/m, 出力 8 kW 流量率 21 g/m という低出力において行なわれた。測定装置の時定数に問題があって、応答の時間についての定量的結果はえられず、定性的結果がつぎのように報告されている⁽¹⁾。

冷却材流量率を急激に減少させた場合、出力上昇を示した後徐々に初期出力以下の出力レベルに低下する。また、流量率を急激に増加した場合、出力はこれと逆の特性を示す。

第5図中(1)は(7)式を用い流量率変化に対する応答

第5図 ステップ状冷却材流量率変化に対する炉出力の応答

を7.1kW, 45 g/m という条件について計算したものである。同図において流量率のステップ状の減少に対して炉出力は上昇を示した後、15秒程度の後、初期レベル以下の出力に低下するという傾向がえられている。同図中(2)は(1)と同じ流量率で炉出力が高い場合である。この場合には、フィードバック反応度が大きくなるので、この傾向がはっきりと示されている。

冷却材流量率の減少によって冷却材、燃料温度が上昇する。この結果、わん曲にもとづく正の反応度のために炉出力は増大する。しかし、時間的にずっと遅れて効いてくる構造材にもとづく負の反応度が効いてきて、出力上昇を抑えて炉出力は初期レベル以下に低下すると解釈される。わん曲による正の反応度が大きくなったとした場合(同図中(3))、出力上昇の程度はこれに従って大きくなる。

(7)式から明らかなように、反応度変化に対する炉出力の応答が振動的になる操作条件に対しては、冷却材流量率変化に対しても炉出力は振動的な応答を示すことが予想される。第5図中(4)はこのような場合の応答を示したものである。

冷却材炉心入口温度変化についての実験事実は報告されていないが、この場合についても同様にしてその応答を検討できる。第6図にその1例を示した。炉出力、冷却材流量率が定格の場合、冷却材入口温度の減少に対する応答(1)については、正の反応度のためその初期に出力は減少するが、その後は単調に増加して一定出力に落ち着くことになる。

Ⅲ. 結 言

著者らは前報において炉の熱系を分布定数系として、問題を線形化して取り扱い、Mark IIの負の出力係数における大きな遅れ機構を合理的に説明し、Mark

第6図 ステップ状冷却材炉心入口温度変化に対する炉出力の応答

ⅡおよびⅢの周波数特性の解析を行なった。本報において、同様の方法によって新たに冷却材流量率や冷却材炉心入口温度の変化に対する伝達関数を構成し、これを用いて残されている問題のMark IIの過渡特性の検討を行なった。すなわち、Mark IIの安定性が問題になる契機になった出力振動や、この炉の動特性において注目されている冷却材流量率変化に対する応答などを計算し、従来得られている実測による諸特性に説明を加えた。

(1962年 7月19日 受理)

— 参 考 文 献 —

- (1) F. W. THALGOTT, et al. : *B/Conf.*, P/1845, (1958).
- (2) 海老塚佳衛, 川上和士郎, 進藤益男 : 本誌, 3, No. 7, 522~530 (1961).
- (3) H. A. BETHE : *APDA-117*, (1956).
- (4) H. H. ROSENBRICK : *Proc. IEE-102*, B, 744, (1955).

本誌バックナンバー

会員は2割引で入手できる

本誌のバックナンバーは昭和34年6月創刊以来全部揃っております。会員には定価(200円)の2割引で頒布していますので、品切れにならぬうちに申し込み下さい。(送料実費)