

JAERI-M

6 2 7 2

ガス拡散プラントの非定常特性の解析

(1) 方形カスケード

1975年10月

成瀬 雄二・丸山 庸一郎・青地 哲男
東 邦夫*・山崎 博**・大藤 芳久**

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

Japan Atomic Energy Research Institute

ガス拡散プラントの非定常特性の解析

(1) 方形カスケード

日本原子力研究所・東海研究所・ウラン濃縮研究室

成瀬雄二，丸山庸一郎，青地哲男
東 邦夫^{*}，山崎 博^{**}，大藤芳久^{**}

(1975年9月27日受理)

ガス拡散法によるウラン濃縮プラントは，拡散筒，熱交換器，軸流圧縮機など主要コンポーネントの組合せを1段とし，これを約千段程度カスケードに配列した大規模な多段分離システムである。従って，プラントの設計，建設，運転にあたっては，あらかじめプラントの静特性と動特性を確実に把握し，その最適化をはからなければならない。

本報では，構成が単純で取扱いも比較的容易な方形カスケードについて非定常特性を明らかにするために，基礎方程式を誘導し，分離作業量が約8750 ton-SWU/yrのプラントを想定して，下記の項目を検討した。

- (1) 運転開始から定常状態に到達するまでの過渡状態の解析 (スタートアップの検討)
- (2) 定常状態にあるプラントシステム (カスケード) の1部の除外および挿入に関する解析 (カスケードの1部が故障した場合の検討)

* 京都大学

** 日本揮発油(株)

Studies on Dynamic Behavior of Gaseous Diffusion Plant
(1) Square Cascade

Yuji NARUSE, Yoichiro MARUYAMA, Tetsuo AOCHI,
Kunio HIGASHI*, Hiroshi YAMAZAKI** and Yoshihisa DAITO**

Uranium Enrichment Laboratory, Tokai, JAERI

(Received September 27, 1975)

A gaseous diffusion plant is a large-scale, multi-stage separation system composed of about a thousand stages in cascade to obtain the slightly enriched uranium for LWR.

In order to design, construct and operate the plant, it is necessary to know static and dynamic behaviors of the system.

Dynamic equations for the square cascade are derived and the 8750 ton-SWU/yr plant is analyzed. Transient behaviors are treated for the start-up and the removal/addition of any blocks of the cascade at steady state.

* Kyoto University

** Japan Gasoline Co.

目 次

1. はじめに	1
2. 基礎方程式の誘導	2
3. 計算結果	9
3.1 モデルプラントの設定	9
3.2 カスケード内ホールドアップの推定	10
3.3 スタートアップの検討	15
3.3.1 全還流操作によるスタートアップ (Case A-I)	17
3.3.2 定常供給および抜き出しを行った場合のスタート アップ (Case A-II)	17
3.3.3 製品濃度が所定値に達した時点から製品の抜き出 しを開始する場合のスタートアップ (Case A-III)	20
3.4 カスケードの1部が故障した場合の検討	20
3.4.1 カスケードの1部除外 (Case B-I)	24
3.4.2 除外段のカスケードシステムへの復帰 (Case B-II)	31
3.5 シミュレーションプログラムの誤差評価	35
3.5.1 ブロック巾に伴う誤差	35
3.5.2 定常解との比較	35
3.5.3 既存文献における解析解との比較	37
4. おわりに	41
参考文献	41
Appendix シミュレーション・プログラムの内容	42
1. プログラムの概要	42
2. 計算式	42
3. フロー・チャート	45
4. 記号リスト	46
5. 計算プログラムリスト	49

1 はじめに

ガス拡散法によるウラン濃縮プラントは、拡散筒、熱交換器、軸流圧縮機など主要コンポーネントの組合せを1段とし、これを約千段程度カスケードに連結した大規模な多段分離システムである。従って、プラントの設計、建設、運転にあたっては、あらかじめプラントの静特性と動特性を確実に把握し、その最適化をはからなければならない。

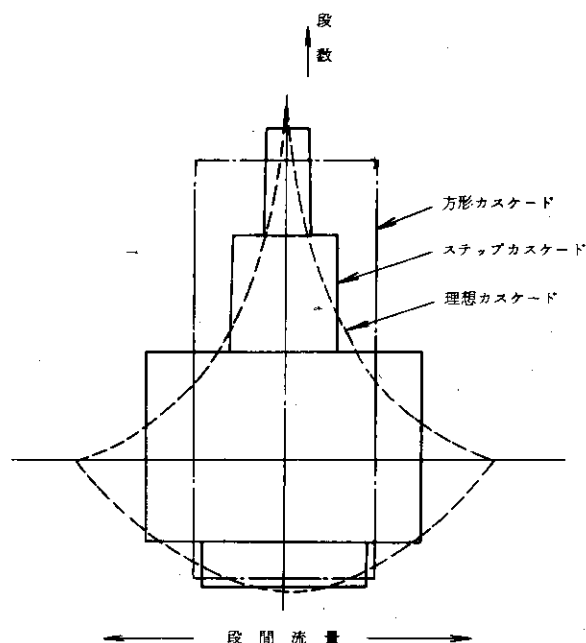


図1-1 カスケード形式の比較

図1-1は、カスケード形式の代表例を示したものである。理想カスケード（点線で示す）は、各段の流れの合流点において濃度的に混合があってはならないという条件（非混合の条件）を満足し、最も無駄の少ないものである。しかし、1段ごとに装置の大きさが異なり、建設、運転、制御面を考えると現実的なものとはいえない。方形カスケード（1点鎖線で示す）は、各段の大きさを全て等しくしたもので、理想カスケードとは全く対照的である。即ち、方形カスケードでは、循環流量の総和（圧縮機所要動力と考えてよい）は理想カスケードに比べてかなり大きく、動力面では不利になるが、装置面が単純であるという大きな利点を有している。ステップカスケード（実線で示す）は、プラント規模を小さくするという理想カスケードの利点と構成が単純であるという方形カスケードの長所を兼ねそなえたもので、短い（段数の少ない）方形カスケードを幾ステップか積み重ね、全体として理想カスケードの形に近づけようとしたものである。

ここでは、ガス拡散プラントの非定常特性を明らかにするための第1歩として、構成が単純で、取扱いも比較的容易な方形カスケードを検討の対象に取上げた。実際に採用されるカスケード形式は、上述のごとく、ステップカスケードであるが、基本的特性は両者とも類似しており、得られた知見は有効に利用できると思われる。

以上のような考え方のもとに、まず、方形カスケードに対する基礎方程式を誘導し、次いで、

ORO-685の記述に合わせるために分離作業量が8750 ton-SWU/yrのプラントを想定して、下記の項目につき若干の検討を加えた。

- (1) 運転開始から定常状態に到達するまでの過渡状態の解析 (スタートアップの検討)
- (2) 定常状態にあるプラントシステム (カスケード) の1部の除外および挿入に関する解析 (カスケードの1部が故障した場合の検討)

2 基礎方程式の誘導

方形カスケードは、図2-1に示すように、同じ分離能力を有する数多くの濃縮過程から構成されている。

いま、各濃縮段における着目成分 (ここでは、U-235) のホールドアップの時間的变化は、物質収支より、

$$\left[\begin{array}{l} \text{第 } n \text{ 段目における} \\ \text{着目成分のホールド} \\ \text{アップの変化速度} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{第 } n \text{ 段目へ} \\ \text{の着目成分} \\ \text{の流入速度} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{第 } n \text{ 段目から} \\ \text{の着目成分の} \\ \text{流出速度} \end{array} \right] \dots \dots (2.1)$$

で表わされる。

ここで、基礎式の導出に際し、次の仮定を設ける。

- ① 各流量に時間的变化はない。
- ② 濃縮流 (拡散流, 上昇流) は、全段にわたり一定である。
- ③ ホールドアップは、高圧側にその大部分が存在する。また、この際の高圧側の濃度は、減損流 (未拡散流, 下降流) の濃度で代表する。
- ④ カスケード全段にわたり、プロセスガスの漏れ出しはないものとする。

そこで、(2.1)式に基づいて、各部の基礎式を導くと次のようになる。

製品抜き出し段 ($n=1$) について

$$H \frac{dx_1''}{d\theta} = L' x_2' - L_e'' x_1'' - P x_1$$

濃縮部 ($n=2, 3, \dots, N_f-1$) について

$$H \frac{dx_n''}{d\theta} = L' x_{n+1}' + L_e'' x_{n-1}'' - L' x_n' - L_e'' x_n''$$

原料供給段 ($n=N_f$) について

$$H \frac{dx_{N_f}''}{d\theta} = L' x_{N_f+1}' + L_e'' x_{N_f-1}'' - L' x_{N_f}' - L_s'' x_{N_f}'' + F x_F \dots (2.2)$$

回収部 ($n=N_f+1, \dots, N_b-1$) について

$$H \frac{dx_n''}{d\theta} = L' x_{n+1}' + L_s'' x_{n-1}'' - L' x_n' - L_s'' x_n''$$

廃棄材抜き出し段 ($n=N_b$) について

$$H \frac{dx_{N_b}''}{d\theta} = L_s'' x_{N_b-1}'' - L' x_{N_b}' - W x_{N_b}''$$

ORO-685の記述に合わせるために分離作業量が8750 ton-SWU/yrのプラントを想定して、下記の項目につき若干の検討を加えた。

- (1) 運転開始から定常状態に到達するまでの過渡状態の解析 (スタートアップの検討)
- (2) 定常状態にあるプラントシステム (カスケード) の1部の除外および挿入に関する解析 (カスケードの1部が故障した場合の検討)

2 基礎方程式の誘導

方形カスケードは、図2-1に示すように、同じ分離能力を有する数多くの濃縮過程から構成されている。

いま、各濃縮段における着目成分 (ここでは、U-235) のホールドアップの時間的变化は、物質収支より、

$$\left[\begin{array}{l} \text{第 } n \text{ 段目における} \\ \text{着目成分のホールドアップ} \\ \text{の変化速度} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{第 } n \text{ 段目へ} \\ \text{の着目成分} \\ \text{の流入速度} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{第 } n \text{ 段目から} \\ \text{の着目成分の} \\ \text{流出速度} \end{array} \right] \dots\dots (2.1)$$

で表わされる。

ここで、基礎式の導出に際し、次の仮定を設ける。

- ① 各流量に時間的变化はない。
- ② 濃縮流 (拡散流, 上昇流) は、全段にわたり一定である。
- ③ ホールドアップは、高圧側にその大部分が存在する。また、この際の高圧側の濃度は、減損流 (未拡散流, 下降流) の濃度で代表する。
- ④ カスケード全段にわたり、プロセスガスの漏れ出しはないものとする。

そこで、(2.1)式に基づいて、各部の基礎式を導くと次のようになる。

製品抜き出し段 ($n=1$) について

$$H \frac{dx_1''}{d\theta} = L' x_2' - L_e'' x_1'' - P x_1$$

濃縮部 ($n=2, 3, \dots, N_f-1$) について

$$H \frac{dx_n''}{d\theta} = L' x_{n+1}' + L_e'' x_{n-1}'' - L' x_n' - L_e'' x_n''$$

原料供給段 ($n=N_f$) について

$$H \frac{dx_{N_f}''}{d\theta} = L' x_{N_f+1}' + L_e'' x_{N_f-1}'' - L' x_{N_f}' - L_s'' x_{N_f}'' + F x_P \dots (2.2)$$

回収部 ($n=N_f+1, \dots, N_b-1$) について

$$H \frac{dx_n''}{d\theta} = L' x_{n+1}' + L_s'' x_{n-1}'' - L' x_n' - L_s'' x_n''$$

廃棄材抜き出し段 ($n=N_b$) について

$$H \frac{dx_{N_b}''}{d\theta} = L_s'' x_{N_b-1}'' - L' x_{N_b}' - W x_{N_b}''$$

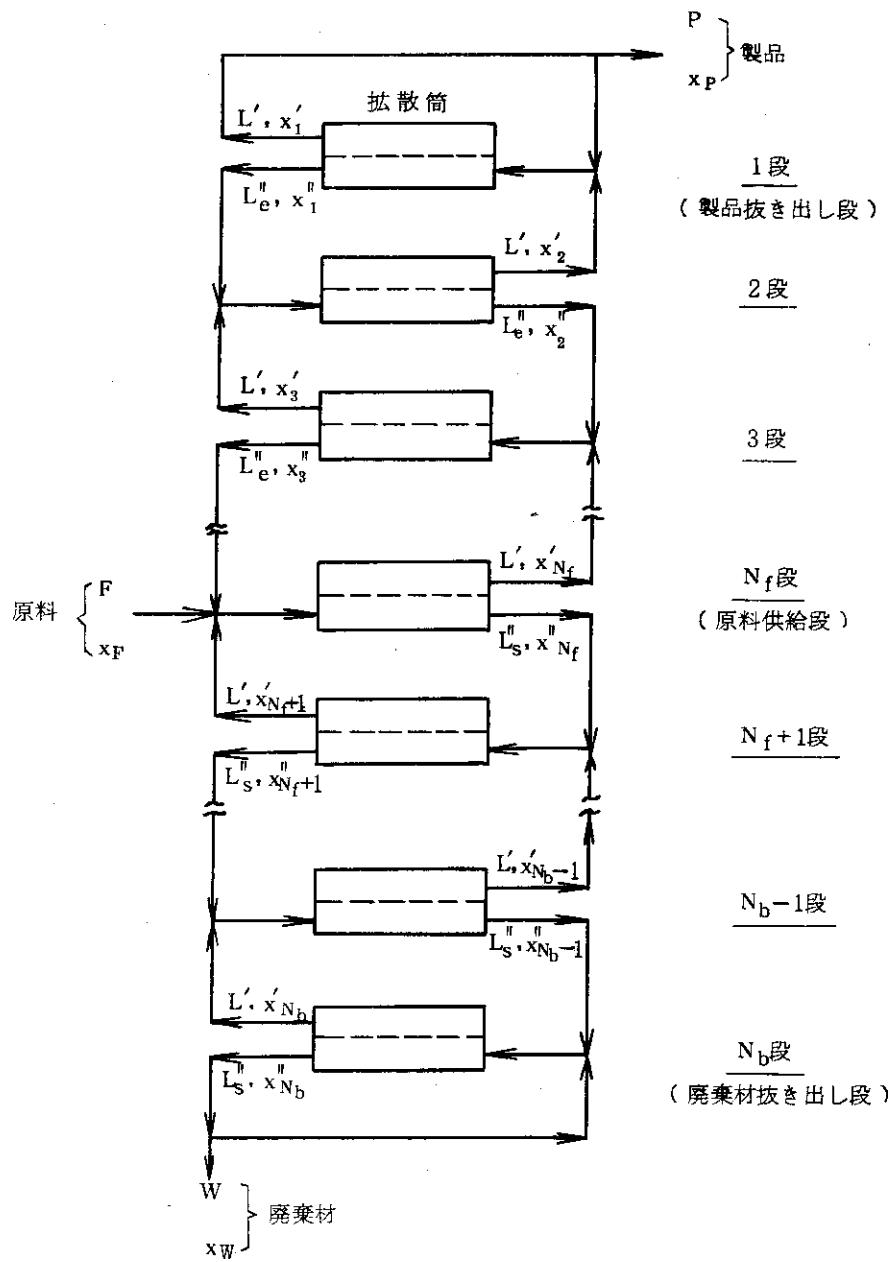


図 2 - 1 方形カスケードモデル

ここで、

H : 高圧側の1段当りのホールドアップ

P : 製品抜き出し流量

F : 原料供給流量

W : 廃棄材抜き出し流量

L' : 濃縮流流量

L'' : 減損流流量

x' : 濃縮流濃度

x'' : 減損流濃度

x_p : 製品濃度

x_f : 原料濃度

x_w : 廃棄材濃度

θ : 時間

n : 段番号 (製品抜き出し段から順に1, 2, 3, ……段と番号をつける。但し, 原料供給段をN_f, 廃棄材抜き出し段をN_wとする。)

添字 e : 濃縮部

s : 回収部

分離係数 α の定義から, n 段目の濃度 x'_n と x''_n との関係は,

$$x'_n = \frac{\alpha x''_n}{1 + (\alpha - 1) x''_n} = A_n x''_n \quad \dots\dots (2.3)$$

ここで

$$A_n = \frac{\alpha}{1 + (\alpha - 1) x''_n} = \frac{1 + \epsilon}{1 + \epsilon \cdot x''_n} \quad \dots\dots (2.4)$$

$$\epsilon = \alpha - 1 \quad \dots\dots (2.5)$$

また, 無次元時間 τ を次のように定義する。

$$\tau = \frac{L'}{H} \theta \quad \dots\dots (2.6)$$

さらに, 濃縮部および回収部における濃縮流と減損流の比をそれぞれ λ_e, λ_s とすると, 次の関係が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_e &= L''_e / L' \\ \lambda_s &= L''_s / L' \\ P/L' &= 1 - (L''_e / L') = 1 - \lambda_e \\ W/L' &= (L''_s / L') - 1 = \lambda_s - 1 \\ F/L' &= (P+W) / L' = \lambda_s - \lambda_e \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (2.7)$$

(2.3) ~ (2.7) 式を (2.2) 式に代入し、整理すると、

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d x_1''}{d \tau} &= A_2 x_2'' - \lambda_e x_1'' - A_1 (1 - \lambda_e) x_1'' & (n=1) \\
 \frac{d x_n''}{d \tau} &= A_{n+1} x_{n+1}'' + \lambda_e x_{n-1}'' - A_n x_n'' - \lambda_e x_n'' & (n=2, 3, \dots, N_f-1) \\
 \frac{d x_{N_f}''}{d \tau} &= A_{N_f+1} x_{N_f+1}'' + \lambda_e x_{N_f-1}'' - A_{N_f} x_{N_f}'' \\
 &\quad - \lambda_s x_{N_f}'' + (\lambda_s - \lambda_e) x_p & (n=N_f) \\
 \frac{d x_n''}{d \tau} &= A_{n+1} x_{n+1}'' + \lambda_s x_{n-1}'' - A_n x_n'' - \lambda_s x_n'' & (n=N_f+1, \dots, N_b-1) \\
 \frac{d x_{N_b}''}{d \tau} &= \lambda_s x_{N_b-1}'' - A_{N_b} x_{N_b}'' - (\lambda_s - 1) x_{N_b}'' & (n=N_b)
 \end{aligned} \right\} \dots (2.8)$$

ガス拡散プラントでは、1段当りの濃度変化は極めて緩やかであるため、段数 n を連続量とみなし、 n に関して微分可能な連続函数 $x(n)$ を定義して、テーラー展開の低次近似を行うと、

$$\left. \begin{aligned}
 x_2'' &\simeq x(1) + \left. \frac{\partial x(n)}{\partial n} \right|_{n=1} \\
 x_{n-1}'' &\simeq x(n) - \left. \frac{\partial x(n)}{\partial n} \right|_n + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 x(n)}{\partial n^2} \right|_n \\
 x_{n+1}'' &\simeq x(n) + \left. \frac{\partial x(n)}{\partial n} \right|_n + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 x(n)}{\partial n^2} \right|_n \\
 x_{N_b-1}'' &\simeq x(n) - \left. \frac{\partial x(n)}{\partial n} \right|_{n=N_b}
 \end{aligned} \right\} \dots (2.9)$$

また、(2.4) 式で定義される A_n も n の連続函数と考えて $A(n)$ を導入し、テーラー展開の一次項までとると、

$$A_{n+1} \simeq A(n) + \left. \frac{\partial A(n)}{\partial n} \right|_n \dots (2.10)$$

$$A(n) = \frac{1 + \epsilon}{1 + \epsilon \cdot x(n)} \dots (2.11)$$

ここで、 $\partial A(n) / \partial n$ は極めて小さい値となるため、

$$A_{n+1} \simeq A(n) \dots (2.12)$$

と近似することができる。

(2.9), (2.12) 式を (2.8) 式に代入して、整理すると、次の関係式を得る。

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial x}{\partial \tau} &= \lambda_e (A-1) x + A \frac{\partial x}{\partial n} & (n=1) \\
 \frac{\partial x}{\partial \tau} &= \frac{A+\lambda_e}{2} \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial n^2} + (A-\lambda_e) \frac{\partial x}{\partial n} & (1 < n < N_f) \\
 \frac{\partial x}{\partial \tau} &= \frac{A+\lambda_e}{2} \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial n^2} + (A-\lambda_e) \frac{\partial x}{\partial n} + (\lambda_s - \lambda_e) (x_p - x) & (n=N_f) \\
 \frac{\partial x}{\partial \tau} &= \frac{A+\lambda_s}{2} \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial n^2} + (A-\lambda_s) \frac{\partial x}{\partial n} & (N_f < n < N_b) \\
 \frac{\partial x}{\partial \tau} &= (1-A) x - \lambda_d \frac{\partial x}{\partial n} & (n=N_b)
 \end{aligned} \right\} \dots (2.13)$$

(2.13) 式が求める基礎方程式である。

本システムの操作量としては、製品抜き出し量等の流量変化操作による制御が考えられるが、システム内の流量変化は係数 λ の変更として現われる。しかし、 λ を任意に操作したい場合には解析解は存在せず、一般的に解を求めるには、電子計算機等による数値計算に頼らざるを得ない。

次に、(2.13) 式の数値計算解を求めるために、これを連立微分方程式の形に変換する。

まず、段方向に δn づつ間隔をおいた代表点を考える。この場合、全代表点数 I は、次式を満足する必要がある。

$$I = \frac{N_b}{\delta n} + 1 \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

また、原料供給段に対応した代表点 I_p は、

$$I_{N_f} = \frac{N_f}{\delta n} + 1 \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

カスケードの製品抜き出し段(最上段)、原料供給段、廃棄材抜き出し段(最下段)を除いた点については、段方向の偏微分は前後の代表点濃度を用いて差分近似できる。即ち、

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial x}{\partial n} \Big|_{n=i} &\approx \frac{X_{i+1} - X_{i-1}}{2 \delta n} \\
 \frac{\partial^2 x}{\partial n^2} \Big|_{n=i} &\approx \frac{X_{i+1} - 2X_i + X_{i-1}}{(\delta n)^2}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.16)$$

ここで、 X_i は代表点 i の濃度である。

(2.16) 式を(2.13)式に代入して、整理すると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX_i}{d\tau} &= \frac{1}{2\delta n} \left\{ \frac{A+\lambda_e}{\delta n} - (A-\lambda_e) \right\} X_{i-1} - \frac{A+\lambda_e}{(\delta n)^2} X_i \\ &\quad + \frac{1}{2\delta n} \left\{ \frac{A+\lambda_e}{\delta n} + (A-\lambda_e) \right\} X_{i+1} \quad (i=2, \dots, I_{N_f-1}) \\ \\ \frac{dX_i}{d\tau} &= \frac{1}{2\delta n} \left\{ \frac{A+\lambda_s}{\delta n} - (A-\lambda_s) \right\} X_{i-1} - \frac{A+\lambda_s}{(\delta n)^2} X_i \\ &\quad + \frac{1}{2\delta n} \left\{ \frac{A+\lambda_s}{\delta n} + (A-\lambda_s) \right\} X_{i+1} \quad (i=I_{N_f+1}, \dots, I_{N_b-1}) \end{aligned} \right\} \dots\dots (2.17)$$

次に、カスケードの最上段、原料供給段、最下段については、(2.16)式と同じような差分近似を用いただけでは、系全体の物質収支を満足する方程式を得ることはできない。従って、系外と物質の出入のある代表点では、新たに系の物質収支が満足されるような境界条件として、それらの代表点の方程式を誘導する必要がある。

そこで、代表点に選ばれた段以外の濃度は、それをはさむ2つの代表点濃度の直線的内挿により表わされるものとして、カスケードの全ホールドアップ H_T を考えると、次の関係式を得る。

$$H_T = \frac{H}{2} \sum_{i=1}^{I-1} (X_i + X_{i+1}) \cdot \delta n \quad \dots\dots (2.18)$$

一方、系全体の物質収支は、次式で表わされる。

$$\frac{1}{H} \frac{dH_T}{d\tau} = \frac{F}{L'} x_F - \frac{P}{L'} X_1 - \frac{W}{L'} X_I \quad \dots\dots (2.19)$$

(2.18)、(2.19)式より、

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{I-1} \left(\frac{dX_i}{d\tau} + \frac{dX_{i+1}}{d\tau} \right) \cdot \delta n = \frac{F}{L'} x_F - \frac{P}{L'} X_1 - \frac{W}{L'} X_I \quad \dots\dots (2.20)$$

(2.20)式に(2.17)式を代入し、整理すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} &\left\{ \frac{1}{2} \frac{dX_1}{d\tau} + aX_1 - cX_2 + \frac{P}{(\delta n)L'} X_I \right\} \\ &+ \left\{ \frac{dX_{I_N}}{d\tau} - aX_{I_{N_f-1}} + (c+d)X_{I_{N_f}} - gX_{I_{N_f+1}} - \frac{F}{(\delta n)L'} x_F \right\} \\ &+ \left\{ \frac{1}{2} \frac{dX_I}{d\tau} - dX_{I-1} + gX_I + \frac{W}{(\delta n)L'} X_I \right\} = 0 \quad \dots\dots (2.21) \end{aligned}$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned}
 a &= \frac{1}{2(\delta n)} \left\{ \frac{A+\lambda_e}{\delta n} - (A-\lambda_e) \right\} \\
 c &= \frac{1}{2(\delta n)} \left\{ \frac{A+\lambda_e}{\delta n} + (A-\lambda_e) \right\} \\
 d &= \frac{1}{2(\delta n)} \left\{ \frac{A+\lambda_s}{\delta n} - (A-\lambda_s) \right\} \\
 g &= \frac{1}{2(\delta n)} \left\{ \frac{A+\lambda_s}{\delta n} + (A-\lambda_s) \right\}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots (2.22)$$

