

JAERI - M  
88-005

遠心分離カスケードにおける  
プロダクト濃度の挙動とその調整  
— 保障措置設計のためのシミュレーション研究 —

1988年2月

岡本 毅\*・鈴木 篤之\*・西村 秀夫

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division  
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-  
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 燃高野高速印刷

遠心分離カスケードにおけるプロダクト濃度の挙動とその調整  
— 保障措置設計のためのシミュレーション研究 —

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部  
岡本 毅\*・鈴木 篤之\*・西村 秀夫

(1988年1月6日受理)

遠心分離法によるウラン濃縮プラントにどのような保障措置をかけるべきかについては HEXA-PARTITE プロジェクトにおいて議論が行われ、「頻度限定・無通告」方式による査察を行うことで合意が得られている。大型商用施設に対しても同様の手法が採用されることが考えられるが、このような施設では濃縮能力の拡大、機微な情報を保護することの重要性から、適用すべき保障措置の態様については十分な検討が必要とされる。これは、遠心分離法による大型商用ウラン濃縮プラントの保障措置システム設計のために行った、モデル施設の工程シミュレーション研究の結果得られた成果の一部を取りまとめたものである。

商用濃縮プラントを建設する場合に遭遇する悩ましい問題の一つに、軽水炉用燃料製造のために必要とされる広い範囲にわたる濃縮度の低濃縮ウランを得るには、どのような濃度の設計プロダクトで生産すべきかという問題がある。本研究ではこの問題に関する有用な対処法について考察する。

まず、モデル遠心分離カスケードの起動時の過渡特性について解析する。ここで用いる動特性方程式は、特に過渡状態にあるカスケード内流量とその濃度を正確に求めることができるように開発したものである。次に、カスケードの特性パラメーターであるカット、還流流量、カスケードへの原料供給流量を操作することで、どのような範囲までプロダクト濃度を変更させることが可能であるかを調べ、そこから適切な操作モードについての知見を得る。

本研究の結果、顧客からの各種濃縮度の低濃縮ウランの需要は、運転中のカスケード効率の低下を90%まで許容すると、一種類の単位カスケードの構成でほとんどかなえられることが明らかになった。

Dynamic Behavior and Control of Product Enrichment in a Centrifuge Cascade

- A Study of the Process Simulation as a basis of Safeguards Design -

Tsuyoshi OKAMOTO<sup>\*</sup>, Atsuyuki SUZUKI<sup>\*</sup> and Hideo NISHIMURA

Department of Fuel Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 6, 1988)

It was agreed as a conclusion of the HEXAPARTITE project that a limited frequency unannounced access (LFUA) inspection should be carried out in a centrifuge type enrichment plant as a basic safeguards approach. It might be adopted at a large scale, future commercial enrichment plant, too. Application of the LFUA approach to such a plant, however, should be fully investigated because the plant will have not only a larger capability of enriching uranium 235 but also a more sensitive information to be protected from the commercial and nonproliferation viewpoint. As a part of a design study on the safeguards approach for a model commercial plant, a study of process simulation of the plant has been carried out. This report describes a result of the study.

When a commercial uranium enrichment plant is constructed, a nuisance problem arises; What kind of products should be produced from the plant in order to match a wide range of nuclear fuel enrichment requirements for light-water power reactors. In this report, a reasonable solution to such a problem is investigated.

At first, a transient analysis of start-up for a model centrifuge cascade is made by using the dynamic equations, which were so developed as to be able to accurately compute interstage flow rates and enrichment in a transient state. Then it is investigated how wide in its acceptable range the product enrichment can be controlled by regulating cascade

---

\* University of Tokyo

characteristic parameters such as cascade cut, recycle flow rate and cascade feed flow rate, and as a result an information about the optimal regulating mode is brought out.

As a result of this study, it has become clear that the specific requirements of a customer are almost fulfilled with only one type of unit cascade system if 10 % loss of cascade efficiency is allowed in the plant operation.