(2.21) 式において、各 { } が零であれば系全体の物質収支は満足され、これらは系外と物質の出入のある位置での境界条件となる。

以上の関係を整理すると、系全体の基礎式として次式が与えられる。

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{1}{2} \cdot \frac{dX_1}{d\tau} &= -aX_1 + cX_2 - \frac{P}{(\delta n)L'} X_1 & (i=1) \\
 \frac{dX_i}{d\tau} &= aX_{i-1} - (a+c)X_i + cX_{i+1} & (i=2, \dots, I_{N_f}) \\
 \frac{dX_{I_{N_f}}}{d\tau} &= aX_{I_{N_f}-1} - (c+d)X_{I_{N_f}} + gX_{I_{N_f}+1} + \frac{F}{(\delta n)L'} x_p & (i=I_{N_f}) \\
 \frac{dX_i}{d\tau} &= dX_{i-1} - (d+g)X_i + gX_{i+1} & (i=I_{N_f}+1, \dots, I-1) \\
 \frac{1}{2} \cdot \frac{dX_I}{d\tau} &= dX_{I-1} - gX_I - \frac{W}{(\delta n)L'} X_I & (i=I)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots (2.23)$$

系の経時的挙動は、代表段に対して初期濃度分布を与え、(2.23) 式で表わされる連立微分方程式を数値的に解くことにより得られる。

この数値計算には数種の方法が利用可能であるが、ここでは Runge-Kutta 法の改良計算法といわれている Runge-Kutta Merson 法を採用することにする。この計算法は、あらかじめ許容誤差を与えておくことにより、計算機プログラム内部で計算のキザミ巾を自動的に修正するもので、非定常応答が瞬間的に急変するような系の計算に便利である。

3 計算結果

3.1 モデルプラントの設定

現在、ガス拡散プラントの建設が議論される際、検討の対象となる規模（分離作業量）は、9000 ton-SWU/yr/基クラスのものである。ガス拡散プラントについて或る程度まで具体的な記述がなされている唯一の資料ともいえるORO-685においても、8750 ton-SWU/yrを標準のプラント規模としている。

ここでは、ORO-685の記述に合わせるために、計算例として、製品濃度が4.0%(wt.)、廃棄材濃度が0.25%(wt.)、原料に天然ウランを使用する分離作業量が8737 ton-SWU/yr（段数として切りのいい数字を選定するために、この値を採用した）の方形カスケードで構成されるガス拡散プラントを想定する。この場合には、

$$U = \left\{ V(x_P) - V(x_F) - (x_P - x_F) \frac{V(x_F) - V(x_W)}{x_F - x_W} \right\} P$$

ここで、U；分離作業量

V(x)；価値函数

..... (3.1)

$$V(x) = (2x - 1) \ln \frac{x}{1-x}$$

$$F = P + W$$

$$F x_F = P x_P + W x_W$$

なる関係式より、原料、製品、廃棄材の流量は以下のようになる。

$$\begin{cases} F = 1.624703 \text{ mol/sec} \\ P = 0.200000 \text{ mol/sec} \\ W = 1.424703 \text{ mol/sec} \end{cases}$$

次に、濃縮部および回収部の循環流量、所要段数を求める。方形カスケードの濃縮部においては、循環流量と所要段数の関係は次式で与えられる。

$$N_P = \frac{1}{(\alpha - 1) B} \ln \frac{1 + A}{1 - A}$$

ここで、

$$A = \frac{B(x_P - x_F)}{(x_F + x_P)(1 + C) - 2x_F x_P - 2C x_P}$$

..... (3.2)

$$B = \sqrt{1 + 2C(1 - 2x_P) + C^2}$$

$$C = \frac{P}{L_e''(\alpha - 1)}$$

$$L' = L_e'' + P$$

なお、回収部の所要段数は、 $P \rightarrow -W$ 、 $x_P \rightarrow x_W$ 、 $N_P \rightarrow -N_W$ と置換えて求めればよい。

図3-1は、拡散筒の分離係数 α を1.0040とした場合の濃縮部の計算結果である。回収部についても同様の計算を行い、上昇流量の総和（即ち、所要動力）が最小になる点を求めると、各循環流量および所要段数として次の値が得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{上昇流量;} \quad L' = 292.697 \text{ mol/sec} \\ \text{下降流量;} \quad \left\{ \begin{array}{l} L_e'' = 292.497 \text{ mol/sec (濃縮部)} \\ L_s'' = 294.121 \text{ mol/sec (回収部)} \end{array} \right. \\ \text{所要段数;} \quad \left\{ \begin{array}{l} N_P = 720 \text{ 段 (濃縮部)} \\ N_W = 600 \text{ 段 (回収部)} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

以上の結果をまとめたものが、図3-2に示すモデルガス拡散プラントである。以下の解析は、この図に示された値を用いて行うものとする。

3.2 カスケード内ホールドアップの推定

ガス拡散プラント内に存在するウランの量（ホールドアップ）を知るには、① 主要構成機器（拡散筒、熱交換器、圧縮機、配管など）の構造と容積、② カスケード内の圧力、温度分布、などが明らかにされている必要がある。

図3-3は、ORO-685に述べられている分離作業量8,750 ton-SWU/yrのガス拡散プラントの概念を示したものである。プラントは、濃縮部3ステップ、回収部3ステップからなるステップカスケードで構成され、全体の段数は1,180段（濃縮部700段、回収部480段）である。しかし、本文献には、隔膜の性能（分離係数、透過係数）、カスケード循環流量、圧力・温度条件などカスケード設計上重要な因子について何んらの記述もなされていない。

そこで、図表、写真などを手掛かりとして、カスケード内ホールドアップの推定を試みてみよう。

いま、カスケードは図3-4のように構成され、圧力、温度分布は図示したように6ブロックに分割できるものとする、カスケード1段当りのウランのホールドアップ M_t (mol)は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} M_t = & \frac{273}{760} \cdot \frac{10^3}{224} \left\{ \frac{p_1}{273+t_1} (p_1 V_C + p_1 V_P + p_1 V_D) + \frac{P_2}{273+t_2} \cdot p_2 V_D \right. \\ & + \frac{p_3}{273+t_3} (p_3 V_D + p_3 V_P) + \frac{p_4}{273+t_4} \cdot p_4 V_P \\ & \left. + \frac{p_5}{273+t_5} (p_5 V_D + p_5 V_P + p_5 V_C) + \frac{p_6}{273+t_6} \cdot p_6 V_C \right\} \dots (3.3) \end{aligned}$$

一方、低圧（濃縮流）側のホールドアップ M_1 は、

$$M_1 = \frac{p_5}{273+t_5} (p_5 V_D + p_5 V_P + p_5 V_C) \dots (3.4)$$

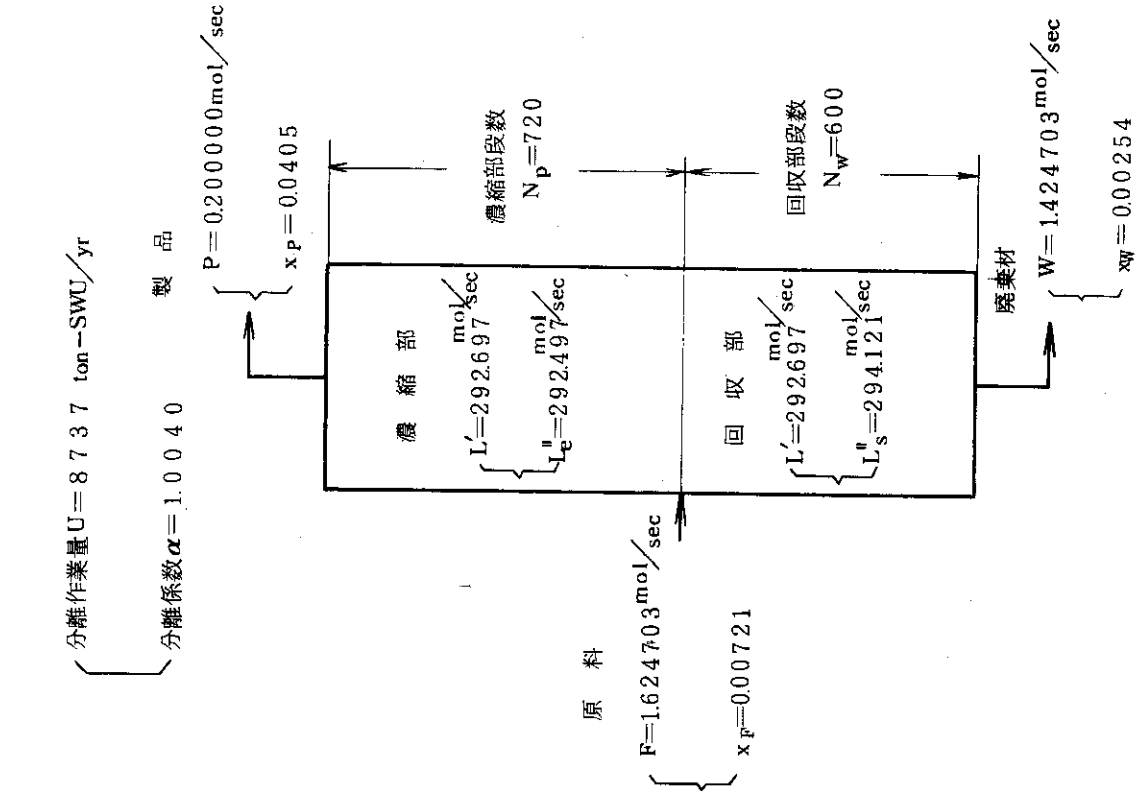


図 3-2 モデルガス拡散プラント (方形カスケード)

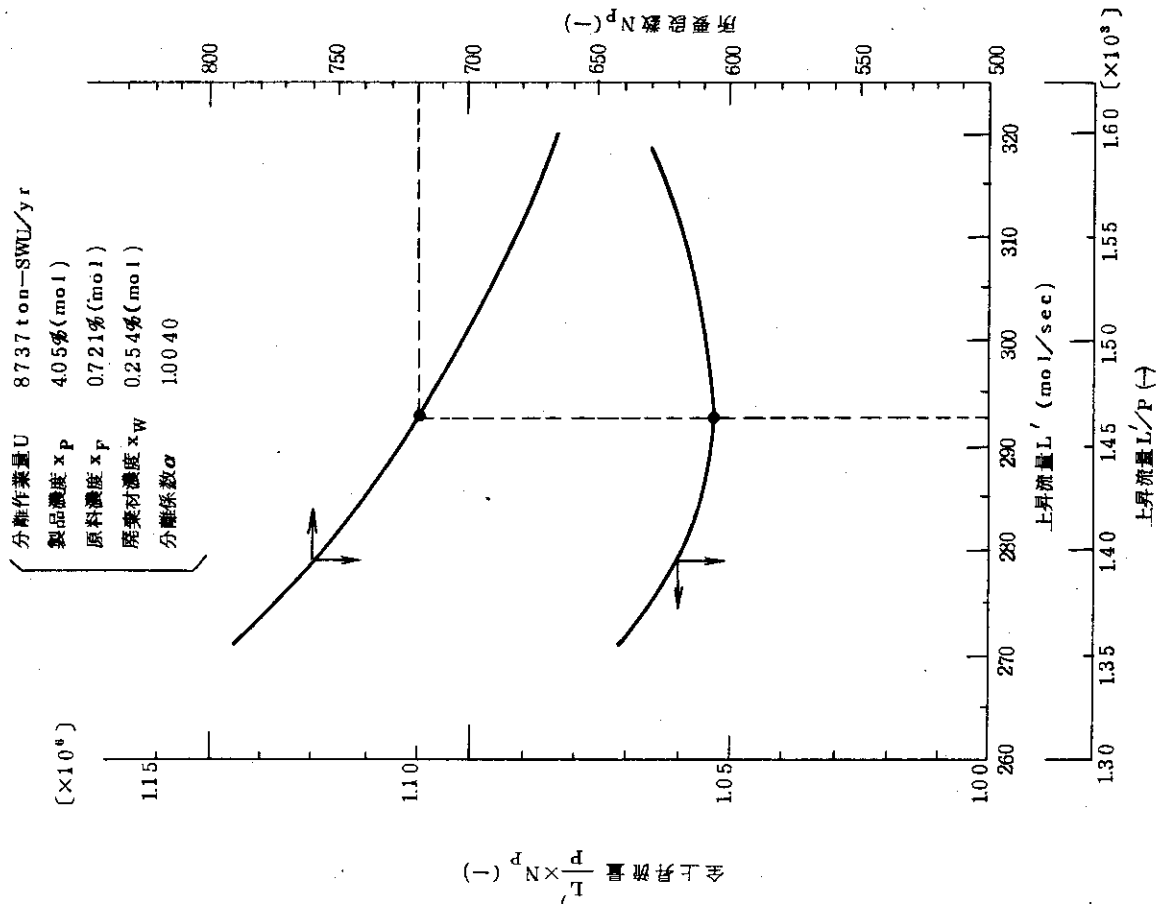


図 3-1 上昇流量と全上昇流量の関係 (濃縮部)

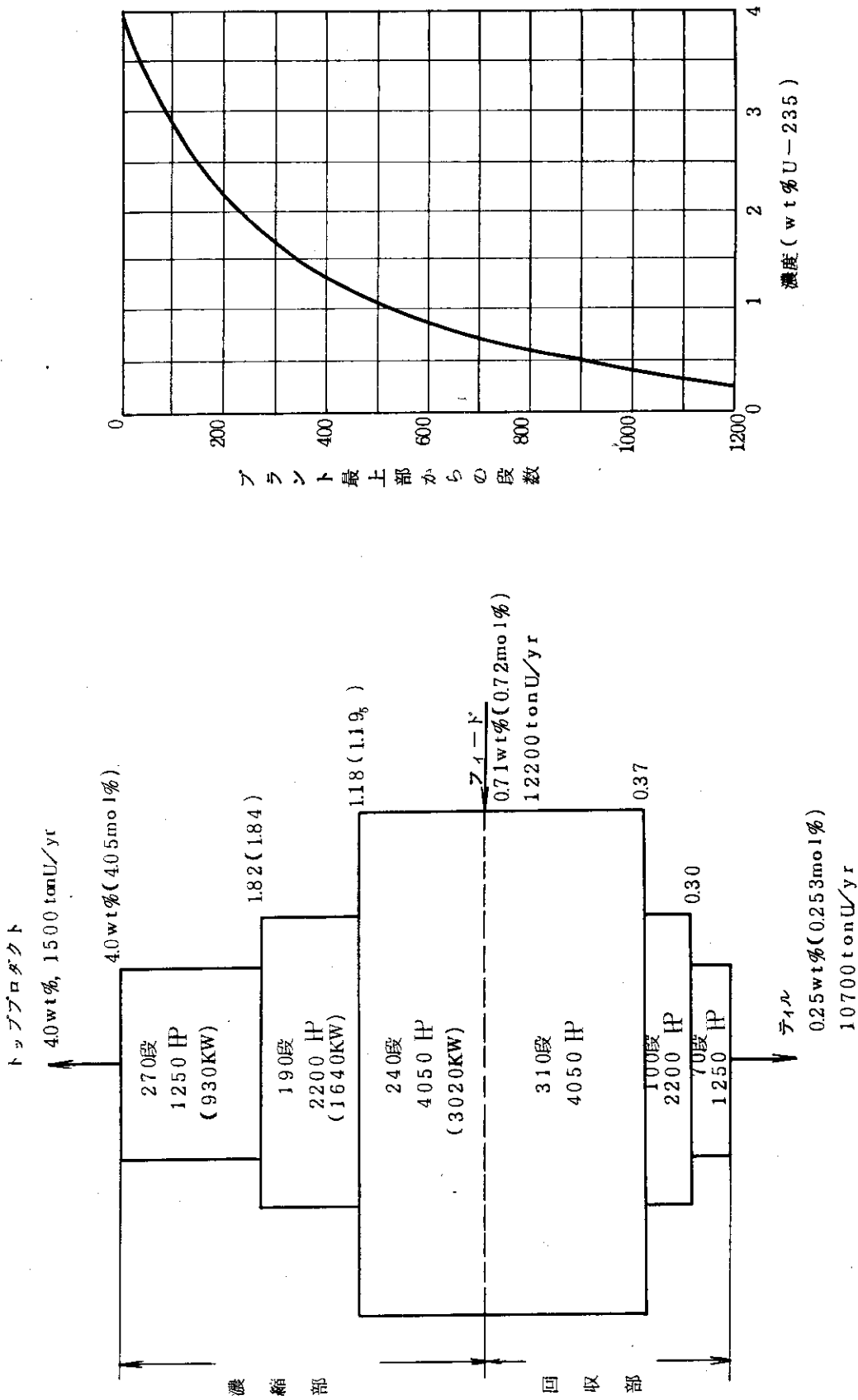
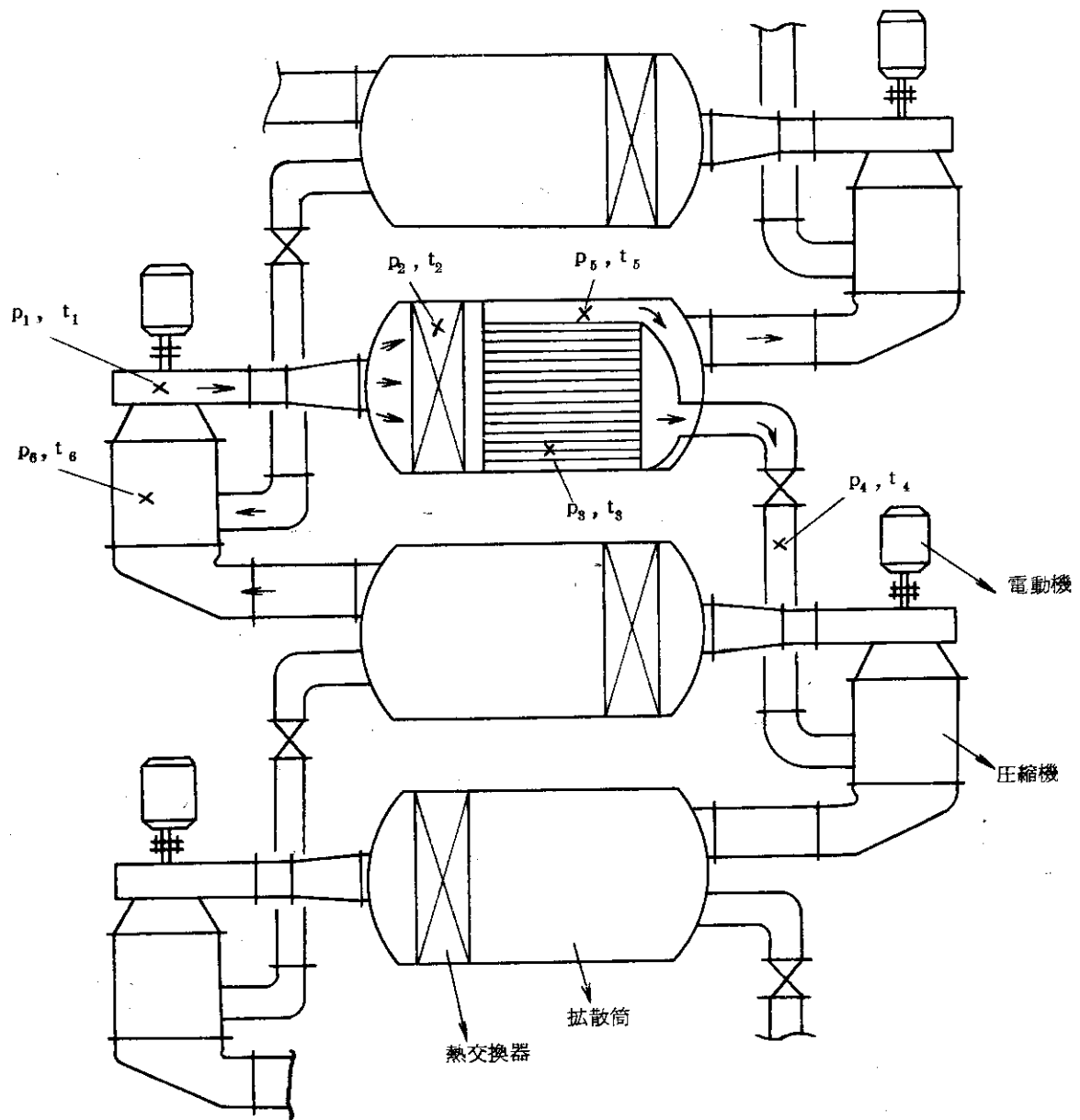


図3-3 8750 tonSWU/yr プラントの概念図(ORO-685より)



- p_1, t_1 : 圧縮機出口～熱交換器入口
- p_2, t_2 : 熱交換器内 (平均)
- p_3, t_3 : 拡散筒高圧側～バルブ
- p_4, t_4 : バルブ～圧縮機サイドフロー入口
- p_5, t_5 : 拡散筒低圧側～圧縮機入口
- p_6, t_6 : 圧縮機内 (平均)

図3-4 カスケード内の圧力、温度分布

従って、高圧（供給流＋減損流）側のホールドアップ M_h は、

$$M_h (\equiv H) = M_t - M_l \quad \dots (3.5)$$

いま、ORO-685の写真より、拡散筒、圧縮機、バルブ、配管などの寸法を作業員の身長から推定し、これを基にカスケードのレイアウトを検討すると、各主要構成機器の概略の容積として表3-1に示した値が得られた。熱交換器は、拡散筒の中に内蔵され、隔膜への流速分布を均一化するためのディストリビューターの役目を果たしていることが考えられる。なお、同表に示した圧力分布は、圧縮機の圧縮比を5～7程度と推定し、配管抵抗なども考慮して定めたものである。

表3-2は、カスケード1段のホールドアップを各圧力区分について計算した結果である。これより、各ステップとも、低圧側のホールドアップの占める割合は13%程度であり、ホールドアップの大部分は高圧側にあることが分かる。即ち、2章で導びいた基礎式の仮定は正しいと言えよう。

表3-1 主要構成機器の容積と圧力・温度分布

1. 主要構成機器の容積

1) 拡散筒 V_D

[単位； m^3]

ステップ	$p_1 V_D$	$p_2 V_D$	$p_3 V_D$	$p_5 V_D$	全 体
大 規 模 段	10	15	45	44	114
中 規 模 段	7	8	26	25	66
小 規 模 段	5	5	17	17	44

2) 配管 V_P

[単位； m^3]

ステップ	$p_1 V_P$	$p_3 V_P$	$p_4 V_P$	$p_5 V_P$	全 体
大 規 模 段	3.8	1.3	2.6	12.6	20.3
中 規 模 段	1.8	0.7	1.4	6.2	10.1
小 規 模 段	0.9	0.3	0.6	4.6	6.4

3) 圧縮機 V_C

[単位； m^3]

ステップ	$p_1 V_C$	$p_5 V_C$	$p_6 V_C$	全 体
大 規 模 段	3.2	2.8	2.1	8.1
中 規 模 段	2.0	1.8	1.4	5.2
小 規 模 段	0.7	0.6	0.6	1.9

2. 圧力, 温度分布

[単位: p (Torr), t (°C)]

p ₁	p ₂	p ₃	p ₄	p ₅	p ₆
700	675	650	500	130	415
t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
96	83	70	70	70	83

表3-2 カスケード1段の各部分のホールドアップ

[単位: mol]

ステップ	M _{p₁}	M _{p₂}	M _{p₃}	M _{p₄}	M _{p₆} (≡ M ₁)	M _{p₆}	M _t	M _L /M _t (-)
大規模段	518	455	1406	63	361	39	2842	0.127
中規模段	330	241	813	33	201	26	1644	0.122
小規模段	201	152	527	14	135	11	1040	0.129 ₈

[註] M_{p₁}: 圧力が p₁ の部分のホールドアップ

(以下同様)

図3-5は、各段の供給流量と高圧側のホールドアップの関係を示したものである。図3-2に示した方形カスケードによるモデル拡散プラントでは、供給流量が濃縮部で L_e = 585.2 mol/sec, 回収部で L_s = 586.8 mol/sec であるので、高圧側のホールドアップは 1.92 × 10³ mol/stage となる。従って、無次元時間 τ = 1 × 10⁵ は、(2.6)式より、

$$\theta = \tau \times \frac{H}{L'} = \frac{1 \times 10^5 \times 1.92 \times 10^3}{292.697} = 6.56 \times 10^5 \text{ sec}$$

$$= 7.59 \text{ day}$$

に相当する。

3.3 スタートアップの検討

ガス拡散プラントのような大容量の多段カスケードシステムにおいては、運転開始から定常状態に達するまでの時間をいかに短縮するかは非常に重要な課題である。プラントのスタートアップ操作には、種々の方法が考えられるが、ここでは解析のしやすい2, 3の方法を選び、濃度分布の経時変化を検討する。

まず、プラント内には前以って所定圧力の UF₆ ガスが満たされ、続いて全圧縮機が同時に起動状態に入るものとする。このとき、各段の濃度は仕込みの UF₆ ガス(天然ウラン)濃度に等しく、まず系内の圧力、流量が所定の定常状態に到達するものと考えられる。この間の時間は非常に短いものと予想されるので、ここでは、それ以後、濃度分布が経時的にどのように変化し、どの程度の時間で定常状態に達するかを解析する。なお、以下の計算例では(2.

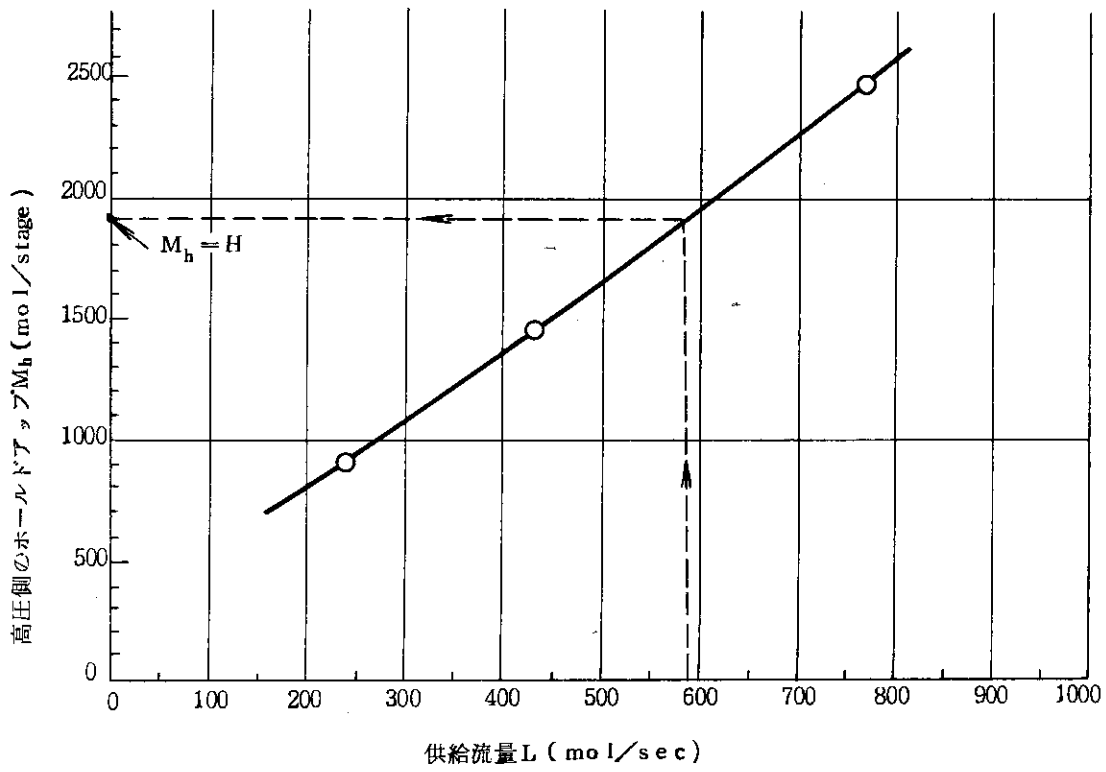


図3-5 供給流量と高圧側ホールドアップとの関係

14) 式のブロック巾 δ_n として 20 を採用している。

3.3.1 全還流操作によるスタートアップ (Case A-I)

プラント内に前以って所定圧力の UF_6 ガスを満たし、原料の供給および製品、廃棄材の抜き出しを行なわないでカスケードの運転を行う場合を全還流操作という。この場合には、当然のことながら、段方向の分離の程度 (濃度分布) は最も大きくなる。

図 3-6 は、全還流操作によるスタートアップにおいて、いくつかの代表段の濃度が時間とともにどのように変化するかを示したものである。これより、全系がほぼ平衡になるには、無次元時間 τ として $6 \sim 7 \times 10^5$ 程度を要することが分かる。これは、前節の検討結果によれば、約 50 日という莫大な日数に相当する。

また、図より原料供給段 (720 段目) の濃度が時間とともに減少し、原料濃度よりかなり低い値で平衡に達している。これは、カスケード内に最初に仕込まれた UF_6 ガス中の U-235 の量は限定されており、しかも全還流操作では定常流通操作の場合よりも濃度勾配の大きい対数濃度分布を示すため、目的成分である U-235 が上段側 (製品抜き出し段側) に偏在し、物質収支上原料供給段の濃度が低下することを意味している。

しかし、この現象はステップカスケードのように濃縮部の上段側のホールドアップが小さいカスケードシステムでは、それ程顕著には現われぬものと考えられる。このことは、比較的初期の時点で原料供給段濃度を下げないように、原料の供給とそれに見合う廃棄材の抜き出しを行い、カスケード内の U-235 の量を蓄積すべきことを示唆している。このような操作を行えば、製品抜き出し段濃度の上昇ははるかに早く、定常達成時間の短縮が期待できる。

図 3-7 は、全環流操作によるスタートアップにおいて、段方向濃度分布の形成の推移を示したものである。これより、製品抜き出し段および廃棄材抜き出し段の両端から濃度勾配が生じ、最終的に対数濃度分布が形成されることが分かる。また、天然ウラン組成に対応する段は、およそ 420 段目に移動していることも理解できる。

3.3.2 定常供給および抜き出しを行った場合のスタートアップ (Case A-II)

ここでは、定常流通系として所定の原料供給および製品・廃棄材抜き出しを行った状態でカスケードをスタートアップした場合を取扱う。

定常状態における流通量は、図 3-2 に示したように、それぞれ次のように与えられる。

$$\begin{cases} P/L' = 6.8330 \times 10^{-4} \\ F/L' = 5.5505 \times 10^{-3} \\ W'/L' = 4.8675 \times 10^{-3} \end{cases}$$

図 3-8 は、上記の条件下でスタートアップした場合の代表段濃度の経時変化を示したものである。この図より、本スタートアップ操作の特徴は濃縮部濃度の定常に達するまでの時間が極めて長いことで、製品抜き出し段濃度が平衡濃度の 95% に達するのに無次元時間 τ として 8×10^5 (約 60 日に相当) を要している。一方、回収部がほぼ平衡に達するのは 2×10^5 程度 (約 15 日) であり、濃縮部に比べてかなり短い。

このことより、本操作のように濃度分布が形成されつつある段階で製品段より所定流量の抜き出しを行うと、濃縮部における着目成分 (U-235) の蓄積が遅れ、平衡到達時間を大巾に

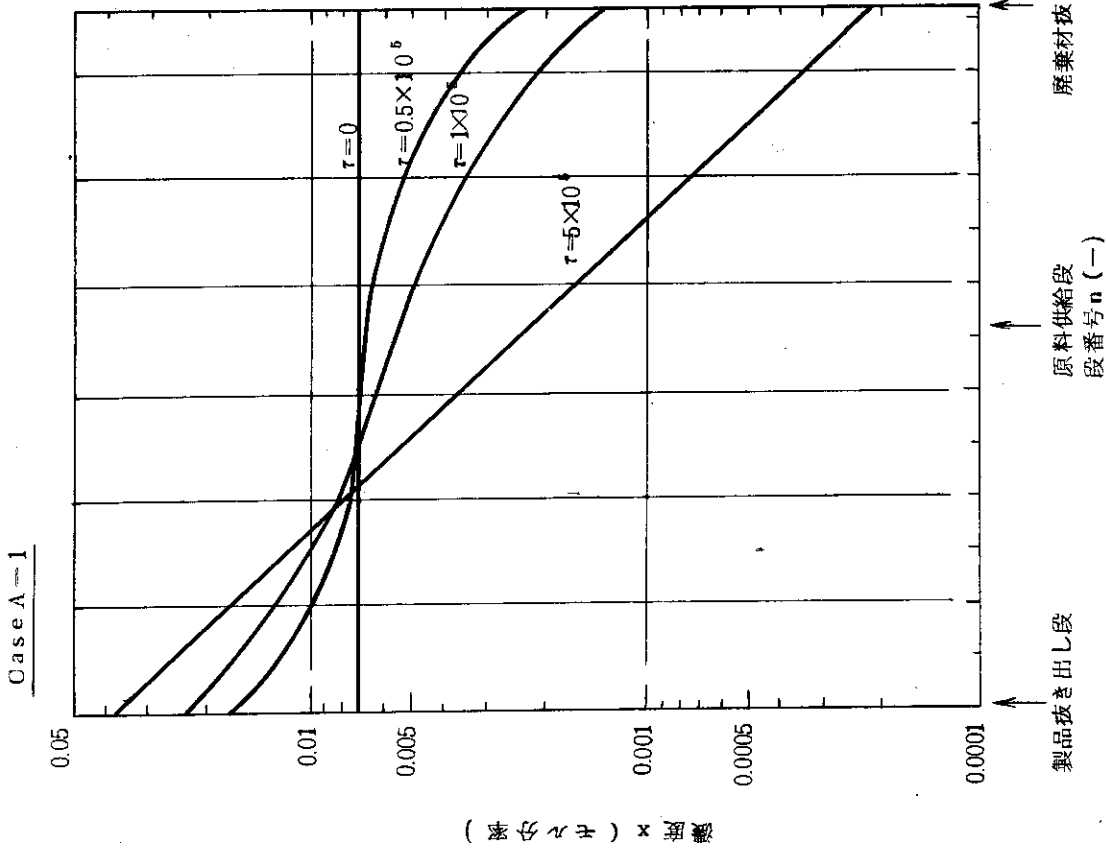


図 3-7 全選流操作によるスタートアップ (濃度分布の経時変化)

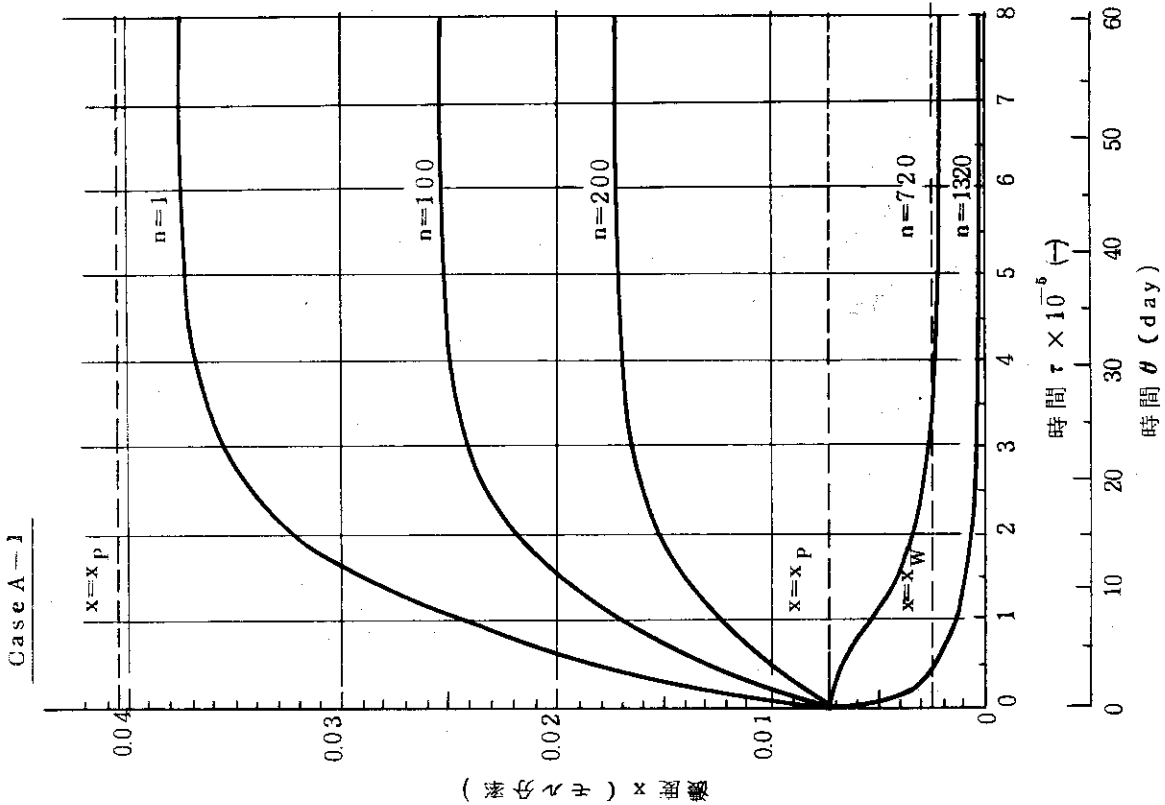


図 3-6 全選流操作によるスタートアップ (濃度の経時変化)

Case A-II

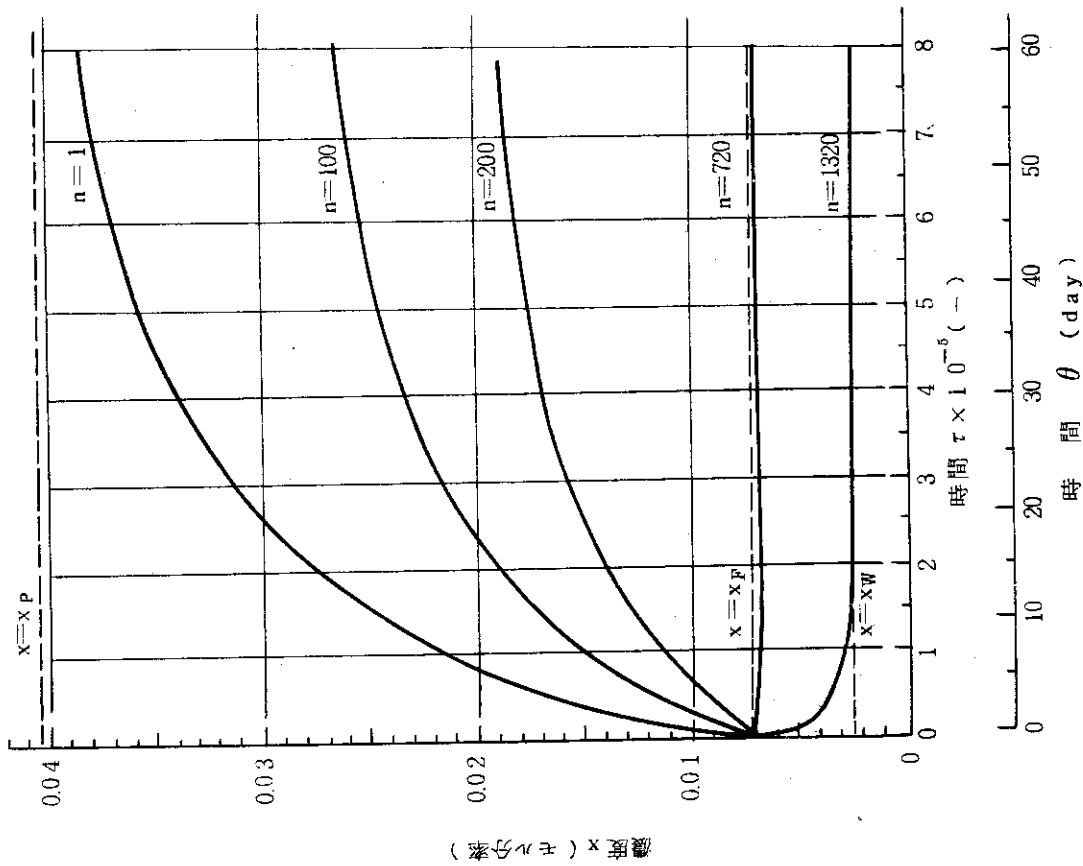


図3-8 定常供給および抜き出しを行った場合のスタートアップ(濃度の経時変化)

Case A-II

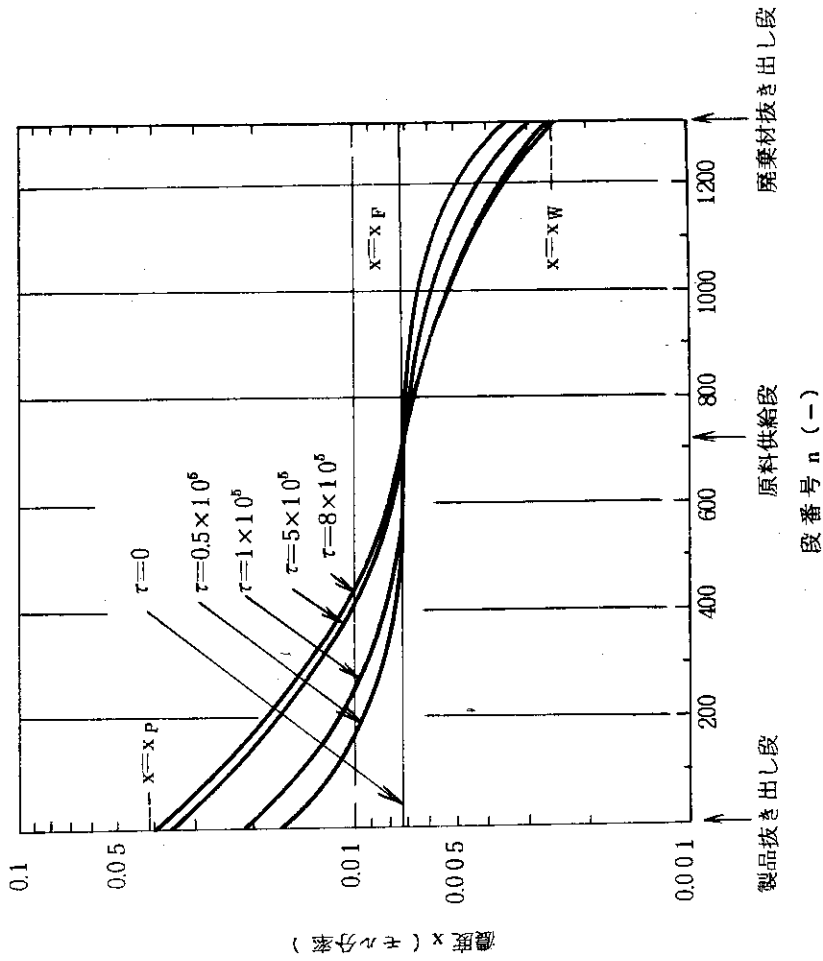


図3-9 定常供給および抜き出しを行った場合のスタートアップ(濃度分布の経時変化)

長びかせることが分かる。

図3-9は、本操作における段方向濃度分布の形成の推移を示したものである。これより、原料供給段(720段目)の濃度には殆んど変動がなく、この点を中心として濃縮部および回収部の濃度分布は半対数紙上で逆の曲率をもって対称的に勾配が増加し、最終の平衡濃度分布に漸近していく様子が見られる。

3.3.3 製品濃度が所定値に達した時点から製品の抜き出しを開始する場合のスタートアップ (Case A-III)

前項までのスタートアップ操作に関する2つのケースの検討から、製品は所定濃度に達するまでは抜き出さないこと、および廃棄材は早期に抜き出して原料供給段の濃度を変えないことの2つの方向づけがなされた。

ここでは、濃縮部に関し製品段濃度が所定値に達するまで全還流操作を行い、所定濃度になった時点で段階的に定常抜き出しに入るスタートアップ方法を取扱う。この際、廃棄材の抜き出しに関して次の2種類の操作が考えられる。

Case A-III-1 ; 廃棄材の定常抜き出しを最初から行う場合

Case A-III-2 ; 廃棄材濃度が所定値になった時点で廃棄材の定常抜き出しを行う場合

図3-10および図3-11は、Case A-III-1およびCase A-III-2について代表段濃度の経時変化を示したものである。図3-12および図3-13は、同様に、両ケースの段方向濃度分布の経時変化を示したものである。これより、上記2つのケースの濃度の経時変化には殆んど差はみられず、特に濃縮部の応答は酷似していることが分かる。また、製品段が所定濃度に達するのは両者共に τ がほぼ 2.5×10^5 (約20日に相当する)であり、他のスタートアップ方式に比べて所要時間がかかなり短縮されている。さらに、製品段濃度が所定値に達した時点で、所定流量の製品抜き出しを階段状に行っても、濃度応答は極めて良好に目標濃度に追従していることが明らかになった。このことは、製品の抜き出し直前における系内の濃度分布が定常状態のそれに近いことを意味している。

次に、回収部については、両ケースとも大きな差違は認められないが、初期の廃棄に無駄がないという点で廃棄材を所定濃度に達した時点から抜き出す操作(Case A-III-2)の方が有利と考えられる。

以上、幾つかのスタートアップ操作方式を検討してきたが、表3-3から明らかなように、製品段が所定濃度になった時点で所定流量の製品を抜き出す方式(Case A-III)が最も有利である。このように、ガス拡散プラントは定常到達までに莫大な時間を要するので、スタートアップ方式の選定はプラント操業上非常に重要な課題といえる。

3.4 カスケードの1部が故障した場合の検討

ガス拡散プラントでは定常状態にあるカスケードの1部に故障・異常をきたした場合、または、プラントの保守・修理を行う場合を想定して、20段前後を1まとめにしたプロセスセルなる構成単位をつくり、それぞれにバイパスラインを設けることにより、カスケード1部の除外または保守・修理後の挿入が可能なるよう工夫されている。図3-14は、ORO-685に記されているプロセスセルの概念図であり、1つのプロセスセルは16段より構成されている。

Case A-III-2 廃棄材濃度が所定値になった時点で廃棄材の定常抜き出しを行う場合

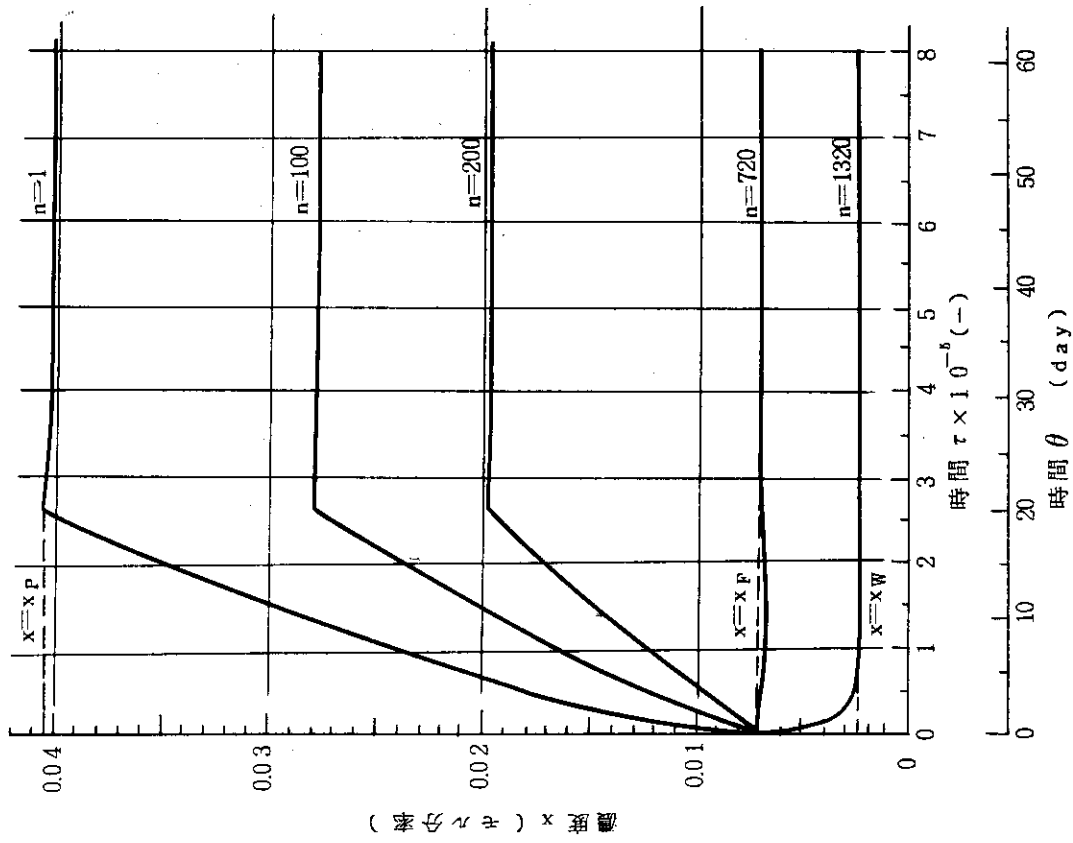


図3-11 製品濃度が所定値に達した時点から製品の抜き出しを開始する場合のスタートアップ(濃度の経時変化)