Keywords: Safeguards Design, Process Simulation, Uranium Enrichment, Nuclear Fuel, Light-Water Power Reactor, Centrifuge, Cascade, Start-up, Dynamic Equation, Interstage Flow, Product Enrichment, Transient State, Cut, Recycle Flow, Feed Flow, Cascade Efficiency

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 非定常カスケードの流量方程式と計算法 .....	1
3. カスケード起動時の正確な濃度プロファイル .....	3
4. 特性パラメーター操作による設計濃度の変更 .....	4
5. カスケード効率と濃度調整可能範囲の検討 .....	5
6. 結 論 .....	5
謝 辞 .....	6
参考文献 .....	7
付録 濃縮流量に関する差分方程式 .....	15

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Flow Equations and its Calculation Method for a Transient Cascade .....	1
3. Accurate Product Enrichment Profile at a Cascade Start-up .....	3
4. Change of a Design Product Enrichment by regulating Cascade Parameters .....	4
5. Investigations of Cascade Efficiency and an Adjustable Range of Product Enrichment .....	5
6. Conclusion .....	5
References .....	6
Appendix Difference Equation on an Enriched Flow at each Stage of a Cascade .....	15

## 記 号

$L$	:	流入流量
$L'$	:	濃縮流量
$L''$	:	減損流量
$f'$	:	濃縮流路への段間供給流量
$f''$	:	減損流路への段間供給流量
$p'$	:	濃縮流路からの段間抜き出し流量
$p''$	:	減損流路からの段間抜き出し流量
$N$	:	流入流濃度
$N'$	:	濃縮流濃度
$N''$	:	減損流濃度
$n'$	:	濃縮流路への段間供給流濃度
$n''$	:	減損流路への段間供給流濃度
$h$	:	流入流路および遠心分離機内の滞留時間
$h'$	:	濃縮流路内の滞留時間
$h''$	:	減損流路内の滞留時間
$\theta$	:	遠心分離機で定まるカット
$\alpha$	:	遠心分離機の頭部分離係数
$\beta$	:	遠心分離機の底部分離係数
$j$	:	カスケードの第 $j$ 段

## 1. ま え が き

最近、レーザー法によるウラン濃縮<sup>(1),(2),(3)</sup>がにわかに脚光を浴びるようになって、次期新濃縮技術としての期待が高まりつつある。一方、わが国においては長年にわたる遠心分離機の技術開発<sup>(4),(5)</sup>の実績を踏まえて、初の商用濃縮プラントが建設されようとしている<sup>(6)</sup>。ところで、濃縮プラントで生産する設計プロダクト濃度と軽水炉用核燃料として要求されるウラン濃度との間には濃縮度調整問題が存在するので、実用段階を迎えたこの時期に、この問題を検討しておくことはプラントの効率的な運用を図る意味で十分に意義がある。

軽水炉の初装荷燃料あるいは取替燃料は、一般には、広い範囲の濃縮度スペクトルを持ち、しかも、高燃焼度化に伴いより高い濃縮度へとシフトする傾向にある。このような状況に対処するためのひとつに、予め濃度の異なる幾種類かのプロダクトを生産しておき、必要に応じてそれらをブレンド調整するという方法がある。

本研究では、遠心分離法ウラン濃縮において、そのカスケード特性パラメーターを操作することで設計プロダクト濃度の変更調整を行う方法を考察してみる。そこから低濃縮ウランの調整に適する操作モードが何か、また、要求される遠心分離機の分離特性とは何か、さらに、建設すべきカスケードの種類は何によって決まるかなどの知見を引き出す。

## 2. 非定常カスケードの流量方程式と計算法

カスケードの動特性方程式において、しばしばその式中の流量は時間に関係なく一定であるという仮定が採用されている<sup>(7),(8),(9)</sup>。この仮定は、カスケードの起動や停止あるいは他の操作でカスケード内に大きな流量変動が起こるような場合には成立しない。特に、遠心分離カスケードの動特性解析では流量変動が重要な役割を果たすので、これを考慮に入れた動特性方程式が必要になってくる<sup>(10)</sup>。そこで、以下に、その算出手順を簡単に述べる。

カスケード途中段からの抜き出しや途中段への供給がある場合の一般性をもつカスケード内の流れの様子を Fig. 1 に示す。各段の濃縮流路（または減損流路）に段間抜き出し  $p'_j$ （または  $p''_j$ ）と段間供給  $f'_j$ （または  $f''_j$ ）とがあり、 $B_j$ 、 $C_j$  はそれぞれ同一あるいは異なる濃度の流れの合流点になる。また、 $A_j$  は異なる濃度をもつ流れの合流点である。各流路中の  $p'_j$  と  $f'_j$ （または  $p''_j$  と  $f''_j$ ）流れはカスケード間の接続や還流路の形成などに応用でき、より複雑な流路をもつカスケードの動特性解析を可能にする。同図中には、第  $(j-1)$  段濃縮流路からの  $p'_{j-1}$  を第  $j$  段減損流路中の  $f''_j$  に接続して還流路を形成している例が示されている。

このような流れをもつカスケードの第  $j$  段における流入流量  $L_j$  の基礎方程式、

$$L_j(t) = L'_j(t + h_j + h'_j) + L''_j(t + h_j + h''_j) \quad (1)$$

$$\theta_j = L'_j(t + h_j + h'_j) / L_j(t) \quad (2)$$



## 1. ま え が き

最近、レーザー法によるウラン濃縮<sup>(1),(2),(3)</sup>がにわかに脚光を浴びるようになって、次期新濃縮技術としての期待が高まりつつある。一方、わが国においては長年にわたる遠心分離機の技術開発<sup>(4),(5)</sup>の実績を踏まえて、初の商用濃縮プラントが建設されようとしている<sup>(6)</sup>。ところで、濃縮プラントで生産する設計プロダクト濃度と軽水炉用核燃料として要求されるウラン濃度との間には濃縮度調整問題が存在するので、実用段階を迎えたこの時期に、この問題を検討しておくことはプラントの効率的な運用を図る意味で十分に意義がある。

軽水炉の初装荷燃料あるいは取替燃料は、一般には、広い範囲の濃縮度スペクトルを持ち、しかも、高燃焼度化に伴いより高い濃縮度へとシフトする傾向にある。このような状況に対処するためのひとつに、予め濃度の異なる幾種類かのプロダクトを生産しておき、必要に応じてそれらをブレンド調整するという方法がある。

本研究では、遠心分離法ウラン濃縮において、そのカスケード特性パラメータを操作することで設計プロダクト濃度の変更調整を行う方法を考察してみる。そこから低濃縮ウランの調整に適する操作モードが何か、また、要求される遠心分離機の分離特性とは何か、さらに、建設すべきカスケードの種類は何によって決まるかなどの知見を引き出す。

## 2. 非定常カスケードの流量方程式と計算法

カスケードの動特性方程式において、しばしばその式中の流量は時間に関係なく一定であるという仮定が採用されている<sup>(7),(8),(9)</sup>。この仮定は、カスケードの起動や停止あるいは他の操作でカスケード内に大きな流量変動が起こるような場合には成立しない。特に、遠心分離カスケードの動特性解析では流量変動が重要な役割を果たすので、これを考慮に入れた動特性方程式が必要になってくる<sup>(10)</sup>。そこで、以下に、その算出手順を簡単に述べる。

カスケード途中段からの抜き出しや途中段への供給がある場合の一般性をもつカスケード内の流れの様子を Fig. 1 に示す。各段の濃縮流路（または減損流路）に段間抜き出し  $p'_j$ （または  $p''_j$ ）と段間供給  $f'_j$ （または  $f''_j$ ）とがあり、 $B_j$ 、 $C_j$  はそれぞれ同一あるいは異なる濃度の流れの合流点になる。また、 $A_j$  は異なる濃度をもつ流れの合流点である。各流路中の  $p'_j$  と  $f'_j$ （または  $p''_j$  と  $f''_j$ ）流れはカスケード間の接続や還流路の形成などに応用でき、より複雑な流路をもつカスケードの動特性解析を可能にする。同図中には、第  $(j-1)$  段濃縮流路からの  $p'_{j-1}$  を第  $j$  段減損流路中の  $f''_j$  に接続して還流路を形成している例が示されている。