Case A-III-1 廃棄材の定常抜き出しを最初から行う場合

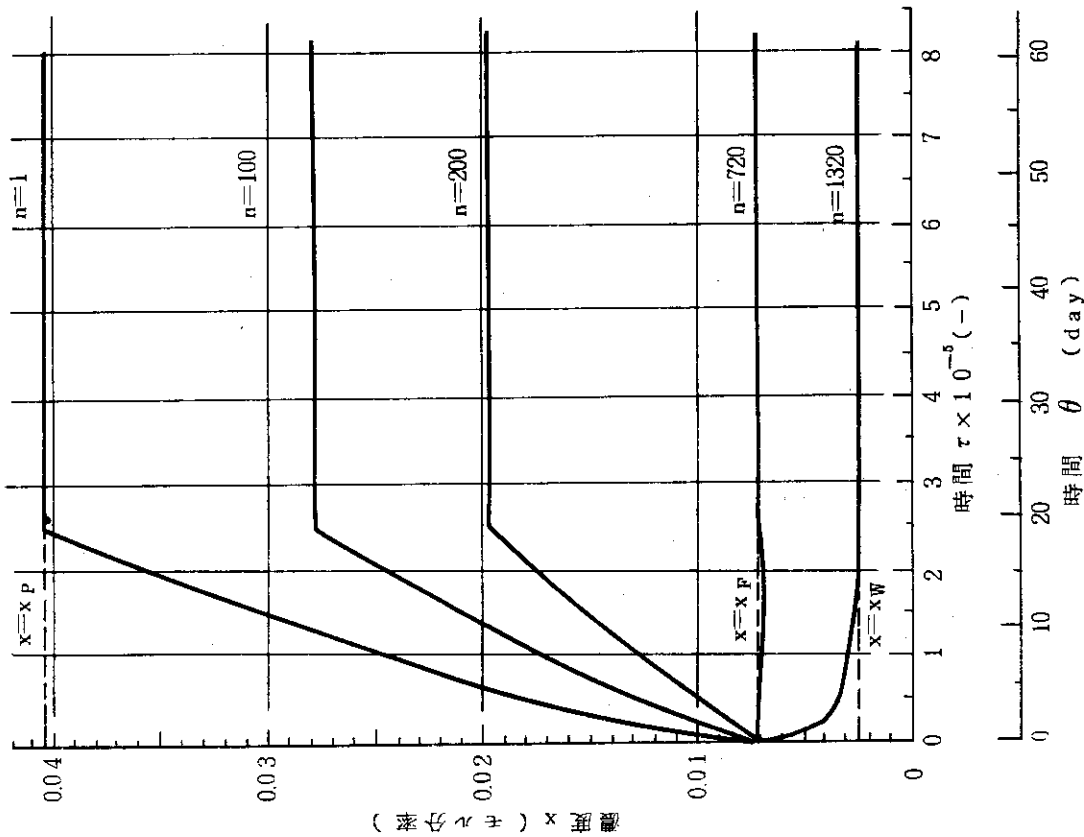


図3-10 製品濃度が所定値に達した時点から製品の抜き出しを開始する場合のスタートアップ(濃度の経時変化)

Case A-III-1 廃棄材の定常抜き出しを最初から行う場合

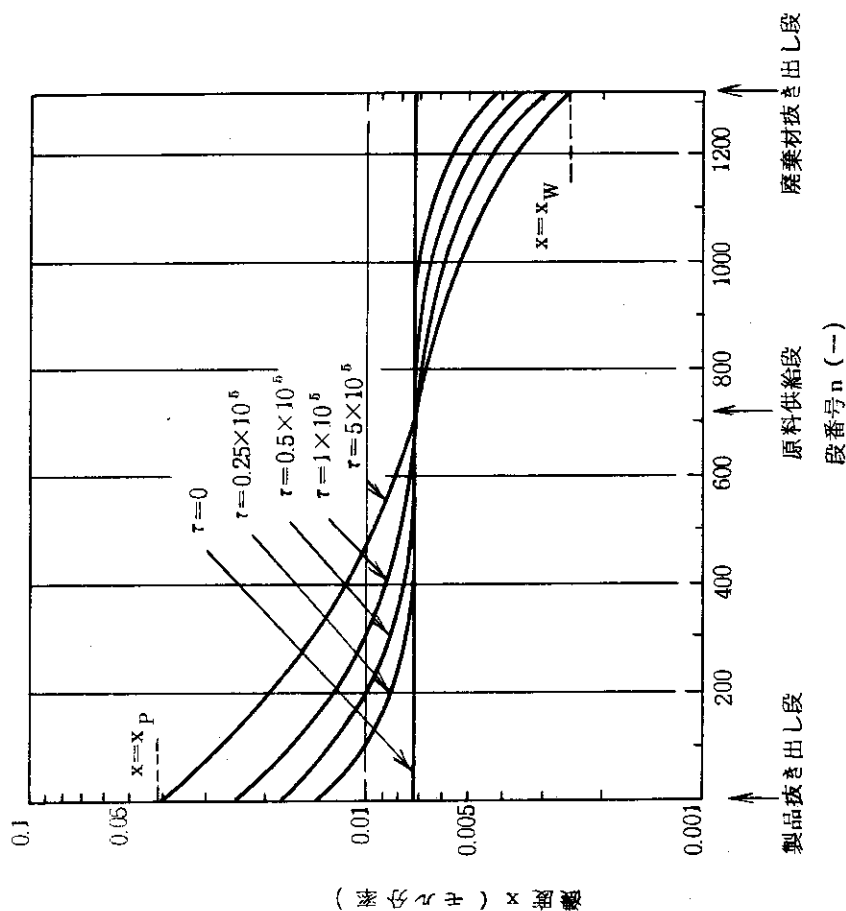


図 3-1-2 製品濃度が所定値に達した時点から製品の抜き出しを開始する場合のスタートアップ(濃度分布の経時変化)

Case A-III-2 廃棄材濃度が所定値になった時点で廃棄材の定常抜き出しを行う場合

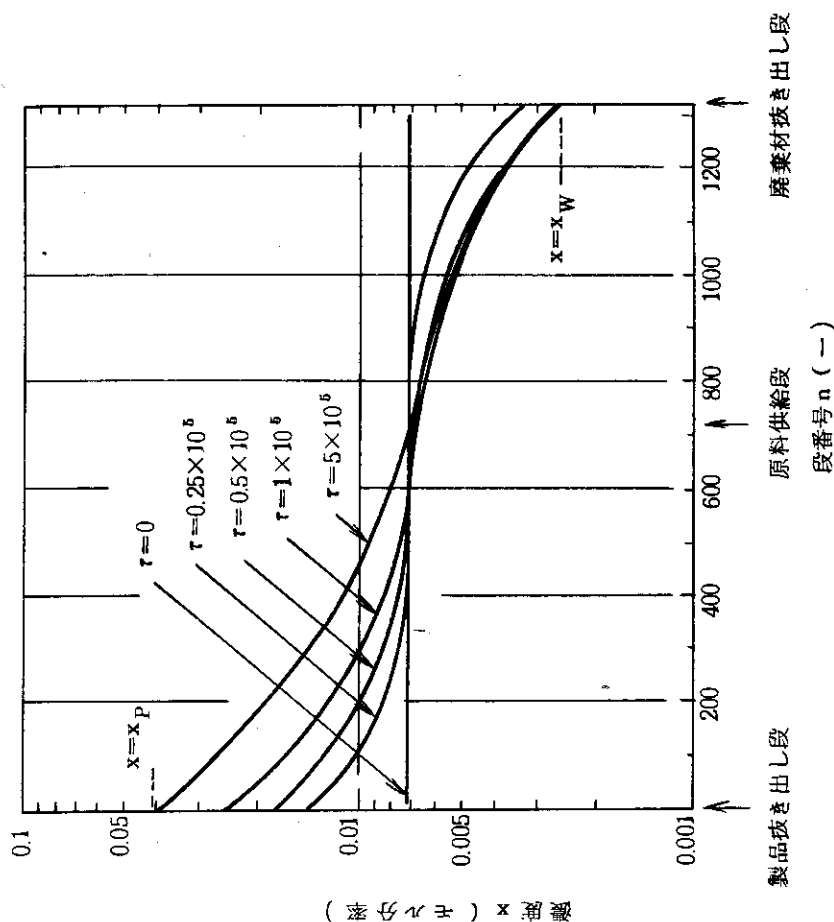


図 3-1-3 製品濃度が所定値に達した時点から製品の抜き出しを開始する場合のスタートアップ(濃度分布の経時変化)

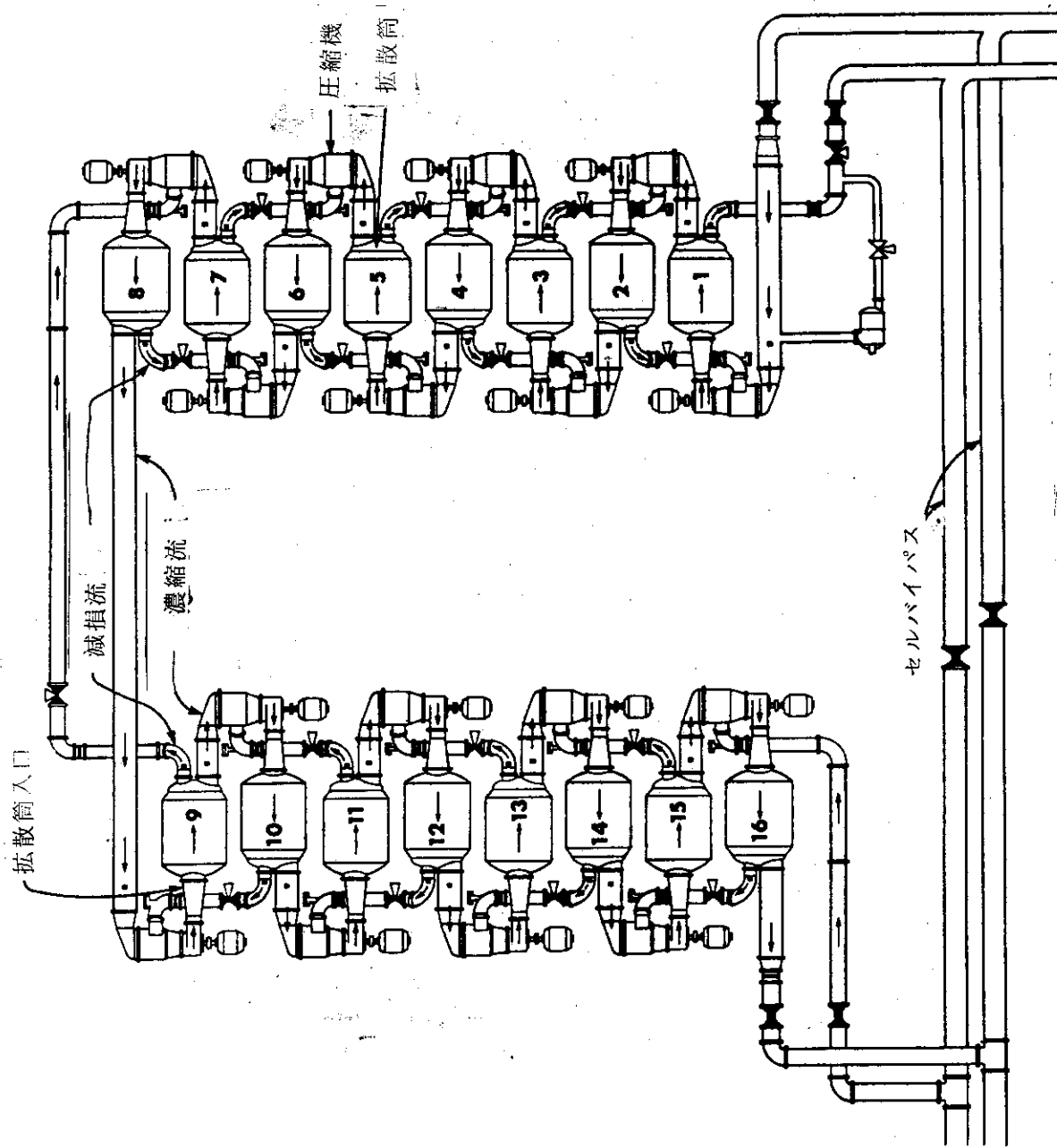


図 3-14 プロセスセル概念図 (ORO-685より)

表3-3 スタートアップ操作方式の比較

スタートアップ操作方式		定常到達時間*
Case A-I	全還流操作による場合	~50日
Case A-II	定常供給および抜き出しを行った場合	~60日 (平衡濃度の95%)
Case A-III-1	製品濃度が所定値に達した時点から製品の抜き出しを開始する場合(廃棄材の抜き出しを最初から行う場合)	~20日
Case A-III-2	製品濃度が所定値に達した時点から製品の抜き出しを開始する場合(廃棄材濃度が所定値になった時点で廃棄材の抜き出しを行う場合)	~20日

* 製品濃度が平衡値に到達するまでの時間

このようなプロセスセルを設けることにより、故障・異常を生じた部分を速やかにカスケードから除外し、カスケード全体への悪影響を回避することができる。

本項では、まず、カスケードの1部分を保守または修理のために一時的に除外して運転しなければならない場合を想定し、そのときに取出される製品濃度の時間的変化を追跡する。また、このとき変動する製品濃度を還流比制御により一定に保持しようとする場合も検討する。次いで、保守または修理が完了し、プラントを元の状態に復帰させようとする場合の非定常特性についても同様に検討する。

3.4.1 カスケードの1部除外 (Case B-I)

プラントの運転を継続した状態でカスケードの1部分を保守または修理のために除外した場合を次の2つのケースについて検討する。

- Case B-I-1 ; 制御を行わない場合
- Case B-I-2 ; 還流比制御 (比例制御) を行う場合

カスケードの1部分を除外して運転を続けた場合、製品濃度への影響は、除外部分の大きさと位置により異なるものと考えられる。

図3-15は、濃縮部の上部、中部、下部の3位置について80段を除外し、製品流量(還流比)を一定値に保持した場合の製品濃度への影響を示したものである。図より、除外位置により大きな差異がみられ、それが製品段に近いほど濃度の過渡的変化が大きいことが分かる。即ち、原料供給段に近い位置(600~680段)の除外の場合には最終定常値に緩かに収束するが、濃縮部の中央部(300~380段)を除外した場合には僅かにアンダーシュートして定常値に収束しており、さらに製品段に近い位置(100~180段)を除外するとその直後に極端なアンダーシュートが起っていることが注目される。

図3-16は、濃縮部の製品段に近い位置を除外する場合、除外段数を多くとると製品濃度がどのような影響を受けるかを示したものである。これより、除去部分の大きさの影響が顕著に現われていることが理解できる。

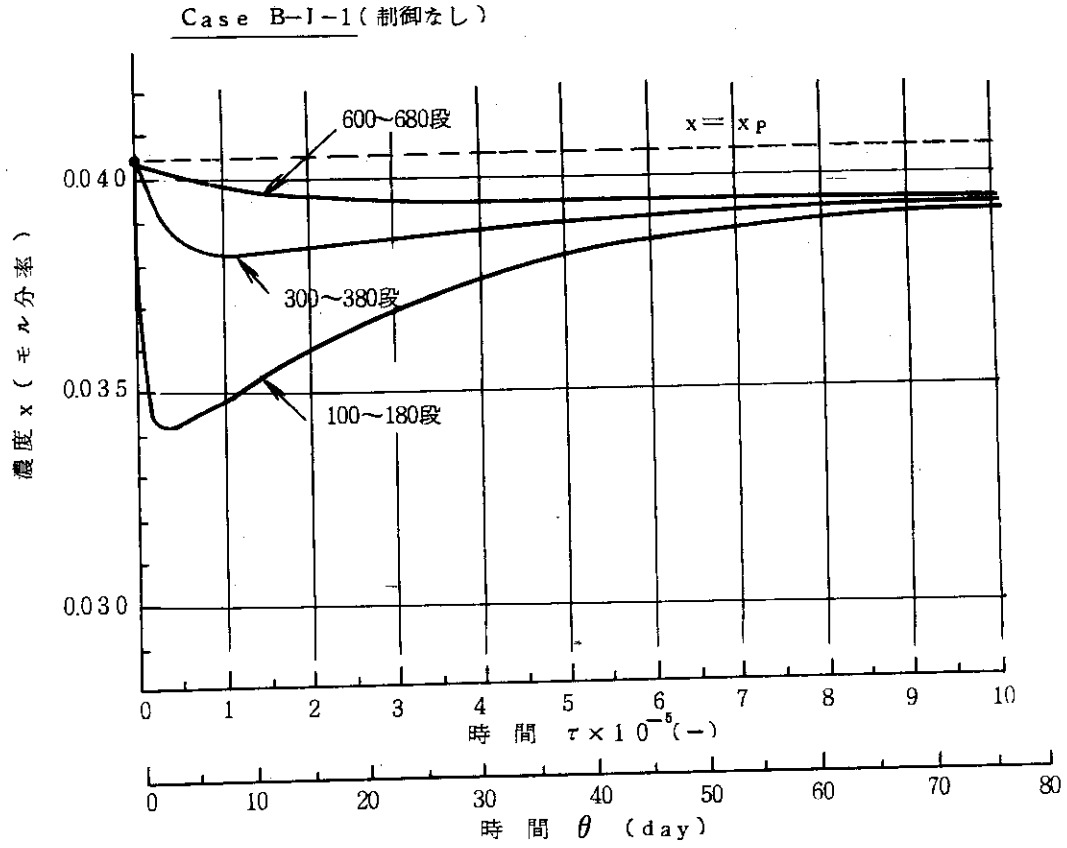


図3-15 カスケードの1部を除外した場合の製品濃度変化(除外段位置の影響)

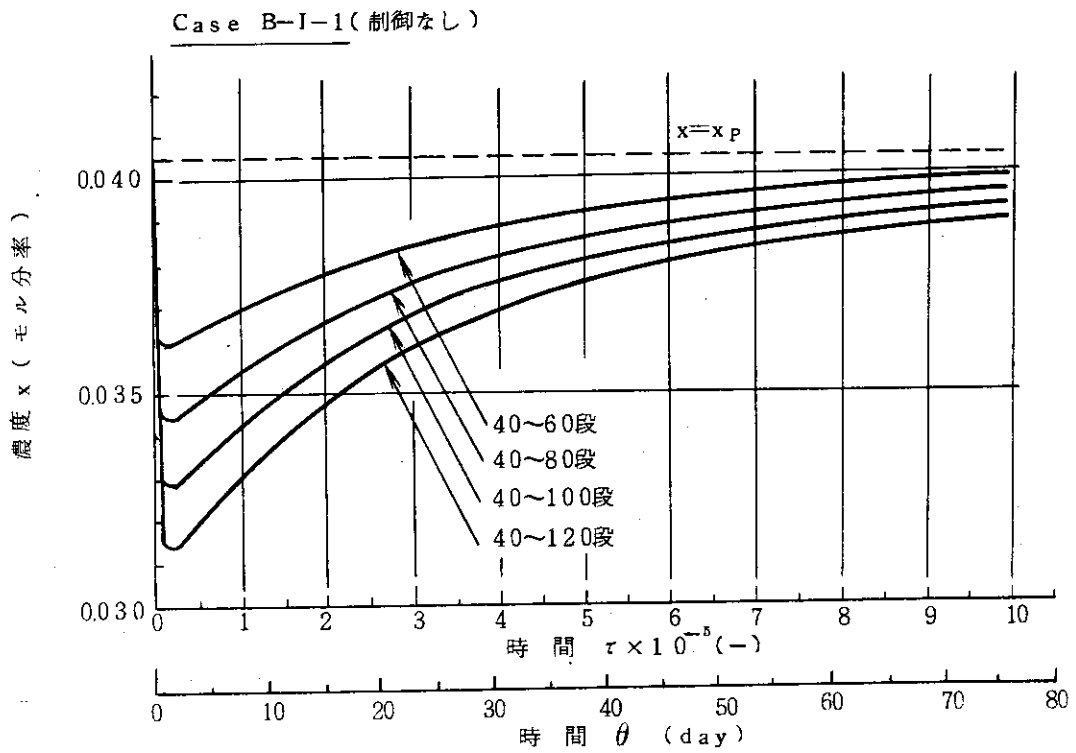


図3-16 カスケードの1部を除外した場合の製品濃度変化(除外段の大きさの影響)

図3-17は、100~180段を除外したときの代表段濃度の経時変化を示したものである。図より、濃縮部の製品段近くの濃度の時間的变化は大きいが、原料供給段では濃度変化は僅かであり、廃棄材取り出し段では殆んど影響を受けていないことが分かる。

以上のことから、カスケードの1部除外の問題は、目的同位体のホールドアップの大きい濃縮部上段を除外する場合と除外対象段が多い場合が重大であり、何んらかの制御が必要となる。

次に、制御を行った場合の応答について検討する。制御方式としては、製品段濃度を検出し、目標濃度との差により製品抜き出し流量（還流比）を修正する比例制御を考える。

図3-18は、還流比制御を行いながらカスケードの1部（100~180段）を除外した場合の製品濃度の過渡的变化を示したものである。図には制御を行わない場合の濃度変化も示されているが、両者を比較すると還流比制御の効果は明白に現われている。しかし、この場合にも、製品濃度が定常値に達するのに10~15日を要している。なお、制御方法には、0.002の濃度変動に対して P/L' （還流比の逆数）を $1/1463$ だけ修正し、製品濃度 x が0.0385以下になったとき抜き出し量を0とし、逆に製品濃度が0.425以上になったときは抜き出し量を $2/1463$ とする方式を採用している（以下の解析で制御を行っている場合も同様の方式を採用している）。

図3-19は、前計算例における代表段濃度の経時変化を示したものである。これより、除外段の直ぐ下にあたる200段目の濃度変化が著しいことが分かる。これは、100~180段が除外されたために、この段がほぼ120段目に相当することになり、その分だけ濃度が増加したと考えてよい。一方、原料供給段から回収部にかけては濃度変化は顕著に現われず、若干濃度が増加しているに過ぎない。

図3-20は、同様の還流比制御を行いながら、製品段に近い40~60段を除外した場合の代表段濃度の経時変化を示したものである。この場合、除外段数は少ないが除外位置が上部にあるため、製品段および100段目の濃度変化は比較的大きくなっているが、数日後には全段ともほぼ平衡値に達している。また、原料供給段から回収部にかけては、濃度の変化は殆んどみられない。

図3-21は、濃縮部の上、中、下部から夫々40段〔除外段（100~140）、（300~340）、（600~640）〕を同時に除外した場合の代表段濃度の経時変化を示したものである。この場合、除外段の合計は120段であるが、3個所に分散しているため、製品濃度の変化は少なく、また各段の濃度変化も平均化されている。

図3-22は、回収部の上、下部から夫々40段〔除外段（800~840）、（1200~1240）〕を同時に除外した場合の代表段濃度の時間的变化を示したものである。図には、比較のため還流比制御を行わない場合も点線で示してある。これより、回収部を除外した場合の濃度分布への影響は少なく、2日以内に全段とも平衡値に達することが分かる。また、原料供給段から回収部にかけては、還流比制御の有無にかかわらず濃度分布は一定である。

図3-23は、濃縮部の1個所〔除外段（100~140）、点線で示す〕または3個所〔除外段（100~140）、（300~340）、（600~640）、実線で示す〕を除外した場合の代表段濃度変化を示したものである。両者を比較すると、3個所を除外した場合の影響は、製品抜き出し段よりもむしろ濃縮部の中部から下部に現われていることが分かる。

Case B-1-1 (制御なし)