このような流れをもつカスケードの第  $j$  段における流入流量  $L_j$  の基礎方程式、

$$L_j(t) = L'_j(t + h_j + h'_j) + L''_j(t + h_j + h''_j) \quad (1)$$

$$\theta_j = L'_j(t + h_j + h'_j) / L_j(t) \quad (2)$$

$$L_j(t) = L'_{j-1}(t) + L''_{j+1}(t) + f'_{j-1} + f''_{j+1} - p'_{j-1} - p''_{j+1} \quad (3)$$

に対して、時間に関する2次微分項を無視し、かつ、滞留時間及びカットは流量の変化に関係なく一定であるとする。この結果、以下の濃縮流量  $L'_j$  に関する動特性方程式を得る。濃縮部の最上段 ( $j=S$ ) から第1段までは、

$$\begin{aligned} -L'_S(t) + L'_{j-1}(t) - L''_j(t) + \sum_{i=j-1}^{S-1} (f'_i - p'_i) + \sum_{i=j+1}^S (f''_i - p''_i) \\ \simeq \sum_{i=j}^S Q_i \frac{dL'_i(t)}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

$$(j = S, \dots, 2, 1)$$

また、原料供給段 ( $j=0$ ) から回収部の第  $[-(B-1)]$  段までは、

$$\begin{aligned} \sum_{\ell=1}^k F_{\ell} - L'_S(t) + L'_{j-1}(t) - L''_j(t) + \sum_{i=j-1}^{S-1} (f'_i - p'_i) + \sum_{i=j+1}^S (f''_i - p''_i) \\ \simeq \sum_{i=j}^S Q_i \frac{dL'_i(t)}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

$$[j = 0, -1, -2, \dots, -(B-1)]$$

となる。さらに、回収部の最底段 ( $j=-B$ ) は、

$$\begin{aligned} \sum_{\ell=1}^k F_{\ell} - L'_S(t) - L''_{-B}(t) + \sum_{i=-B}^{S-1} (f'_i - p'_i) + \sum_{i=-(B-1)}^S (f''_i - p''_i) \\ \simeq \sum_{i=-B}^S Q_i \frac{dL'_i(t)}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

と表される。ただし、

$$L''_j(t) = G_j(t) - L'_j(t) + (h'_j - h''_j) (K_j - 1) \frac{dL'_j(t)}{dt} \quad (7)$$

$$G_j(t) = \frac{1}{\theta_j} \cdot L'_j(t) \quad (8)$$

$$K_j = \frac{1}{\theta_j} \quad (9)$$

$$Q_j = h'_j - h''_j + (h_j + h''_j) K_j \quad (10)$$

ここで、方程式中の  $L'_S(t)$ 、 $L''_B(t)$  はそれぞれプロダクト流量  $P(t)$  とテイル流量  $W(t)$  に対応している。これらの動特性方程式を解くためには、付録に示すような差分方程式に変換される。さらに、流入流量  $L_j(t)$ 、減損流量  $L''_j(t)$  に関する同様な差分方程式も得られるが、それらは基本的には上式の数值解  $L'_j(t)$  と  $L'_j(t + \Delta t)$  を用いて解かれる。

一般に、カスケード各段の流入流量変動はその段に設置されている遠心分離機一台当たりの処理流量の変化となって現われる。従って、この処理流量の増減に応じて遠心分離機の分離特性<sup>(11)</sup>も同時に計算し、その時刻での分離係数  $\alpha_j(t)$ 、 $\beta_j(t)$  を求めなければならない。こうして得られた  $\alpha_j(t)$ 、 $\beta_j(t)$  および  $L_j(t)$ 、 $L'_j(t)$ 、 $L''_j(t)$  を用いて時々刻々の濃度変動が計算される。ここで、第  $j$  段濃縮流の濃度  $N'_j(t)$  を記述する動特性方程式は流量  $L'_j(t)$  を求めたのと同じ手法で容易に導出できる<sup>(12)</sup>。また、カスケード供給流量  $F$  および  $p'_j$ 、 $p''_j$ 、 $f'_j$ 、 $f''_j$  の供給モードは著者達の開発した計算コード (CCS-I)<sup>\*</sup> 上では、それぞれ独立に入力できるように工夫されている。