除外段 100~180段

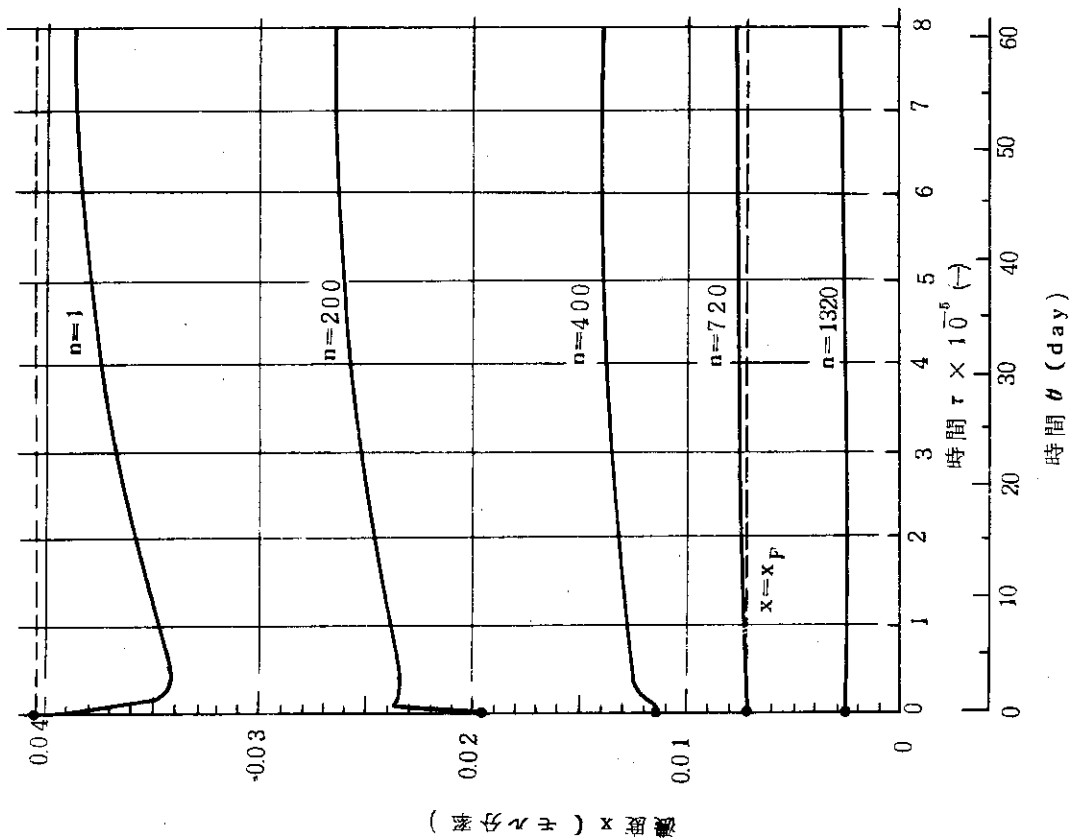


図 3-17 カスケードの 1 部を除外した場合の代表段濃度変化

Case B-1-2

除外段 100~180段

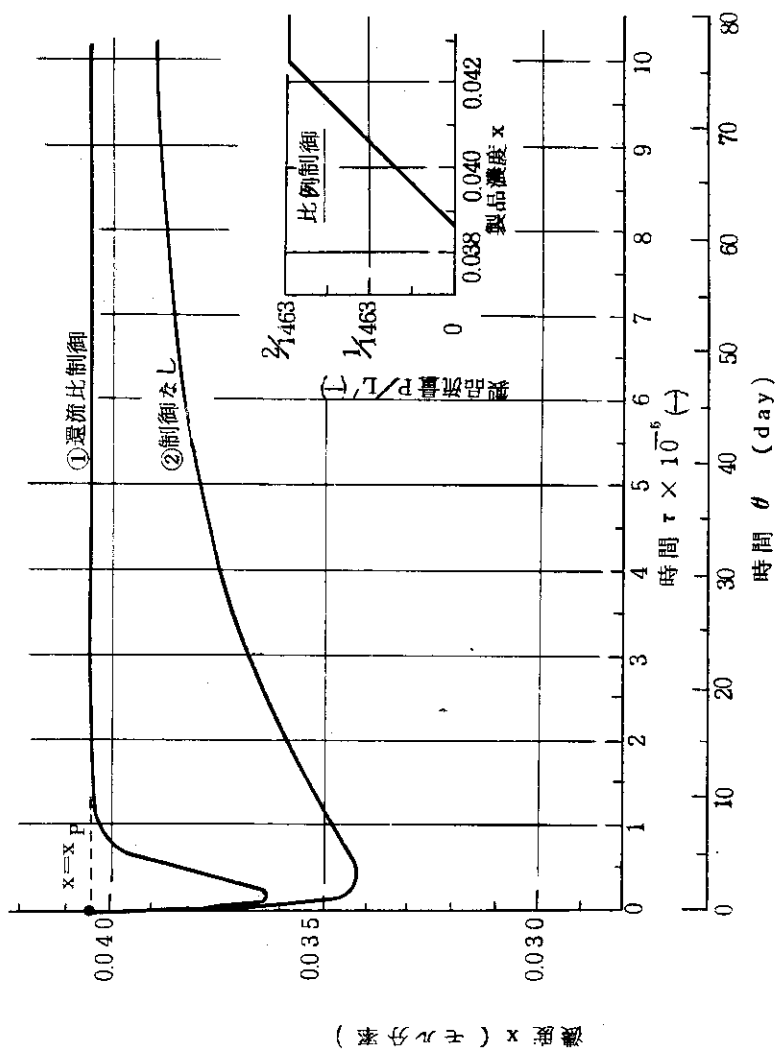


図 3-18 還流比制御を行いなからカスケードの 1 部を除外した場合の製品濃度変化

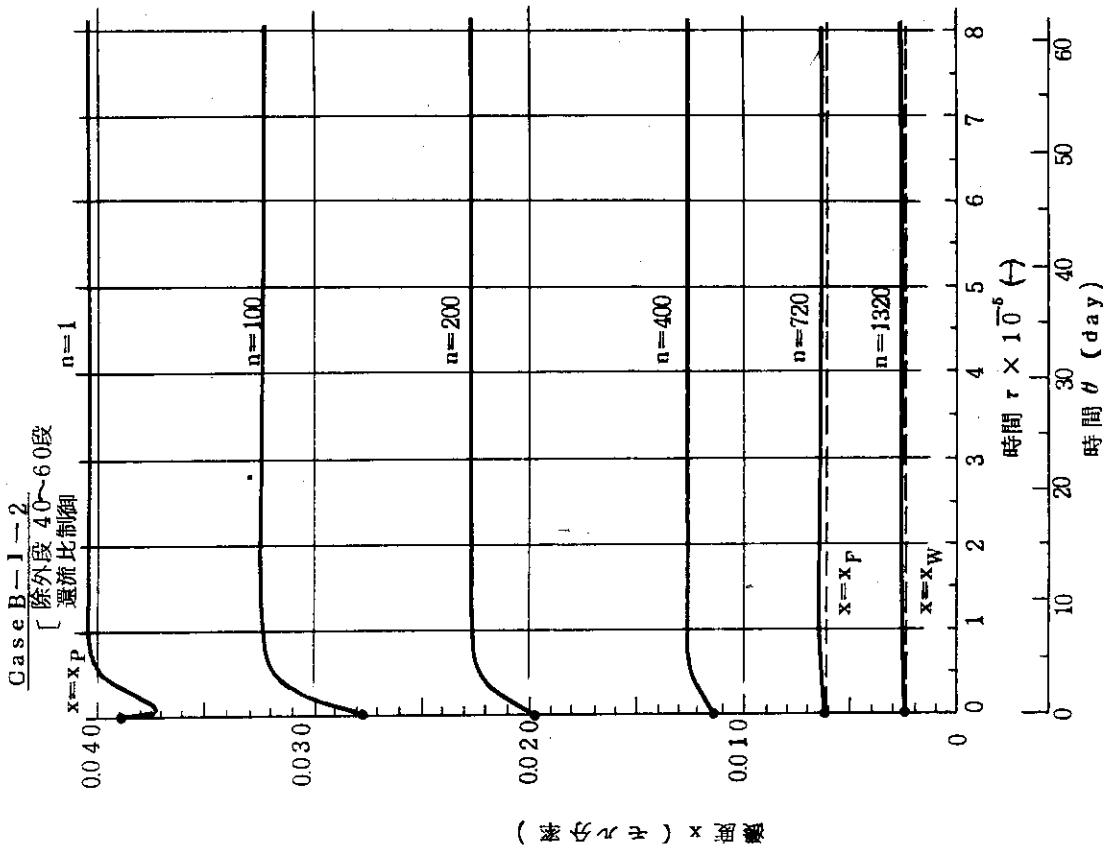


図 3-20 還流比制御を行いなからカスケードの1部を除外した場合の代表段濃度変化

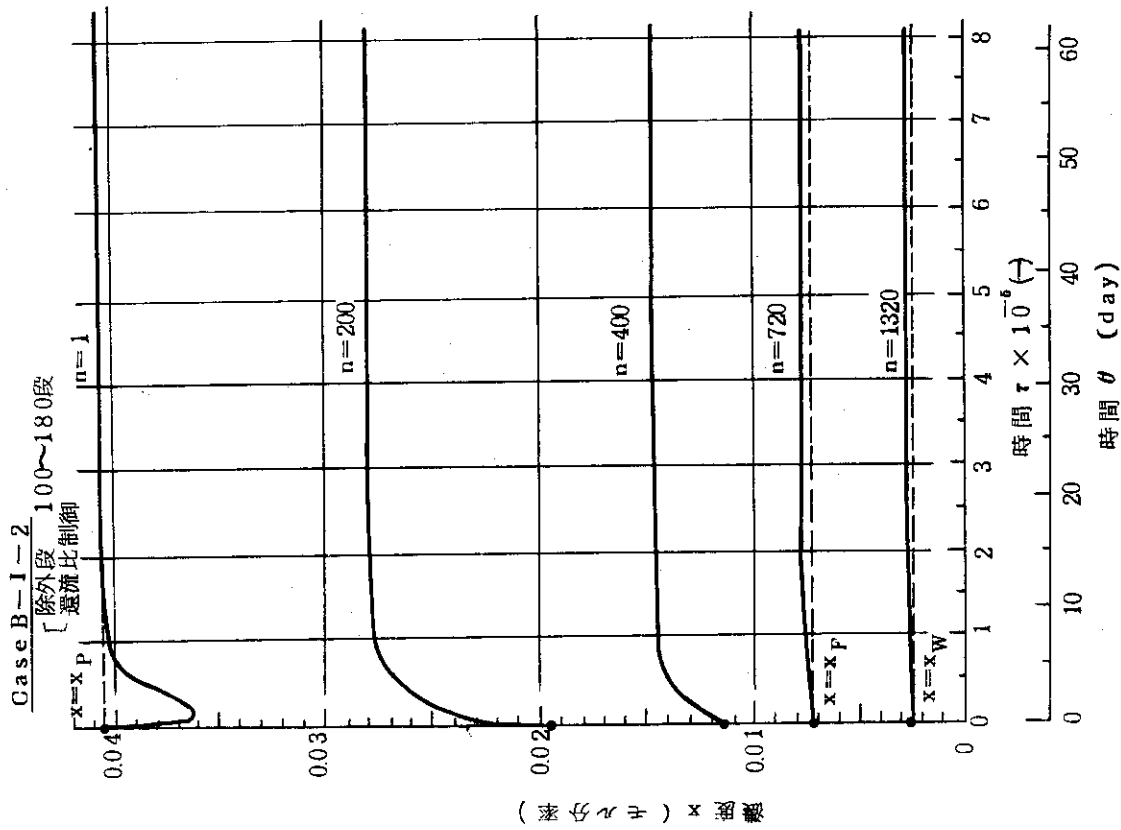


図 3-19 還流比制御を行いなからカスケードの1部を除外した場合の代表段濃度変化

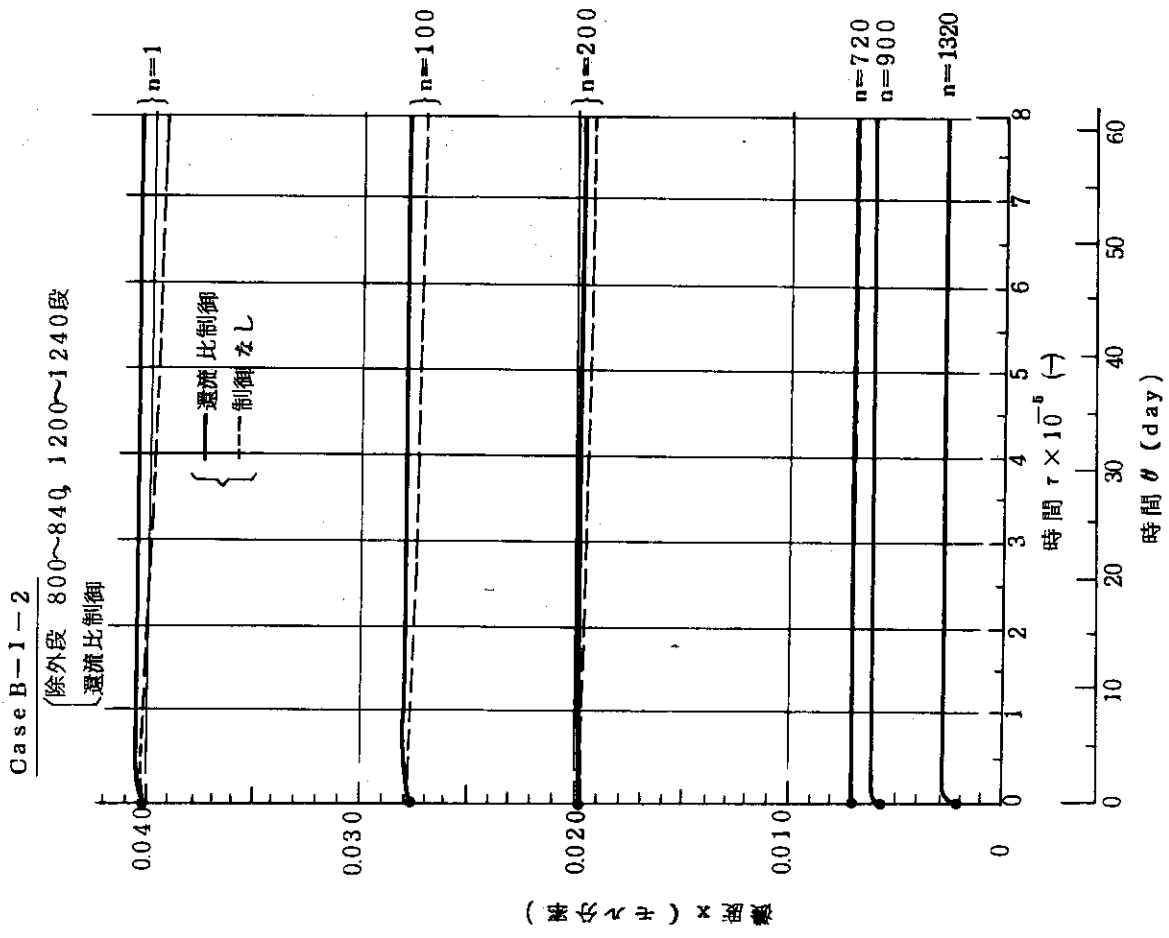


図3-22 還流比制御を興いながら回収部の2個所を除外した場合の代表段濃度変化

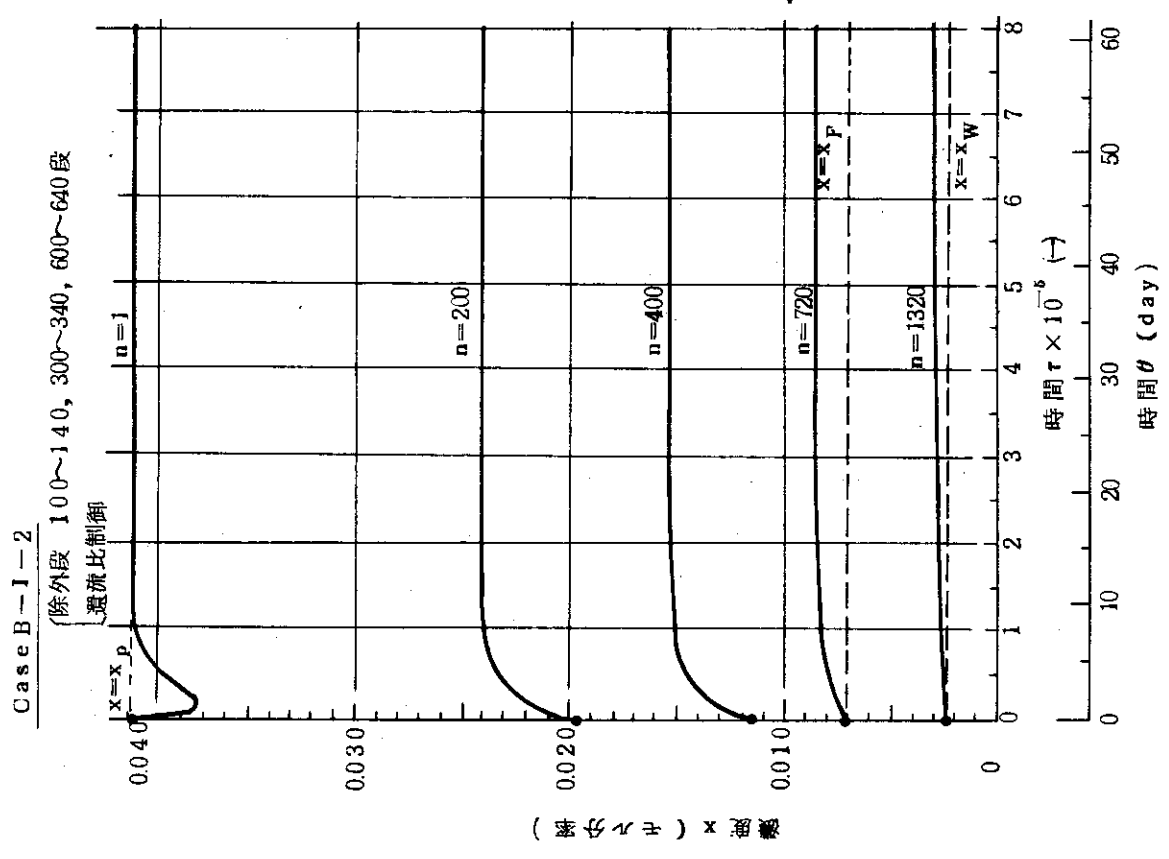


図3-21 還流比制御を行ないながら濃縮部の3個所を除外した場合の代表段濃度変化

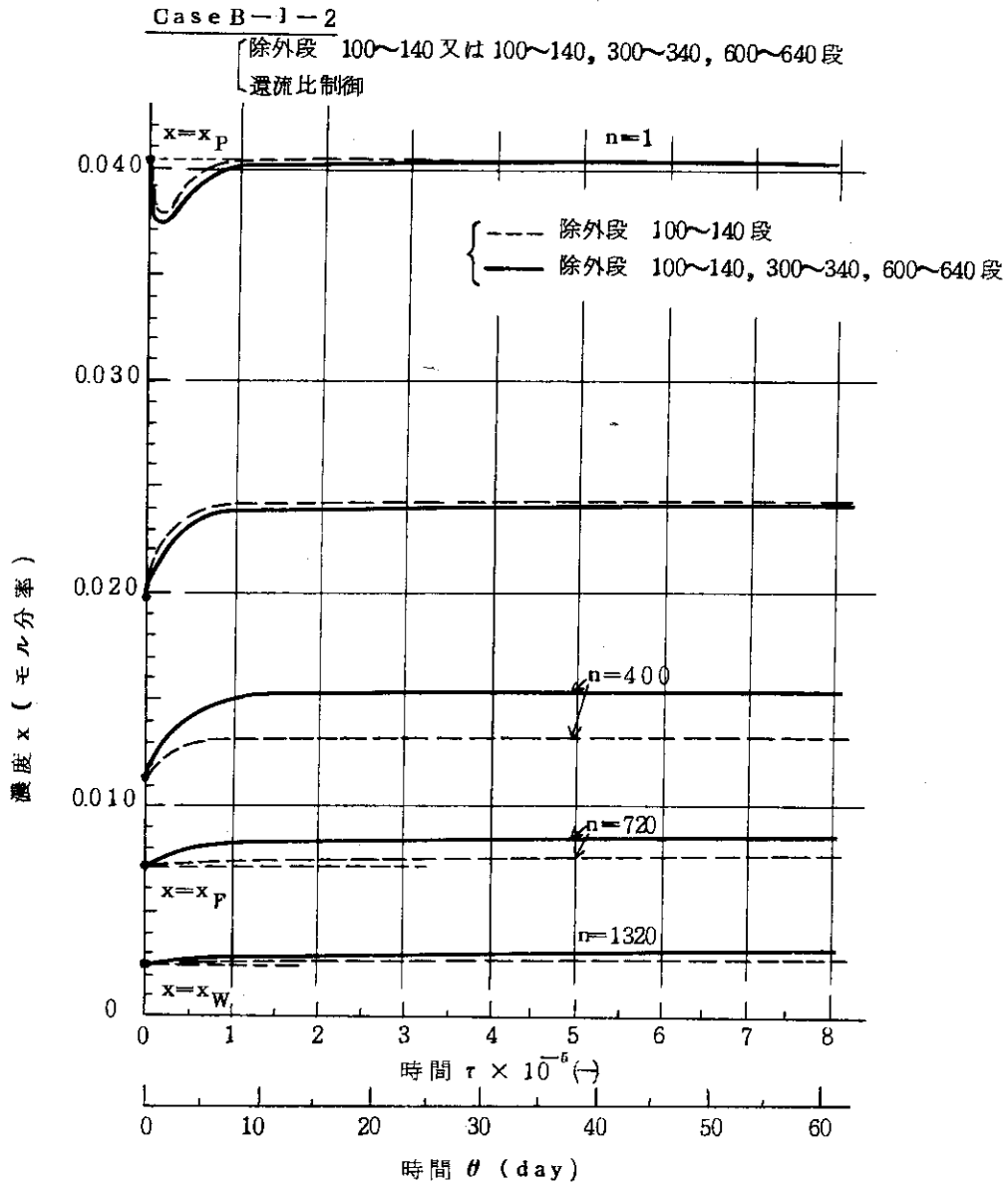


図 3 - 2 3 還流比制御を行いながら濃縮部の 1 個所又は 3 個所を除外した場合の代表段濃度変化の比較

以上のように、方形カスケードでは、濃縮部上段における目的同位体のホールドアップが大きいため、この部分の保守または修理のための除外は製品濃度に大きな影響を及ぼす。しかし、製品濃度に着目して簡単な還流比制御（比例制御）を行うことにより、かなり短期間のうちに所定濃度の製品を得ることができる。

3.4.2 除外段のカスケードシステムへの復帰（Case B-II）

除外段の保守または修理が終了し、これをカスケードの元の位置に挿入してプラントに復帰させる場合を次の2ケースについて検討する。

- Case B-II-1 ; カスケードの1部の除外および除外後の挿入を何んらの制御なしに行う場合
- Case B-II-2 ; 上記操作を還流比制御（比例制御）により行う場合

この場合、除外個所のカスケードシステムへの挿入にあたっては、

- ① 除外後カスケード内の濃度分布が定常になった時点で除外段を挿入する。
- ② 挿入の時点でも、除外段の濃度分布は除外直前の状態を維持している。

ことを計算上の仮定としている。

図3-24は、カスケードの1部（除外段100～180段）を除外し、濃度分布が定常になった時点で除外段をカスケードシステムに復帰した場合の製品濃度の経時変化を示したものである。これより、除外と挿入とでは応答方向は逆であるが、その形は類似していることが分かる。また、図には還流比制御を行った場合についても記されているが、還流比制御により定常達成時間が大巾に短縮されていることがうかがわれる。

図3-25は、上記操作における代表段濃度の時間的変化を示したものである。これより、濃縮部の上部における濃度の時間的変化は大きいですが、原料供給段から回収部にかけては殆んど変化のないことが分かる。また、各段における濃度の応答は、除外の場合（図3-17参照）と方向が逆でその形は類似している。

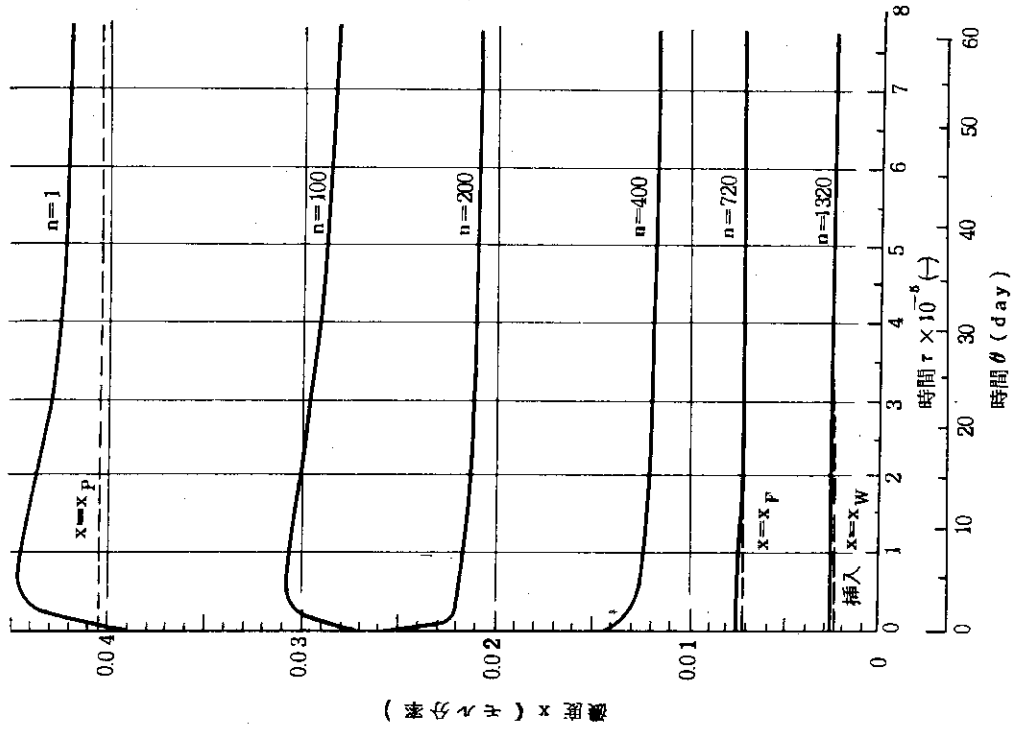
次に、前項と同様に、製品段濃度を検出し、目標濃度との差により製品抜き出し流量（還流比）を修正する比例制御を行った場合の濃度の応答について検討する。

図3-26は、還流比制御を行った状態で除外段（100～180段）をカスケードに挿入した場合の製品濃度および流量の応答を示したものである。この場合、カスケードの100～180段を除外し、カスケード内の濃度分布が定常になった時点（図では、便宜上 $\tau = 10 \times 10^{-5}$ ）で除外段の復帰を行っている。この図から、除外段の挿入が行われると見掛け上段数が増えるので、製品濃度が上昇するが、これに見合うだけ製品流量を増加させ、カスケードを元の状態に戻そうとする模様が理解できる。これより、挿入後、約15日程度で製品濃度および流量が元の状態に復帰していることが分かる。ここで、定常値に僅かながらオフセットが生じているが、これは積分操作などを加えることにより解決できる。

図3-27は、上記操作における代表段濃度の時間的変化を示したものである。制御を行わない図3-25と比較すると、還流比制御により濃縮部上部の定常達成時間が大巾に短縮されている様子が分かる。

図3-28は、濃縮部の上、中、下部から夫々40段〔除外段（100～140）、（300～340）、（600～640）〕を同時に除外し、定常状態になった時点でこれらの除外段を同時に

Case B-II-1 (制御なし)
除外段 100~180段



Case B-II-1

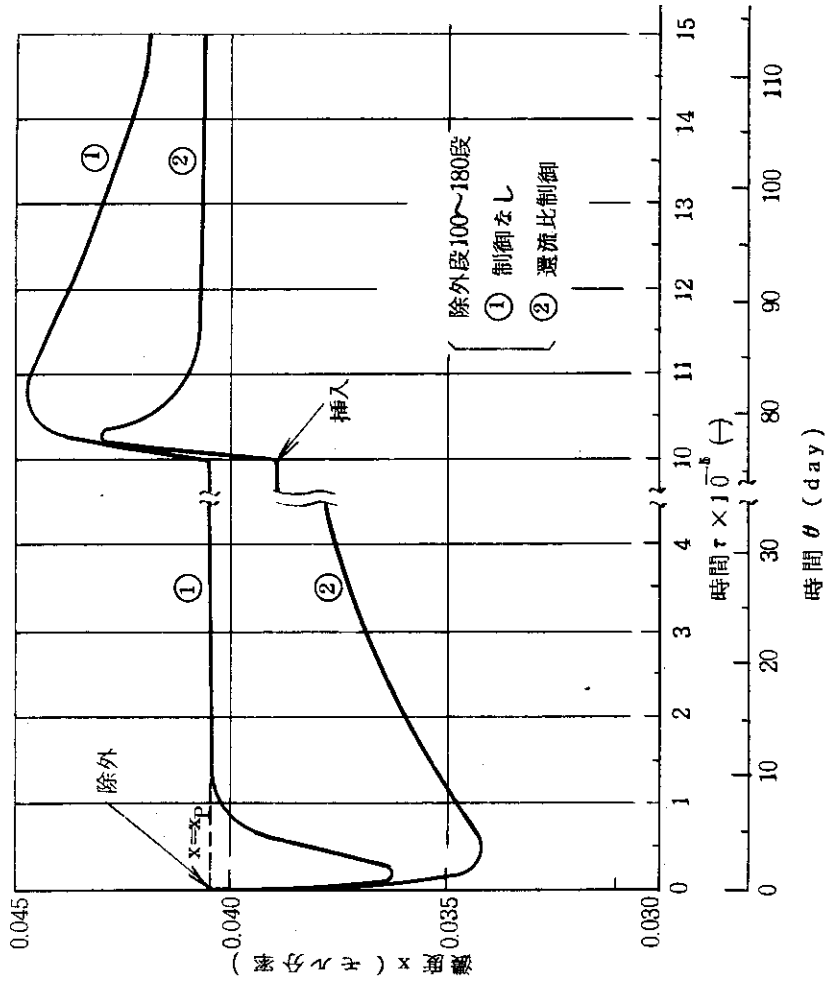


図 3-24 カスケードの 1 部を除外し、定常になってから挿入した場合の
製品濃度変化

図 3-25 カスケードの 1 部を除外し、定常になってから挿入した場合
の代表段濃度変化

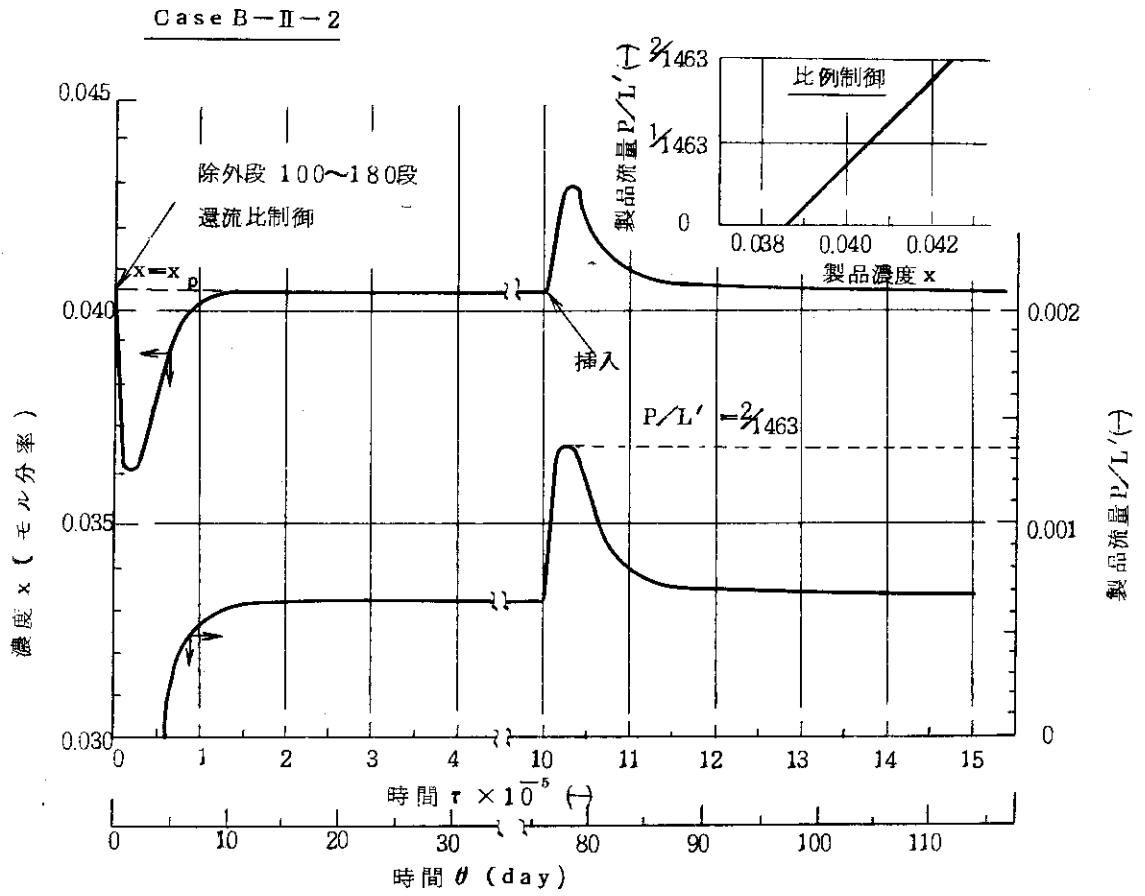


図3-26 還流比制御を行いながら除外段をカスケードに挿入した場合の製品濃度および流量変化

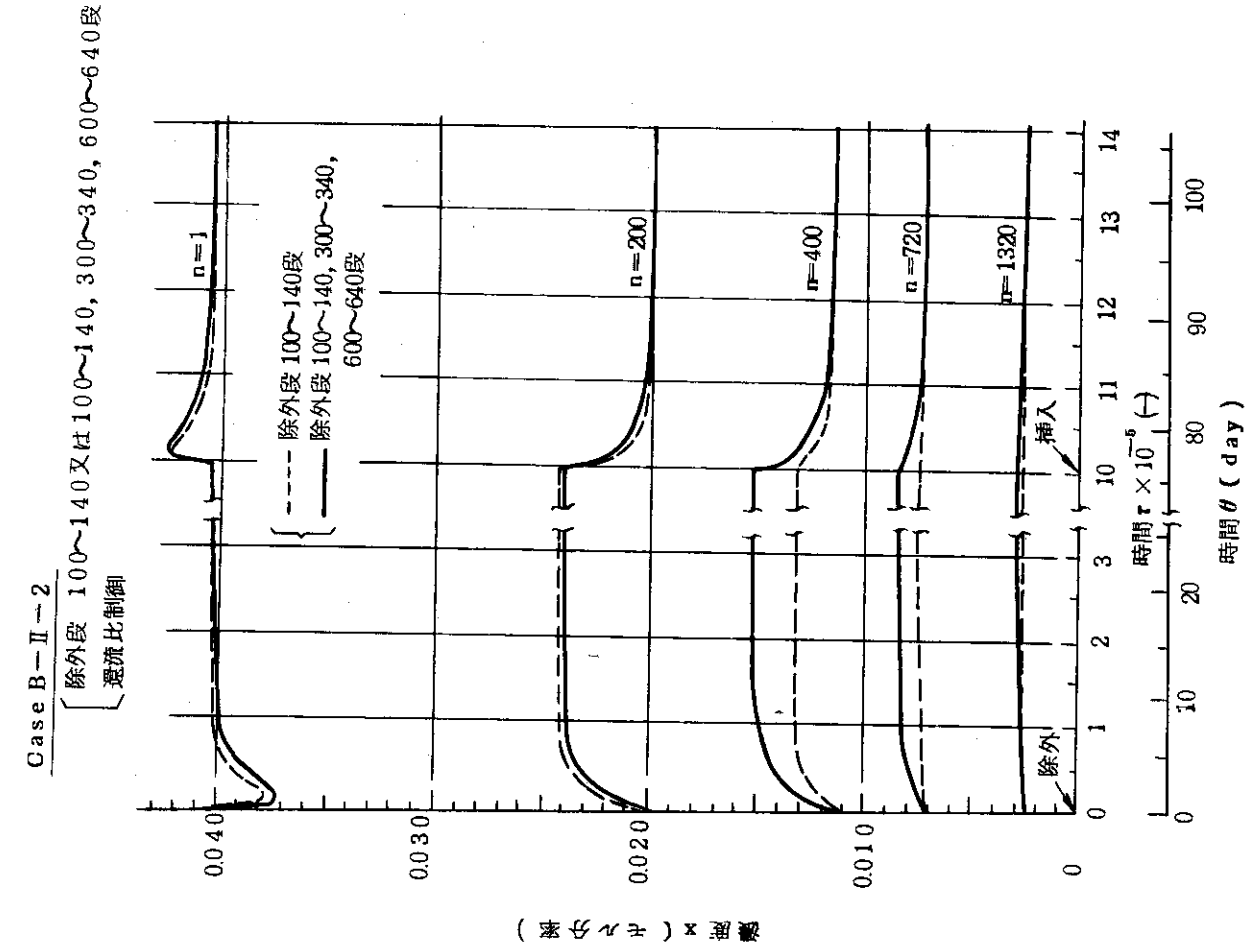


図 3-28 還流比制御を行ないながら除外段 1 個所又は 3 個所をカスケードに挿入した場合の代表段濃度変化

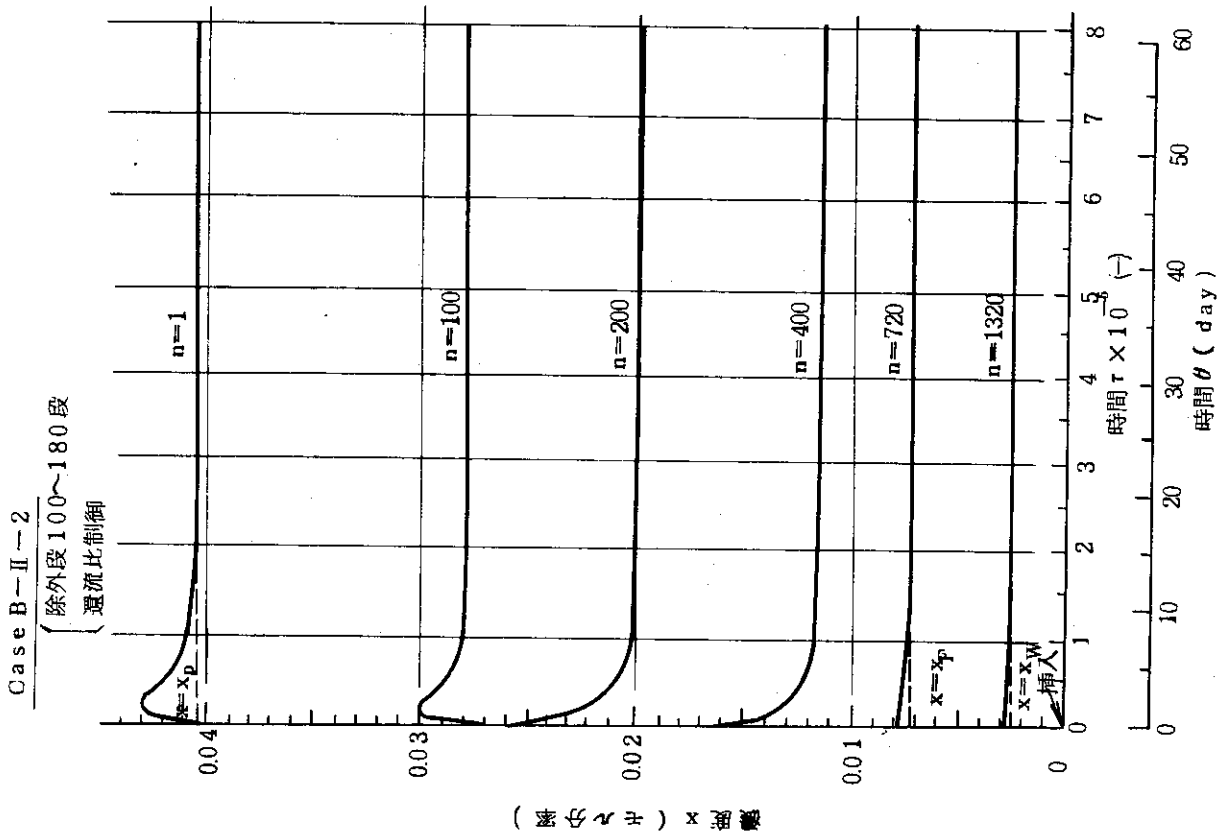


図 3-27 還流比制御を行ないながら除外段をカスケードに挿入した場合の代表段濃度変化

カスケードに復帰した場合の代表段濃度の経時変化を示したものである。図には、除外段が1個所(100~140段)の場合も示されているが、濃縮部の中部から下部を除いて両者には大きな差異はみられない。

以上、方形カスケードに関して、その1部を保守または修理のために除外、挿入する場合をいくつかの例について検討したが、製品段濃度に着目した簡単な還流比制御により効率的な運転が可能ながことが判明した。

ガス拡散プラントにおいて、保守または修理の頻度の高い個所は軸流圧縮機の軸封機構と考えられる。軸封部の交換・保守作業は、圧縮機停止時の気密を保持するためのシャットダウンシールを採用し、専用の治具を用意すれば、内部のUF₆ガスを排出することなく比較的容易に短時間に行い得るものと予想される。計算例においては、定常濃度になってからの挿入を取扱っているが、実際にはもっと短い期間で修復でき、プラントへの復帰はより短縮されよう。

3.5 シミュレーションプログラムの誤差評価

本シミュレーションプログラムの基本的な特徴は、カスケードを数十段ずつブロック化することにより、演算時間を大巾に短縮しようとするもので、ブロック巾(δn)を大きくしていくと演算時間は急激に短縮される。従って、ブロック化に伴う計算誤差を検討する必要がある。

3.5.1 ブロック巾に伴う誤差

表3-4は、全還流操作によりスタートアップした場合の代表段濃度の経時変化をブロック巾 $\delta n=20, 40, 60, 120$ として計算した結果である。これより、 $\delta n=120$ の場合を除いて、各濃度はほぼ一致しており、 $\delta n=60$ 程度のブロック巾ではそれに伴う誤差は微小で問題にならないと考えられる。なお、本章におけるケーススタディは、全て $\delta n=20$ として計算した。

3.5.2 定常時との比較

1) 定常濃度分布算出式の誘導

図2-1で示される方形カスケードについて、 n 段より上の物質収支をとると、

$$L'x'_{n+1} - Qx''_n - R = 0 \quad \dots (3.6)$$

ここで、

濃縮部について、

$$\left. \begin{aligned} Q &= L''_e = L' - P \\ R &= Px'_1 = P \times P \end{aligned} \right\} \quad \dots (3.7)$$

回収部について、

$$\left. \begin{aligned} Q &= L''_s = L' - P + F = L' - W \\ R &= Px'_1 - F \times F = W \times W \end{aligned} \right\} \quad \dots (3.8)$$

また、分離係数の定義より

$$x_n' = \frac{\alpha x_n''}{1 + (\alpha - 1) x_n''} = \frac{(1 + \epsilon) x_n''}{1 + \epsilon x_n''} \quad \dots (2.3)$$

(3.6) 式を上式を用いて下降流濃度で表わすと,

$$x_{n+1}'' \cdot x_n'' + A x_{n+1}'' + B x_n'' + C = 0 \quad \dots (3.9)$$

ここで, A, B, C は次式で表わされる。

濃縮部では,

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\frac{P}{L'} x_P \epsilon - (1 + \epsilon)}{\left(1 - \frac{P}{L'}\right) \epsilon} \\ B &= \frac{1}{\epsilon} \\ C &= \frac{\frac{P}{L'} x_P}{\left(1 - \frac{P}{L'}\right) \epsilon} \end{aligned} \right\} \dots (3.10)$$

回収部では,

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\left(\frac{P}{L'} x_P - \frac{F}{L'} x_F\right) \epsilon - (1 + \epsilon)}{\left(1 - \frac{P}{L'} + \frac{F}{L'}\right) \epsilon} \\ B &= \frac{1}{\epsilon} \\ C &= \frac{\frac{P}{L'} x_P - \frac{F}{L'} x_F}{\left(1 - \frac{P}{L'} + \frac{F}{L'}\right) \epsilon} \end{aligned} \right\} \dots (3.11)$$

(3.9) 式は, Riccati の差分方程式であり, その解は次式で与えられる。

$$x_n'' = S + \frac{1}{K \left(-\frac{A+S}{B+S}\right)^n - \frac{1}{(A+S) + (B+S)}} \quad \dots (3.12)$$

ここで,

$$S = \frac{-(A+B) \pm \sqrt{(A+B)^2 - 4C}}{2} \quad \dots (3.13)$$

先ず, 濃縮部については, 製品濃度 $x_1' = x_P$ が与えられているので, (2.3) 式より

$$x_1'' = \frac{x_1'}{\alpha - (\alpha - 1)x_1'} = \frac{x_p}{1 + \epsilon - \epsilon x_p} \dots\dots (3.14)$$

また、(3.12)式より

$$K = \left(-\frac{A+S}{B+S}\right)^{-1} \left\{ \frac{1}{x_1'' - S} + \frac{1}{(A+S) + (B+S)} \right\} \dots\dots (3.15)$$

原料供給段の1段上の濃度は、

$$x_{N_f-1}'' = S + \frac{1}{K \left(-\frac{A+S}{B+S}\right)^{N_f-1} - \frac{1}{(A+S) + (B+S)}} \dots\dots (3.16)$$

即ち、原料供給段の1段上の濃度 x_{N_f-1}'' が原料濃度 x_f に一致するよう試行錯誤法で流量 P/L' を求め、定数 A, C, S, K を決定する。以上の値を用いて、濃縮部各段の濃度は、(3.12)式より求めることができる。

次に、回収部については、同様に、

$$x_{N_f}'' = \frac{\beta x_f}{\beta x_f + \alpha(1 - x_f)} \dots\dots (3.17)$$

$$K = \left(-\frac{A+S}{B+S}\right)^{-N_f} \left\{ \frac{1}{x_{N_f}'' - S} + \frac{1}{(A+S) + (B+S)} \right\} \dots\dots (3.18)$$

$$x_{N_b}'' = S + \frac{1}{K \left(-\frac{A+S}{B+S}\right)^{N_b} - \frac{1}{(A+S) + (B+S)}} \dots\dots (3.19)$$

の3式より、廃棄材抜き出し段濃度 x_{N_b}'' が廃棄材濃度 x_w に一致するよう試行錯誤法で流量 F/L' を求め、定数 A, C, S, K を決定すれば、(3.12)式により各段の濃度を求めることができる。

2) 計算値の比較

定常運転状態における計算誤差を評価するために、1)に述べた計算手順で定常時の濃度分布を計算した。表3-5は、両者を比較したものである。これより、本動特性モデルから求めた定常値はブロック巾 δ_n が60程度までは、理論定常解と非常によく一致していることが分かる。即ち、本シミュレーションプログラムは、計算精度においても充分満足できるものと判断される。

3.5.3 既存文献における解析解との比較

D.W. Burton の解析解は、各段の平衡関係を $x_n' = \alpha x_n''$ のように線型化して近似しているため、本プログラムにおいてもこの点を修正し、両者を比較、検討する。

図3-29は、全還流操作における代表段濃度の経時変化を示したものである。×印は、

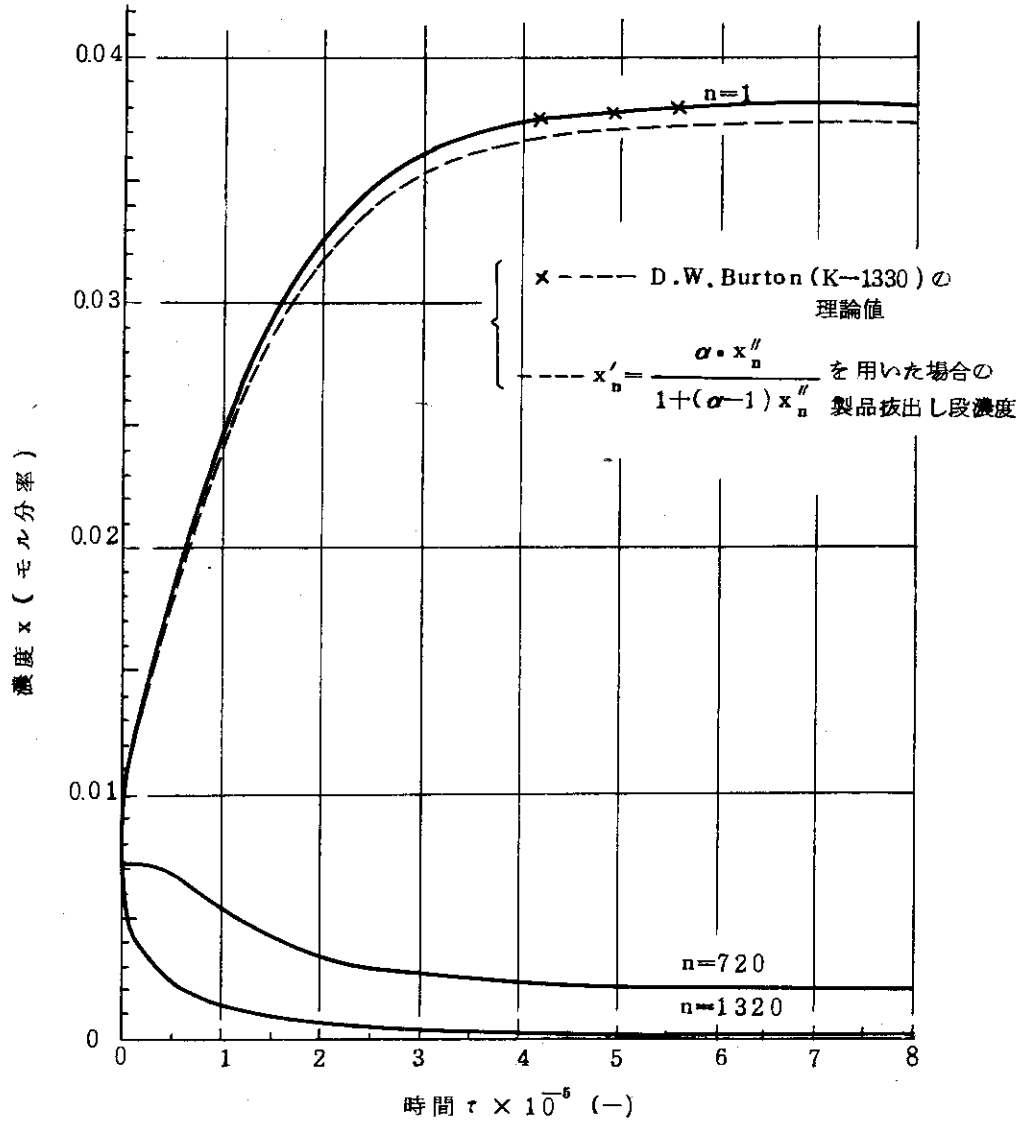


図3-29 全還流操作によるスタートアップ ($x'_n = \alpha x''_n$ の場合)

表3-4 全還流操作における代表段濃度の経時変化（ブロック中 δn の影響）

n	δn	τ								定常解 (mol %)
		1×10^5	2×10^5	3×10^5	4×10^5	6×10^5	8×10^5			
1	20	2.4059	3.1998	3.5364	3.6669	3.7374	3.7454	3.7496		
	40	2.4070	3.2005	3.5363	3.6651	3.7325	3.7456			
	60	2.3957	3.1939	3.5387	3.6662	3.7344	3.7451			
	120	2.3758	3.1751	3.5200	3.6559	3.7289	3.7397			
120	20	1.5618	2.0331	2.2306	2.3071	2.3494	2.3529	2.3635		
	40	1.5626	2.0335	2.2291	2.3065	2.3477	2.3506			
	60	1.5548	2.0267	2.2287	2.3027	2.3426	2.3492			
	120	1.5373	2.0056	2.2051	2.2837	2.3258	2.3321			
720	20	0.5368	0.3495	0.2693	0.2384	0.2238	0.2193	0.2202		
	40	0.5383	0.3477	0.2683	0.2361	0.2188	0.2190			
	60	0.5398	0.3483	0.2672	0.2354	0.2193	0.2178			
	120	0.5380	0.3445	0.2612	0.2284	0.2108	0.2082			
1320	20	0.1351	0.06181	0.03581	0.02614	0.02290	0.02004	0.0200		
	40	0.1367	0.06216	0.03549	0.02694	0.02274	0.01982			
	60	0.1372	0.06128	0.03595	0.02536	0.02049	0.02058			
	120	0.1347	0.05985	0.03396	0.02419	0.01901	0.01823			

Burtonの結果をプロットしたもので、両者はよく一致している。実際には、各段の平衡関係は、(2.3)式で示したように、 $x'_n = \alpha x_n'' / \{1 + (\alpha - 1) \cdot x_n''\}$ で表わされるため、全体の分離は小さくなる方向に修正される。図には、製品濃度について、その模様を破線で示してある。これより、定常値は予想された方向に修正されているが、濃度の経時変化は酷似していることが分かる。

表3-5 定常運転時の濃度と定常理論解との比較

n	δn	定常状態濃度	定常解濃度	$ \Delta x $ ($\times 10^{-5}$)
1	20	0.04026	0.04026	0
	40	0.04029		3
	60	0.04032		6
120	20	0.02586	0.02590	4
	40	0.02583		7
	60	0.02589		1
600	20	0.008182	0.008134	4.8
	40	0.008083		5.1
	60	0.008108		7.5
720	20	0.007189	0.007194	0.5
	40	0.007162		3.2
	60	0.007179		1.5
1320	20	0.002512	0.002462	5
	40	0.002501		3.9
	60	0.002510		4.8