### 3. カスケード起動時の正確な濃度プロフィール

商用濃縮プラントではカスケード規模の最小単位として、分離作業量の小さい単位カスケードが多数建設され、それらの並列複数運転によりプロダクトが生産される。この単位カスケードの一例として、分離作業量 20 ton SWU/y の理想カスケードを Fig. 2 に示す。各段の大きさはそのまま設置されたモデル遠心分離機の数に比例し、濃縮部と回収部がほぼ同数 (約 1430 台) の遠心分離機で構成されている。なお、各段のカットは遠心分離機で定まるカットに一致させてあるため、厳密な意味での理想カスケードとはなっていない。以下に、この単位カスケードの原料供給 (起動) 時の過渡特性について調べてみる<sup>(13)</sup>。

ある定められた起動手順に従ってカスケードに天然ウランを供給し、60分後には設定供給流量  $F = 26.19$  ton U/y にする。この時のカスケード各段の流入流量変動を Fig. 3 に示す。原料が供給段から濃縮部の最上段および回収部の最底段へと向かって、段間内を順次移動して行く様子がわかる。このカスケードからは原料供給開始後、約50分でテイルの抜き出しがはじまり、段数の多い濃縮部ではこれより遅れてプロダクトが抜き出される。そして、定常状態ではプロダクト流量は  $P = 4.13$  ton U/y に達する。

一方、このような流入流量変動に伴ってカスケード内の濃度勾配も急速に変化する。この様子を経過時間をパラメーターにして、Fig. 4 に示す。定常状態 ( $t = \infty$ ) において濃縮部最上段の濃縮流濃度  $N'_{12} (\equiv N_p)$  は正確に設計値 3.345% となる。ここで注目すべきことは、カスケード起動時においても各段の流入流量が常に定常値をとるという仮定では、同図中の点線で示すような濃度勾配 ( $t = 200$  分) になるということである。本数值計算の同時刻の濃度勾配と比較してみれば分かるように、両者に大きな差異が生じている。これは、時々刻々の流量を正確に求め、それを濃度方程式に

\* Centrifuge Cascade Simulaton -I

$$Q_j = h'_j - h''_j + (h_j + h''_j) K_j \quad (10)$$

ここで、方程式中の  $L'_S(t)$ 、 $L''_B(t)$  はそれぞれプロダクト流量  $P(t)$  とテイル流量  $W(t)$  に対応している。これらの動特性方程式を解くためには、付録に示すような差分方程式に変換される。さらに、流入流量  $L_j(t)$ 、減損流量  $L''_j(t)$  に関する同様な差分方程式も得られるが、それらは基本的には上式の数値解  $L'_j(t)$  と  $L'_j(t + \Delta t)$  を用いて解かれる。

一般に、カスケード各段の流入流量変動はその段に設置されている遠心分離機一台当たりの処理流量の変化となって現われる。従って、この処理流量の増減に応じて遠心分離機の分離特性<sup>(11)</sup>も同時に計算し、その時刻での分離係数  $\alpha_j(t)$ 、 $\beta_j(t)$  を求めなければならない。こうして得られた  $\alpha_j(t)$ 、 $\beta_j(t)$  および  $L_j(t)$ 、 $L'_j(t)$ 、 $L''_j(t)$  を用いて時々刻々の濃度変動が計算される。ここで、第  $j$  段濃縮流の濃度  $N'_j(t)$  を記述する動特性方程式は流量  $L'_j(t)$  を求めたのと同じ手法で容易に導出できる<sup>(12)</sup>。また、カスケード供給流量  $F$  および  $p'_j$ 、 $p''_j$ 、 $f'_j$ 、 $f''_j$  の供給モードは著者達の開発した計算コード (CCS-I)<sup>\*</sup> 上では、それぞれ独立に入力できるように工夫されている。