4 おわりに

ガス拡散プラントの非定常特性を明らかにするための第1段階として、構成が単純で数式的な取扱いも比較的容易な方形カスケードを取り上げ、基礎方程式を誘導した。次いで、分離作業量がおよそ 8750 ton-SWU/yr のプラントを想定し、プラントのスタートアップとカスケードの1部が故障した場合について、幾つかのケーススタディを試みた。

その結果、次のことが明らかになった。

(1) ガス拡散プラントは、ウランのホールドアップが非常に大きい（従って、滞留時間が長い）、外乱に対する応答は非常に鈍感である。

(2) 幾つかのスタートアップ操作について検討した結果、製品段が所定濃度になった時点で所定流量の製品を抜き出す方式が最も有利であることが分った。しかし、この場合にも定常到達までに約20日を要する。ただし、実用プラントに採用されるステップカスケードでは、濃縮部上段のホールドアップが小さくなるので、所要時間は短縮されるものと予想される。

(3) カスケードの1部を保守又は修理のために除外する場合、除外段の大きさが大きい程、また、除外段の位置が製品抜き出し段に近い程、製品濃度への影響は著しく現われる。この場合、製品濃度に着目して還流比制御（比例制御）をかけると、製品濃度を短時間で所定値に復帰できる。

(4) 保守又は修理が完了して除外段をカスケードに復帰する場合の濃度の応答は、除外の場合と応答方向は逆であるが、その形は類似している。この場合にも、還流比制御を行うことにより、定常状態への復帰時間を大巾に短縮できる。

(5) 本シミュレーションプログラムの誤差評価を行ったところ、 $\delta n=60$ 程度のブロック中ではそれに伴う誤差は微小で問題にならないことが分った。また、本計算法で得られた値を定常理論解および非定常特性に関する文献値と比較したところ非常によい一致を示した。

今後は、実用プラントに採用されるステップカスケードについてより現実的な面を考慮して非定常特性の解析を行い、効率的な運転方式の確立をめざす必要がある。

参考文献

- 1) AEC; "Data on New Gaseous Diffusion Plants", ORO-685 (1972)
- 2) Cohen, K; "The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of ^{235}U ", McGraw-Hill, N.Y. (1951)
- 3) D.W. Burton; "Equilibrium Time for a Square Plant" K-1330 (1957)

4 おわりに

ガス拡散プラントの非定常特性を明らかにするための第1段階として、構成が単純で数式的な取扱いも比較的容易な方形カスケードを取り上げ、基礎方程式を誘導した。次いで、分離作業量がおよそ8750 ton-SWU/yrのプラントを想定し、プラントのスタートアップとカスケードの1部が故障した場合について、幾つかのケーススタディを試みた。

その結果、次のことが明らかになった。

(1) ガス拡散プラントは、ウランのホールドアップが非常に大きい（従って、滞留時間が長い）、外乱に対する応答は非常に鈍感である。

(2) 幾つかのスタートアップ操作について検討した結果、製品段が所定濃度になった時点で所定流量の製品を抜き出す方式が最も有利であることが分った。しかし、この場合にも定常到達までに約20日を要する。ただし、実用プラントに採用されるステップカスケードでは、濃縮部上段のホールドアップが小さくなるので、所要時間は短縮されるものと予想される。

(3) カスケードの1部を保守又は修理のために除外する場合、除外段の大きさが大きい程、また、除外段の位置が製品抜き出し段に近い程、製品濃度への影響は著しく現われる。この場合、製品濃度に着目して還流比制御（比例制御）をかけると、製品濃度を短時間で所定値に復帰できる。

(4) 保守又は修理が完了して除外段をカスケードに復帰する場合の濃度の応答は、除外の場合と応答方向は逆であるが、その形は類似している。この場合にも、還流比制御を行うことにより、定常状態への復帰時間を大巾に短縮できる。

(5) 本シミュレーションプログラムの誤差評価を行ったところ、 $\delta n=60$ 程度のブロック巾ではそれに伴う誤差は微小で問題にならないことが分った。また、本計算法で得られた値を定常理論解および非定常特性に関する文献値と比較したところ非常によい一致を示した。

今後は、実用プラントに採用されるステップカスケードについてより現実的な面を考慮して非定常特性の解析を行い、効率的な運転方式の確立をめざす必要がある。

参考文献

- 1) AEC; "Data on New Gaseous Diffusion Plants", ORO-685 (1972)
- 2) Cohen, K; "The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of ^{235}U ", McGraw-Hill, N.Y. (1951)
- 3) D.W. Burton; "Equilibrium Time for a Square Plant" K-1330 (1957)

ここで、 AE_i, CE_i, AD_i, CD_i は (2.22) 式を次のように変形したものである。

$$\left. \begin{aligned}
 AE_i &= \frac{1}{2 \cdot (DN)^2} \{ 2 + FAI_i - PL - (FAI_i + PL) \cdot (DN) \} \\
 CE_i &= \frac{1}{2 \cdot (DN)^2} \{ 2 + FAI_i - PL + (FAI_i + PL) \cdot (DN) \} \\
 AD_i &= \frac{1}{2 \cdot (DN)^2} \{ 2 + FAI_i + WL - (FAI_i - WL) \cdot (DN) \} \\
 CD_i &= \frac{1}{2 \cdot (DN)^2} \{ 2 + FAI_i + WL + (FAI_i - WL) \cdot (DN) \} \\
 BE_i &= - (AE_i + CE_i) \\
 BED &= - (DE_{IP} + AD_{IP}) \\
 BD_i &= - (AD_i + CD_i) \\
 FAI_i &= \frac{EPS \cdot (1 - X_i)}{1 + EPS \cdot X_i}
 \end{aligned} \right\} \dots (B)$$

(A), (B) 式に適切な初期条件, 境界条件を与えればスタートアップ, 定常運転の数値解析が可能となる。

また, プラント・システムの一部を除外するとき, たとえば代表段 J から K まで除外するとき(A)式のマトリックスの J 行から K 行まで取り去ればよい。

$$\frac{d}{d\tau} \begin{vmatrix} X_{J-2} \\ X_{J-1} \\ X_{K+1} \\ X_{K+2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{J-3}, B_{J-2}, C_{J-1} & & & 0 \\ & A_{J-2}, B_{J-1}, C_{K+1} & & \\ & & A_{J-1}, B_{K+1}, C_{K+2} & \\ 0 & & & A_{K+1}, B_{K+2}, C_{K+3} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X_{J-2} \\ X_{J-1} \\ X_{K+1} \\ X_{K+2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \end{vmatrix} \dots (C)$$

J 行から K 行まで取り去ると (J - 1) 行と (K + 1) 行が隣り合せになるので, (J - 1) 行の係数 C と (K + 1) 行の係数 A の添字はそれぞれ K + 1, J - 1 と置換えなければならない。(C) 式に除外部付近のマトリックスの変化を示した。

さらにプラント・システムの一部を復帰させる時は(A), (B) 式に戻り適切な初期条件, 境界条件を与えればよい。

連立常微分方程式(A)~(B)式は常微分方程式の数値解法の 1 手法であるところの RUNGE-KUTTA-MERSON 法で解いた。

RUNGE-KUTTA-MERSON 法は与えられた精度 (ER) の範囲内で適切な無次元時間 τ (TAU) の INTERVAL (TAUD) を選び計算する。したがって, 計算の初めから終りまで一定の INTERVAL で計算させる方法とは異なり無駄な計算時間を省くことが出来る。

2.2 分離仕事 (SW) および分離仕事の時間積分値 (SSW)

製品濃度を XTX , フィード濃度を XF , 廃棄物濃度を XBX , 製品拔出量を PL , 廃棄物拔出量を WL とすれば, 分離仕事 SW は,

$$SW = PL \cdot VXP + WL \cdot VXW$$

$$RP = \frac{XTX}{1 - XTX}$$

$$RF = \frac{XF}{1 - XF}$$

$$RW = \frac{XBX}{1 - XBX}$$

$$VXP = \frac{RP - 1}{1 + RP} \ln \left(\frac{RP}{RF} \right) + \frac{RP - RF}{1 + RP} \cdot \frac{1 - RF}{RF}$$

$$VXW = \frac{RW - 1}{1 + RW} \ln \left(\frac{RW}{RF} \right) + \frac{RW - RF}{1 + RW} \cdot \frac{1 - RF}{RF}$$

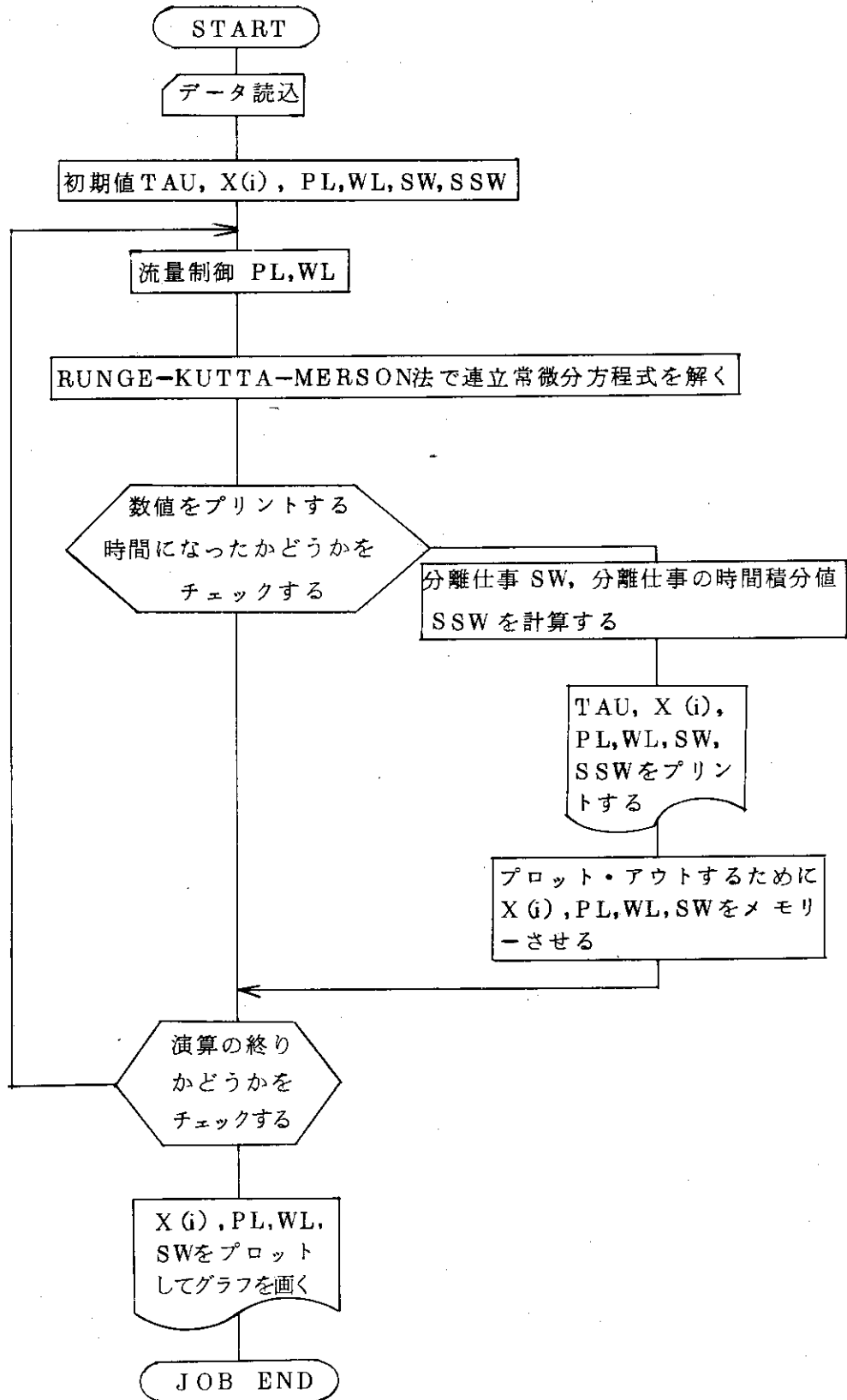
..... (D)

分離仕事の時間積分値は

$$SSW = \Sigma (SW \cdot TAUP) \quad \text{..... (E)}$$

で計算した。TAUP とはプリントの時間間隔で, SW はプリント時の値である。

3. フローチャート



4. 記号リスト

本プログラムに使用した主なFORTRAN記号を記す。() 付のものは次元を持つもので () 内数字はその最高エリヤを示す。

AI	積分制御の重みを示す係数
AP	比例制御の重みを示す係数
CASE	ケース名
COORD (1000)	プロッターの横軸の値
DATA	日付
DNAME (13)	プロットする変数の名前
EPS	分離係数から1引いた値 (ϵ)
FL	(フィード流量) \div (濃縮流) いわゆる F/L'
HMAX	無次元時間 τ の演算上の間隔の最大値の指定値
IF	{ (フィード段数) \div (代表段の間隔) } + 1
IJK	TAU=0 から TAU=TAUJ まで除外するかどうかのインデックス
IN	{ (全段数) \div (代表段の間隔) } + 1
JJK	TAU=TAUJ から TAU=TAUJR まで除外するかどうかのインデックス
JK (10)	実段数で表わした除外代表段
JKE (10)	{ (除外代表段) \div (代表段の間隔) } + 1
JKEX (10)	除外または挿入 (復起) の代表点
KJK	TAU=TAUJR から TAU=TAUE まで除外するかどうかのインデックス
N	全段数
NCON	濃縮製品拔出量の制御の方法についてのインデックス
ND	代表段の間隔
NF	フィード段数
NG	グラフをプロットするかどうかのインデックス
NINL	プラントの初期濃度分布についてのインデックス
NNINL	そのケースの濃度分布の最終値をメモリーするかどうかのインデックス
NP	数値をプリントするかどうかのインデックス
NPRO	濃縮製品拔出量の初期値についてのインデックス
NSONU	除外された部分の挿入時の濃度分布についてのインデックス
NWAST	廃棄物拔出量の初期値についてのインデックス
PL	濃縮製品拔出量 (P/L')
PLP	濃縮製品拔出量の指定値
REV	改訂名
RF	フィード濃度の ABUNDUNCE RATIO
RP	濃縮製品濃度の ABUNDUNCE RATIO
RW	廃棄物濃度の ABUNDUNCE RATIO
SRVIS	目的名

SSW	分離仕事の時間積分値
SW	分離仕事
TAU	無次元時間 ($L' t/H$)
TAUD	TAUの演算における初期値および演算における間隔 (INTERVAL)
TAUE	演算終了時間 (τ で表わす)
TAUJ	除外または挿入の最初の切換時間 (τ で表わす)
TAUJR	除外または挿入の最後の切換時間 (τ で表わす)
TAUP	プリントおよびプロットの時間間隔 (τ で表わす)
TIME	時刻
USER	使用者名
VXP	濃縮製品についての価値関数
VXW	廃棄物についての価値関数
V (1000, 13)	プロットする13個の変数の値
WL	廃棄物排出量 (W/L')
WLW	廃棄物排出量の指定値
WMAX (13)	プロットする13個の変数の最大値
WMIN (13)	プロットする13個の変数の最小値
X (200)	各代表段の濃度の応答
XBX	廃棄物排出段 (最下段) の濃度
XER	ルンゲ・クッタ・マーソン法において評価される誤差の大きさ
XF	天然ウラン中のU-235のモル濃度
XPX	濃縮製品の濃度
XTX	濃縮製品排出段 (最上段) の濃度
XWX	廃棄物の濃度
XX	メモリーされた各代表段の濃度
CLOCK (I)	時刻TIMEを呼出すサブルーチン・サブプログラム
GRPLOT (W, NCOORD, WMIN, WMAX, COORD, DNAME, 1000)	代表段 (最上段, 100段, 200段, 300段, 400段, 500段, 700段, 900段, 最下段) の濃度X, 濃縮製品排出量 PL, 廃棄物排出量WL, フィード供給量FL, 分離仕事SWの以上 13変数の時間変化をプロットしてグラフを画くサブルーチン・サブ プログラム
RKM (TAU, TAUD, X, XER, IN, HMAX)	常微分方程式の数値解法ルンゲ・クッタ・マーソン法のサブルーチン・ サブプログラム
PRINT (TAU, X, IN, SW, SSW)	代表段の濃度X, 濃縮製品排出量PL, 廃棄物排出量WL, 分離仕事

SW, 分離仕事の時間積分値SSWの無次元時間TAU (τ) における数値をプリントするサブルーチン・サブプログラム

UHEN (X, Y, IN) (21) ~ (22) 式に示した連立常微分方程式の右辺のサブルーチン・サブプログラム

SUHEN (X, Y, A, B, C, XJK, I, J, K, MM)

(23) 式に示した除外時の連立常微分方程式の右辺のサブルーチン・サブプログラム

5. 計算プログラムリスト

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-C -741130- V06-L03 75.09.08 PAGE 1

* SOURCE STATEMENT *

		MAIN	
C		MAIN	10
C	UNSTEADY STATE ANALYSIS OF GAS DIFFUSION PLANT		
C	(SQUARE CASCADE CONSIST OF 1320 STAGE)		
C		MAIN	40
1	DOUBLE PRECISION TIME,DNAME(13)	MAIN	50
2	DIMENSION X(200),XX(200),W(1000,13),COORD(1000),WMIN(13),WMAX(13)	MAIN	60
	* SRVIS(8),DATE(2),USER(6),JK(10),JKE(10),JKEX(10),II(7)	MAIN	70
3	EQUIVALENCE (JKEX(1),JV),(JKEX(2),KV),(JKEX(3),JW),(JKEX(4),KW),	MAIN	71
	* (JKEX(5),JX),(JKEX(6),KX),(JKEX(7),JY),(JKEX(8),KY),	MAIN	72
	* (JKEX(9),JZ),(JKEX(10),KZ)	MAIN	73
4	COMMON EPS,XF,ND,IF,PL,WL,NSONU,JKEX	MAIN	80
5	DATA DNAME,'TOP CONC','100 CONC','200 CONC','300 CONC','400 CONC',	MAIN	90
	* '500 CONC','700 CONC','900 CONC','BTM CONC','PRODUCT',	MAIN	100
	* 'FEED','WASTE','SEP WORK'/	MAIN	110
6	99 READ (5,101,END=999,ERR=888) SRVIS,DATE,CASE,REV,USER	MAIN	120
7	WRITE (6,9)	MAIN	130
8	CALL CLOCK(I)	MAIN	140
9	WRITE (6,1) I	MAIN	150
10	READ (5,102) N,NF,ND,XER,EPS,XF,TAUD,HMAX,TAUP,TAUE	MAIN	160
11	READ (5,103) NINL,NNINL,NPRO,NWAST,NCON,NSONU,NG,NP	MAIN	170
12	READ (5,104) XPX,XWX,PLP,WLW,AP,AJ	MAIN	180
13	READ (5,105) IJK,TAUJ,JJK,TAUJR,KJK	MAIN	190
14	READ (5,106) (JK(I),I=1,10)	MAIN	200
15	READ (5,178) (WMIN(I),I=1,9)	MAIN	210
16	READ (5,178) (WMAX(I),I=1,9)	MAIN	220
17	READ (5,190) (WMIN(I),I=10,13)	MAIN	230
18	READ (5,190) (WMAX(I),I=10,13)	MAIN	240
19	TAU=0.	MAIN	250
20	PL=PLP	MAIN	260
21	WL=WLW	MAIN	270
22	IF(NPRO.EQ.0) PL=0.	MAIN	280
23	IF(NWAST.EQ.0) WL=0.	MAIN	290
24	FL=PL+WL	MAIN	300
25	IN=N/ND+1	MAIN	310
26	IF=NF/ND+1	MAIN	320
27	IF(NINL.EQ.0) GO TO 10	MAIN	330
28	DO 20 I=1,IN	MAIN	340
29	20 X(I)=XX(I)	MAIN	350
30	GO TO 40	MAIN	360
31	10 DO 30 I=1,IN	MAIN	370
32	30 X(I)=XF	MAIN	380
33	40 RF=XF/(1.-XF)	MAIN	390
34	XTX=X(I)	MAIN	400
35	XBX=X(IN)	MAIN	410
36	RP=XTX/(1.-XTX)	MAIN	420
37	RW=XBX/(1.-XBX)	MAIN	430
38	VXP=(RP-1.)/(1.+RP)*ALOG(RP/RF)+(RP-RF)*(1.-RF)/(1.+RP)/RF	MAIN	440
39	VXW=(RW-1.)/(1.+RW)*ALOG(RW/RF)+(RW-RF)*(1.-RF)/(1.+RW)/RF	MAIN	450
40	SW=PL*VXP+WL*VXW	MAIN	460
41	IF(NG.EQ.1) GO TO 100	MAIN	470
42	DO 50 I=1,5	MAIN	480
43	50 II(I)=I*100/ND+1	MAIN	490
44	II(6)=IF	MAIN	500
45	II(7)=900/ND+1	MAIN	510
46	DO 60 I=1,7	MAIN	520
47	JJ=II(I)	MAIN	530
48	60 W(1,I+1)=X(JJ)	MAIN	540
49	W(1,1)=XIX	MAIN	550
50	W(1,9)=XBX	MAIN	560

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -741130- V06-L03 75.09.08 PAGE 2

* SOURCE STATEMENT (FTMAIN)*

51	W(1,10)=PL	MAIN 570
52	W(1,11)=FL	MAIN 580
53	W(1,12)=WL	MAIN 590
54	W(1,13)=SW	MAIN 600
55	SSW=0.	MAIN 610
56	NCORD=TAUE/TAUP+1	MAIN 620
57	DO 70 I=1,NCORD	MAIN 630
58	70 COORD(I)=(I-1)*TAUP	MAIN 640
59	100 DO 200 I=1,10	MAIN 650
60	200 JKE(I)=JK(I)/ND+1	MAIN 660
61	IF(IJK.EQ.0) GO TO 300	MAIN 670
62	DO 400 I=1,10	MAIN 680
63	400 JKEX(I)=1	MAIN 690
64	GO TO 500	MAIN 700
65	300 DO 600 I=1,10	MAIN 710
66	600 JKE(I)=JKE(I)	MAIN 720
67	500 WRITE (6,201) SRVIS	MAIN 730
68	WRITE (6,202) DATE,USER,CASE,REV	MAIN 740
69	WRITE (6,203) N,NF,ND	MAIN 750
70	WRITE (6,204) XER,EPS,XF	MAIN 760
71	WRITE (6,205) TAUD,HMAX,TAUP,TAUE	MAIN 770
72	IF(NINL.EQ.0) GO TO 2001	MAIN 780
73	WRITE (6,206)	MAIN 790
74	GO TO 2002	MAIN 800
75	2001 WRITE (6,207)	MAIN 810
76	2002 IF(NPRO.EQ.0) GO TO 2003	MAIN 820
77	WRITE (6,208)	MAIN 830
78	GO TO 2004	MAIN 840
79	2003 WRITE (6,209)	MAIN 850
80	2004 IF(NWAST.EQ.0) GO TO 2005	MAIN 860
81	WRITE (6,210)	MAIN 870
82	GO TO 2006	MAIN 880
83	2005 WRITE (6,211)	MAIN 890
84	2006 IF(NNINL.EQ.0) WRITE (6,212)	MAIN 900
85	IF(NCON.EQ.0) GO TO 2007	MAIN 910
86	WRITE (6,213) XPX,XWX,PLP,WLW,AP,AI	MAIN 920
87	GO TO 2008	MAIN 930
88	2007 WRITE (6,214) XPX,XWX,PLP,WLW	MAIN 940
89	2008 WRITE (6,215) TAUJ,IJK,TAUJ,TAUJR,JJK,TAUJR,TAUE,KJK	MAIN 950
90	WRITE (6,216) (JK(I),I=1,10)	MAIN 960
91	IF(NSONU.EQ.0) GO TO 2009	MAIN 970
92	IF(NSONU.EQ.1) GO TO 2010	MAIN 980
93	WRITE (6,217)	MAIN 990
94	GO TO 2011	MAIN1000
95	2009 WRITE (6,218)	MAIN1010
96	GO TO 2011	MAIN1020
97	2010 WRITE (6,219)	MAIN1030
98	2011 IF(NG.EQ.0) WRITE (6,220)	MAIN1040
99	IF(NP.EQ.0) WRITE (6,221)	MAIN1050
100	IF(NP.NE.0) GO TO 700	MAIN1060
101	WRITE (6,9)	MAIN1070
102	CALL PRINT(TAU,X,IN,SW,SSW)	MAIN1080
103	NNN=1	MAIN1090
104	TA=TAUP	MAIN1100
105	SS=0.	MAIN1110
106	TAUPRE=0.	MAIN1120
107	900 IF(NCON.EQ.0) GO TO 1000	MAIN1130
108	SS=SS+(TAU-TAUPRE)*(XTX-XPX)	MAIN1140
109	TAUPRE=TAU	MAIN1150

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -741130- V06-L03 75.09.08 PAGE 3

* SOURCE STATEMENT (FTMAIN)*

110		PL=PLP*(1.+AP*(XTX-XPX)+A)*SS)	MAIN1160
111		IF(PL,LT,0) PL=0,	MAIN1170
112		IF(PL,GT,2,*PLP) PL=2,*PLP	MAIN1180
113		IF(XBX,LE,XWX) WL=WLW	MAIN1190
114		GO TO 2000	MAIN1200
115	1000	IF(XTX,GE,XPX) PL=PLP	MAIN1210
116		IF(XBX,LE,XWX) WL=WLW	MAIN1220
117	2000	CALL RKM(TAU,TAUD,X,XER,IN,HMAX)	MAIN1230
118		XTX=X(1)	MAIN1240
119		XBX=X(IN)	MAIN1250
120		IF(TAU,LT,TA) GO TO 900	MAIN1260
121		TA=TA+TAUP	MAIN1270
122		FL=PL+WL	MAIN1280
123		RP=XTX/(1,-XTX)	MAIN1290
124		RW=XBX/(1,-XBX)	MAIN1300
125		VXP=(RP-1,)/(1,+RP)*ALOG(RP/RF)+(RP-RF)*(1,-RF)/(1,+RP)/RF	MAIN1310
126		VXW=(RW-1,)/(1,+RW)*ALOG(RW/RF)+(RW-RF)*(1,-RF)/(1,+RW)/RF	MAIN1320
127		SW=PL*VXP+WL*VXW	MAIN1330
128		SSW=SSW+SW*TAUP	MAIN1340
129		IF(NP,E0,0) CALL PRINT(TAU,X,IN,SW,SSW)	MAIN1350
130		IF(NG,NE,0) GO TO 3000	MAIN1360
131		NNN=NNN+1	MAIN1370
132		DO 4000 I=1,7	MAIN1380
133		JJ=I(I)	MAIN1390
134	4000	W(NNN,I+1)=X(JJ)	MAIN1400
135		W(NNN,1)=XTX	MAIN1410
136		W(NNN,9)=XBX	MAIN1420
137		W(NNN,10)=PL	MAIN1430
138		W(NNN,11)=FL	MAIN1440
139		W(NNN,12)=WL	MAIN1450
140		W(NNN,13)=SW	MAIN1460
141	3000	IF(TAU,GE,TAUJ) GO TO 5000	MAIN1470
142		GO TO 6010	MAIN1480
143	5000	IF(IJK,E0,JJK) GO TO 6010	MAIN1490
144		IF(JJK,E0,0) GO TO 7000	MAIN1500
145		DO 8000 I=1,10	MAIN1510
146	8000	JKEX(I)=1	MAIN1520
147		GO TO 5990	MAIN1530
148	7000	DO 9000 I=1,10	MAIN1540
149	9000	JKEX(I)=JKE(I)	MAIN1550
150	5990	IF(TAU,GE,TAUJR) GO TO 6000	MAIN1551
151		GO TO 6010	MAIN1552
152	6000	IF(JJK,E0,KJK) GO TO 6010	MAIN1560
153		IF(KJK,E0,0) GO TO 6020	MAIN1570
154		DO 6030 I=1,10	MAIN1580
155	6030	JKEX(I)=1	MAIN1590
156		GO TO 6010	MAIN1600
157	6020	DO 6040 I=1,10	MAIN1610
158	6040	JKEX(I)=JKE(I)	MAIN1620
159	6010	IF(JV,NE,1,AND,NSONU,NE,0) CALL SJK(X,JV,KV,NSONU,XF)	MAIN1621
160		IF(JW,NE,1,AND,NSONU,NE,0) CALL SJK(X,JW,KW,NSONU,XF)	MAIN1622
161		IF(JX,NE,1,AND,NSONU,NE,0) CALL SJK(X,JX,KX,NSONU,XF)	MAIN1623
162		IF(JY,NE,1,AND,NSONU,NE,0) CALL SJK(X,JY,KY,NSONU,XF)	MAIN1624
163		IF(JZ,NE,1,AND,NSONU,NE,0) CALL SJK(X,JZ,KZ,NSONU,XF)	MAIN1625
164		IF(TAU,LT,TAUE) GO TO 900	MAIN1630
165		IF(NNINL,NE,0) GO TO 8010	MAIN1640
166		DO 8020 I=1,IN	MAIN1650
167	8020	XX(I)=X(I)	MAIN1660
168	8010	IF(NG,NE,0) GO TO 99	MAIN1670

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -741130- V06-L03 75.09.08 PAGE 4

```

* SOURCE STATEMENT (FTMAIN )*
169      WRITE (6,9)                                MAIN1680
170      CALL GRPLOT(W,NCORD,WMIN,WMAX,COORD,DNAME,1000) MAIN1690
171      GO TO 99                                    MAIN1700
172      888 WRITE (6,888)                          MAIN1710
173      999 CALL CLOCK(I)                          MAIN1720
174      WRITE (6,3) I                              MAIN1730
175      1 FORMAT (3X,8HSTAR = ,I8)                MAIN1740
176      3 FORMAT (77,6HEND = ,I8)                MAIN1750
177      9 FORMAT (1H,1)                          MAIN1760
178      101 FORMAT (2X,18A4)                     MAIN1770
179      102 FORMAT (2X,3I4,7F8,0)                MAIN1780
180      103 FORMAT (2X,8I1)                      MAIN1790
181      104 FORMAT (2X,2F8,0,2F13,6,2F8,0)      MAIN1800
182      105 FORMAT (2X,11,F13,0,11,F13,0,11)    MAIN1810
183      106 FORMAT (2X,10I4)                    MAIN1820
184      178 FORMAT (2X,9F8,0)                   MAIN1830
185      190 FORMAT (2X,4F13,0)                  MAIN1840
186      201 FORMAT (77,30X,12H***** ,8A4,12H ***** ) MAIN1850
187      202 FORMAT (79,0X,2A4,2X,6A4,          MAIN1860
*          790X,6HCASE ,A4,6X,10HREVISION ,A4) MAIN1870
188      203 FORMAT (/25X, '*** DATA ***',//20X,18HTOTAL STAGE NUMBER,54X,14, MAIN1880
*          720X,10HFEED STAGE,62X,14,          MAIN1890
*          720X,32HINTERVAL OF REPRESENTATIVE STAGE,40X,14) MAIN1900
189      204 FORMAT (20X,15HALLOWABLE ERROR,47X,E14,7, MAIN1910
*          720X,17HSEPARATION FACTOR,45X,E14,7, MAIN1920
*          720X,32HCONC OF U-235 IN NATURAL URANIUM,30X,E14,7) MAIN1930
190      205 FORMAT (20X,23HINITIAL INTERVAL OF TAU,39X,E14,7, MAIN1940
*          720X,33HALLOWAVEL MAXIMUM INTERVAL OF TAU,29X,E14,7, MAIN1950
*          720X,30HPRINT AND PLOT INTERVAL OF TAU,32X,E14,7, MAIN1960
*          720X,15HEND TIME OF TAU,47X,E14,7) MAIN1970
191      206 FORMAT (20X,22HINITIAL CONC. OF U-235,35X,19HPRECASE FINAL VALUE) MAIN1980
192      207 FORMAT (20X,22HINITIAL CONC. OF U-235,39X,15HNATURAL URANIUM) MAIN1990
193      208 FORMAT (20X,25HINITIAL PRODUCT FLOW RATE,35X,16HDESIGNATED VALUE) MAIN2000
194      209 FORMAT (20X,25HINITIAL PRODUCT FLOW RATE,47X,4HZERO) MAIN2010
195      210 FORMAT (20X,23HINITIAL WASTE FLOW RATE,37X,16HDESIGNATED VALUE) MAIN2020
196      211 FORMAT (20X,23HINITIAL WASTE FLOW RATE,49X,4HZERO) MAIN2030
197      212 FORMAT (20X,21HMEMORY OF FINAL VALUE,53X,2HOK) MAIN2040
198      213 FORMAT (20X,10HPI CONTROL,725X,24HDESIGNATED PRODUCT CONC.,33X, MAIN2050
*          E14,7,725X,24H WASTE CONC.,33X,E14,7, MAIN2060
*          725X,24H PRODUCT FLOW RATE,33X,E14,7, MAIN2070
*          725X,24H WASTE FLOW RATE,33X,E14,7, MAIN2080
*          725X,24HCOEFFICIENT OF P-CONTROL,33X,E14,7, MAIN2090
*          725X,24HCOEFFICIENT OF I-CONTROL,33X,E14,7) MAIN2010
199      214 FORMAT (20X,48HWITHDRAW WHEN TOP AND BTM REACH DESIGNATED BELOW, MAIN2110
*          725X,24HDESIGNATED PRODUCT CONC.,33X,E14,7, MAIN2120
*          725X,24H WASTE CONC.,33X,E14,7, MAIN2130
*          725X,24H PRODUCT FLOW RATE,33X,E14,7, MAIN2140
*          725X,24H WASTE FLOW RATE,33X,E14,7) MAIN2150
200      215 FORMAT (20X,35HEXCEPTION '0' AND INTERPOSITION '1', MAIN2160
*          726X,5HSTART,8X,4H TO ,E14,7,38X,11, MAIN2170
*          725X,E14,7,4H TO ,E14,7,38X,11, MAIN2180
*          725X,E14,7,4H TO ,E14,7,38X,11) MAIN2190
201      216 FORMAT (20X,17HEXCEPTION SECTION, MAIN2200
*          725X,10HENRICHMENT,26X,1H(,14,1H,,14,3H),(,14,1H,,14, MAIN2210
*          3H),(,14,1H,,14,1H), MAIN2220
*          725X,10HDEPLETION ,38X,1H(,14,1H,,14,3H),(,14,1H,,14,1H)) MAIN2230
202      219 FORMAT (20X,30HCONC. OF INTERPOSITION SECTION,39X,7HAVERAGE) MAIN2240
203      217 FORMAT (20X,30HCONC. OF INTERPOSITION SECTION,34X,12HNATURAL URAN) MAIN2250
204      218 FORMAT (20X,30HCONC. OF INTERPOSITION SECTION,35X,11HSAME EXCEPT) MAIN2260

```

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -741130- V06-L03 75,09,08 PAGE 5

* SOURCE STATEMENT (FTMAIN)*

205	220	FORMAT (20X,10HPLOT GRAPH,64X,2HOK)	MAIN2270
206	221	FORMAT (20X,21HPRINT NUMERICAL VALUE,53X,2HOK)	MAIN2280
207	8888	FORMAT (20X,28H***** INPUT DATA ERROR *****)	MAIN2290
208		STOP	MAIN2300
209		END	MAIN2310

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -741130- V06-L03 75,09,08 PAGE 6

* SOURCE STATEMENT *

1		SUBROUTINE SJK(X,J,K,NSONU,XF)	SJK	10
2		DIMENSION X(1)	SJK	20
3		GO TO(10,20),NSONU	SJK	30
4	10	S=0,	SJK	50
5		DO 100 L=J,K	SJK	60
6	100	S=S+X(L)	SJK	70
7		AVX=S/FLOAT(K-J+1)	SJK	80
8		DO 200 L=J,K	SJK	90
9	200	X(L)=AVX	SJK	100
10		GO TO 99	SJK	110
11	20	DO 300 L=J,K	SJK	120
12	300	X(L)=XF	SJK	130
13	99	RETURN	SJK	140
14		END	SJK	150

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -741130- V06-L03 75.09.08 PAGE 7

* SOURCE STATEMENT *

1		SUBROUTINE RKM(TAU,TAUD,XX,XER,IN,HMAX)	RKM	10
	C		RKM	20
	C	RUNGE-KUTTA-MERSON METHOD	RKM	30
	C		RKM	40
2		DIMENSION X(200),XX(200),XI(200),Y(200),A(5),B(5,5),C(6,200)	RKM	50
3		T=TAU	RKM	60
4		H=TAUD	RKM	70
5		DO 10 I=1,IN	RKM	80
6	10	X(I)=XX(I)	RKM	90
7	99	A(1)=0,	RKM	100
8		A(2)=H/3,	RKM	110
9		A(3)=A(2)	RKM	120
10		A(4)=H/2,	RKM	130
11		A(5)=H	RKM	140
12		DO 20 J=1,5	RKM	150
13	20	B(J,1)=0,	RKM	160
14		B(2,2)=A(2)	RKM	170
15		B(3,2)=H/6,	RKM	180
16		B(3,3)=B(3,2)	RKM	190
17		B(4,2)=H/8,	RKM	200
18		B(4,3)=0,	RKM	210
19		B(4,4)=3.*B(4,2)	RKM	220
20		B(5,2)=A(4)	RKM	230
21		B(5,3)=0,	RKM	240
22		B(5,4)=-3.*A(4)	RKM	250
23		B(5,5)=2.*H	RKM	260
24		DO 30 I=1,IN	RKM	270
25	30	C(1,I)=0,	RKM	280
26		DO 40 J=1,5	RKM	290
27		DO 50 I=1,IN	RKM	300
28		XI(I)=X(I)	RKM	310
29		DO 50 K=1,J	RKM	320
30		XI(I)=XI(I)+B(J,K)*C(K,I)	RKM	330
31	50	CONTINUE	RKM	340
32		CALL UHEN(XI,Y,IN)	RKM	350
33		DO 40 I=1,IN	RKM	360
34		C(J+1,I)=Y(I)	RKM	370
35	40	CONTINUE	RKM	380
36		TAU=T+H	RKM	390
37		ERMAX=0,	RKM	400
38		DO 60 I=1,IN	RKM	410
39		XX(I)=X(I)+(H/6.)*(C(2,I)+4.*C(5,I)+C(6,I))	RKM	420
40		ER=(H/30.)*(2.*C(2,I)-9.*C(4,I)+8.*C(5,I)-C(6,I))	RKM	430
41		IF(ABS(ER).GT,ERMAX) ERMAX=ABS(ER)	RKM	440
42	60	CONTINUE	RKM	450
43		IF(ERMAX.LT,XER) GO TO 70	RKM	460
44		H=H/2.	RKM	470
45		GO TO 99	RKM	480
46	70	IF(ERMAX.LT,XER/32.) H=2.*H	RKM	490
47		IF(H.GE,HMAX) H=HMAX	RKM	500
48		TAUD=H	RKM	510
49		RETURN	RKM	520
50		END	RKM	530

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -741130- V06-L03 75,09,08 PAGE 8

* SOURCE STATEMENT *

1		SUBROUTINE PRINT(TAU,X,IN,SW,SSW)	PRT	10
	C		PRT	20
	C	WRITE TAU,X,PL,WL,SW,SSW	PRT	30
	C		PRT	40
2		COMMON EPS,XF,ND,IF,PL,WL,NSONU,JKEX	PRT	50
3		DIMENSION X(1),NN(7),JKEX(10)	PRT	60
4		WRITE(6,10) TAU,PL,WL,SW,SSW	PRT	70
5	10	FORMAT(///4X,6HTAU = ,E14,7,3X,5HPL = ,E14,7,3X,5HWL = ,E14,7, * 3X,5HSW = ,E14,7,3X,6HSSW = ,E14,7)	PRT	80
6		IP=(IN+6)/7	PRT	90
7		M=7	PRT	110
8		K=0	PRT	120
9		DO 99 L=1,IP		
10		J=K+1	PRT	140
11		K=J+6	PRT	150
12		IF(K,LE,IN) GO TO 20	PRT	160
13		K=IN	PRT	170
14		M=K-J+1	PRT	180
15	20	NN(1)=(J-1)*ND	PRT	190
16		DO 30 I=2,M	PRT	200
17	30	NN(I)=NN(I-1)+ND	PRT	210
18		WRITE(6,40) (NN(I),I=1,M)	PRT	220
19		WRITE(6,50) (X(I),I=J,K)	PRT	230
20	40	FORMAT(//4X,5HDANSU,9X,I4,6(13X,I4))	PRT	240
21	50	FORMAT(4X,4HNODE,1X,7(3X,E14,7))	PRT	250
22	99	CONTINUE	PRT	260
23		RETURN	PRT	270
24		END	PRT	280

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -741130- V06-L03 75.09.08 PAGE 9

* SOURCE STATEMENT *

1	SUBROUTINE GRPLOT(X,N,XMIN,XMAX,COORD,DNAME,NMAX)	GP 1000
2	DOUBLE PRECISION DNAME(13)	GP 1010
3	DIMENSION XINT(13),MA(13),KA(13),AB(13),A(101),	GP 1020
	* XMIN(1),XMAX(1),COORD(1),X(NMAX,1)	GP 1030
4	DATA AB/1HT,1H1,1H2,1H3,1H4,1H5,1H7,1H9,1HB,1HP,1HF,1HW,1HS/	GP 1040
5	DATA ABB,ABA/1H,1H*/	GP 1050
6	DO 100 I=1,13	GP 1060
7	100 XINT(I)=(XMAX(I)-XMIN(I))/100.0	GP 1070
8	WRITE(6,1010)	GP 1080
9	DO 200 I=1,13	GP 1090
10	200 WRITE(6,1020) AB(I),DNAME(I),XMIN(I),XMAX(I),XINT(I)	GP 1100
11	WRITE(6,1030)	GP 1110
12	WRITE(6,1040)	GP 1120
13	J=1	GP 1130
14	999 DO 300 K=1,101	GP 1140
15	300 A(K)=ABB	GP 1150
16	DO 400 I=1,13	GP 1160
17	MA(I)=IF(X((X(J,I)-XMIN(I))/XINT(I)+0.499)+1	GP 1170
18	IF(MA(I),GT,101) MA(I)=101	GP 1180
19	IF(MA(I),LT,1) MA(I)=1	GP 1190
20	400 CONTINUE	GP 1200
21	IK=0	GP 1210
22	DO 500 K=1,13	GP 1220
23	500 KA(K)=0	GP 1230
24	DO 700 K=1,13	GP 1240
25	KK=MA(K)	
26	DO 600 I=1,13	GP 1260
27	IF(I,EQ,K) GO TO 600	GP 1270
28	IF(MA(I),NE,KK) GO TO 600	GP 1280
29	KA(I)=MA(I)	GP 1290
30	IK=1	GP 1300
31	600 CONTINUE	GP 1310
32	700 CONTINUE	GP 1320
33	DO 800 I=1,13	GP 1330
34	800 A(MA(I))=AB(I)	GP 1340
35	IF(IK,NE,1) GO TO 1000	GP 1350
36	DO 900 I=1,13	GP 1360
37	IF(KA(I),EQ,0) GO TO 900	GP 1370
38	A(KA(I))=ABA	GP 1380
39	900 CONTINUE	GP 1390
40	1000 WRITE(6,1050) COORD(J),A,COORD(J)	GP 1400
41	IF(J,GE,N) GO TO 1100	GP 1410
42	J=J+1	GP 1420
43	GO TO 999	GP 1430
44	1100 WRITE(6,1040)	GP 1440
45	RETURN	GP 1450
46	1010 FORMAT(1H0, /34X, 'SYMBOL', 5X, 'NAME', 12X, 'MIN. VALUE', 8X,	GP 1460
	* 'MAX. VALUE', 8X, 'INTERVAL' /)	GP 1470
47	1020 FORMAT(1H, /36X, A1, 5X, A8, 7X, E13, 5, 4X, E13, 5, 4X, E13, 5)	GP 1480
48	1030 FORMAT(1H)	GP 1490
49	1040 FORMAT(1H, /14X, '0....*....1....*....2....*....3....*....4....*',	GP 1500
	* '....5....*....6....*....7....*....8....*....9....*....0')	GP 1510
50	1050 FORMAT(1H, /E11, 3, ' II', 101A1, ' II', E10, 3)	GP 1520
51	END	GP 1530

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -741130- V06-L03 75.09.08 PAGE 10

* SOURCE STATEMENT *

```

1      SUBROUTINE UHEN(X,Y,IN)                                UHEN 10
2      COMMON EPS,XF,ND,IF,PL,WL,NSONU,JKEX                 UHEN 20
3      DIMENSION X(200),Y(200),FAI(200),JKEX(10),          UHEN 30
4      *      AE(200),BE(200),CE(200),AD(200),BD(200),CD(200) UHEN 40
5      EQUIVALENCE (JKEX(1),JV),(JKEX(2),KV),(JKEX(3),JW),(JKEX(4),KW), UHEN 50
6      *      (JKEX(5),JX),(JKEX(6),KX),(JKEX(7),JY),(JKEX(8),KY), UHEN 60
7      *      (JKEX(9),JZ),(JKEX(10),KZ)                    UHEN 70
8      DO 10 I=1,IN                                          UHEN 80
9      10  FAI(I)=(1.-X(I))*EPS/(1.+X(I))*EPS                UHEN 90
10     DN=1./(2.*ND)                                         UHEN 100
11     DNN=DN/ND                                             UHEN 110
12     DO 20 I=1,IF                                          UHEN 120
13     20  A=(2.+FAI(I)-PL)*DNN                               UHEN 130
14     B=(FAI(I)+PL)*DN                                       UHEN 140
15     AE(I)=A-B                                             UHEN 150
16     CE(I)=A+B                                             UHEN 160
17     20  BE(I)=- (AE(I)+CE(I))                             UHEN 170
18     DO 30 I=IF,IN                                         UHEN 180
19     30  A=(2.+FAI(I)+WL)*DNN                               UHEN 190
20     B=(FAI(I)-WL)*DN                                       UHEN 200
21     AD(I)=A-B                                             UHEN 210
22     CD(I)=A+B                                             UHEN 220
23     30  BD(I)=- (AD(I)+CD(I))                             UHEN 230
24     BED=- (CE(IF)+AD(IF))                                  UHEN 240
25     DO 999 I=1,IN                                         UHEN 250
26     IF(I.NE.1) GO TO 40                                    UHEN 260
27     Y(1)=-2.*AE(1)*X(1)+2.*CE(2)*X(2)-4.*PL*DN*X(1)    UHEN 270
28     GO TO 999                                             UHEN 280
29     40  IF(I-IF) 50,60,70                                  UHEN 290
30     50  IF(JV.EQ.1) GO TO 1000                             UHEN 300
31     50  IF(JW.EQ.1) GO TO 3000                             UHEN 310
32     50  IF(JX.NE.1) GO TO 80                               UHEN 320
33     50  IF(I-JV+2) 3000,3000,4000                         UHEN 330
34     80  IF(I-JW+2) 3000,3000, 90                           UHEN 340
35     90  IF(I-JX+2) 4000,4000,5000                         UHEN 350
36     60  Y(IF)=AE(IF-1)*X(IF-1)+BED*X(IF)+CD(IF+1)*X(IF+1)+2.*(PL+WL)*DN UHEN 360
37     *      *XF                                             UHEN 370
38     GO TO 999                                             UHEN 380
39     70  IF(I.LT.IN) GO TO 100                              UHEN 390
40     Y(IN)=2.*AD(IN-1)*X(IN-1)-2.*CD(IN)*X(IN)-4.*WL*DN*X(IN) UHEN 400
41     GO TO 999                                             UHEN 410
42     100 IF(JY.EQ.1) GO TO 2000                             UHEN 420
43     100 IF(JZ.EQ.1) GO TO 6000                             UHEN 430
44     100 IF(I-JZ+2) 6000,6000,7000                         UHEN 440
45     1000 Y(I)=DIFEQ(X,AE,BE,CE,I)                          UHEN 450
46     GO TO 999                                             UHEN 460
47     2000 Y(I)=DIFEQ(X,AD,BD,CD,I)                          UHEN 470
48     GO TO 999                                             UHEN 480
49     3000 CALL SUHEN(X,Y,AE,BE,CE,XF,I,JV,KV,NSONU)        UHEN 490
50     GO TO 999                                             UHEN 500
51     4000 CALL SUHEN(X,Y,AE,BE,CE,XF,I,JW,KW,NSONU)        UHEN 510
52     GO TO 999                                             UHEN 520
53     5000 CALL SUHEN(X,Y,AE,BE,CE,XF,I,JX,KX,NSONU)        UHEN 530
54     GO TO 999                                             UHEN 540
55     6000 CALL SUHEN(X,Y,AD,BD,CD,XF,I,JY,KY,NSONU)        UHEN 550
56     GO TO 999                                             UHEN 560
57     7000 CALL SUHEN(X,Y,AD,BD,CD,XF,I,JZ,KZ,NSONU)        UHEN 570
58     999 CONTINUE                                          UHEN 580
59     RETURN                                                UHEN 590

```

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -741130- V06-L03 75.09.08 PAGE 11

* SOURCE STATEMENT (UHEN)*

56 END UHEN 600

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -741130- V06-L03 75.09.08 PAGE 12

* SOURCE STATEMENT *

1	FUNCTION DIFEQ(X,A,B,C,I)	DIFEQ 10
2	DIMENSION X(1),A(1),B(1),C(1)	DIFEQ 20
3	DIFEQ=A(I-1)*X(I-1)+B(I)*X(I)+C(I+1)*X(I+1)	DIFEQ 30
4	RETURN	DIFEQ 40
5	END	DIFEQ 50

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -741130- V06-L03 75.09.08 PAGE 13

* SOURCE STATEMENT *

1	SUBROUTINE SUHEN(X,Y,A,B,C,XJK,I,J,K,MM)	SUHEN 10
C	DIFEQ FOR EXCEPTION AND INTERPOSITION OF ARBITRARY PART	SUHEN 30
C		SUHEN 40
2	DIMENSION X(1),Y(1),A(1),B(1),C(1)	SUHEN 50
C		SUHEN 20
3	IF(I-J+1) 10,20,30	SUHEN 60
4	30 IF(I-K-1) 40,50,10	SUHEN 70
5	40 Y(I)=0.	SUHEN 80
6	GO TO 99	SUHEN 90
7	10 Y(I)=DIFEQ(X,A,B,C,I)	SUHEN100
8	GO TO 99	SUHEN110
9	20 Y(J-1)=A(J-2)*X(J-2)+B(J-1)*X(J-1)+C(K+1)*X(K+1)	SUHEN120
10	GO TO 99	SUHEN130
11	50 Y(K+1)=A(J-1)*X(J-1)+B(K+1)*X(K+1)+C(K+2)*X(K+2)	SUHEN140
12	99 RETURN	SUHEN150
13	END	SUHEN160