### 3. カスケード起動時の正確な濃度プロフィール

商用濃縮プラントではカスケード規模の最小単位として、分離作業量の小さい単位カスケードが多数建設され、それらの並列複数運転によりプロダクトが生産される。この単位カスケードの一例として、分離作業量 20 ton SWU/y の理想カスケードを Fig. 2 に示す。各段の大きさはそのまま設置されたモデル遠心分離機の数に比例し、濃縮部と回収部がほぼ同数 (約 1430 台) の遠心分離機で構成されている。なお、各段のカットは遠心分離機で定まるカットに一致させてあるため、厳密な意味での理想カスケードとはなっていない。以下に、この単位カスケードの原料供給 (起動) 時の過渡特性について調べてみる<sup>(13)</sup>。

ある定められた起動手順に従ってカスケードに天然ウランを供給し、60分後には設定供給流量  $F = 26.19$  ton U/y にする。この時のカスケード各段の流入流量変動を Fig. 3 に示す。原料が供給段から濃縮部の最上段および回収部の最底段へと向かって、段間内を順次移動して行く様子がわかる。このカスケードからは原料供給開始後、約50分でテイルの抜き出しがはじまり、段数の多い濃縮部ではこれより遅れてプロダクトが抜き出される。そして、定常状態ではプロダクト流量は  $P = 4.13$  ton U/y に達する。

一方、このような流入流量変動に伴ってカスケード内の濃度勾配も急速に変化する。この様子を経過時間をパラメーターにして、Fig. 4 に示す。定常状態 ( $t = \infty$ ) において濃縮部最上段の濃縮流濃度  $N'_{1,2} (\equiv N_p)$  は正確に設計値 3.345% となる。ここで注目すべきことは、カスケード起動時においても各段の流入流量が常に定常値をとるという仮定では、同図中の点線で示すような濃度勾配 ( $t = 200$  分) になるということである。本数値計算の同時刻の濃度勾配と比較してみれば分かるように、両者に大きな差異が生じている。これは、時々刻々の流量を正確に求め、それを濃度方程式に

\* Centrifuge Cascade Simulator - I

連立させて、明らかになった事実である。この意味で、本計算モデルはより現実に近い動特性シミュレーションになっている。

カスケード起動時は設計濃度とは異なる高い濃度 (< 20%) のプロダクトが一時的に生産されるが、その量と平均濃度について求めたのが Fig. 5 である。カスケード最上段からのプロダクト流量の定常値接近への様子を示したのが破線の部分である。実線は時々刻々のプロダクト生産量の積分値を示している。

一方、同図中からプロダクト濃度はコールド・トラップ等の捕集段階で均質・平均化され、通常の低濃縮ウランとしてシリンダーへ回収されるのが読みとれる。すなわち、実線上に示されている各時刻でのプロダクト平均濃度  $\bar{N}_p$  の時間推移を見れば分る。例えば、プロダクト流量がほぼ定常値になった時点 ( $t = 600$  分) での平均濃度は 5.9% である。その時の生産量は約 3000 gU になっている。

#### 4. 特性パラメーター操作による設計濃度の変更

カスケードの特性パラメーターを操作することで、通常的设计濃度とは異なるプロダクトを生産することができる<sup>(14),(15)</sup>。ここでは、特に、カスケード・カット、還流流量及び供給流量を操作して希望する濃度のプロダクトを得るものとする。カスケード各段のカットを一斉に設定カットから別のカットへと変更した場合、カスケード内流入流量分布がどのように変化するかを調べてみる。このカスケード・カット変更モードとして、カスケード全段変更 (CASE - I)、濃縮部全段変更 (CASE - II) および回収部全段変更 (CASE - III) の3つを代表例に選ぶ。このうち、Fig. 6 には CASE - I について、設定カットから  $\theta = 0.44, 0.5, 0.53$  へと変更した場合のそれぞれの流入流量分布が示されている。ここで、カスケード全段にわたってカットが 0.5 の場合、各段で濃縮流量と減損流量が互いに等しくなるので流入流量は直線的に変化する。この値より小さなカットでは濃縮部内の総流入流量の減少割合は回収部内のそれよりも大きくなっている。このようなカット変更に伴うカスケード内全体の総流入流量の変化を Fig. 7 に示す。ただし、総流入流量およびカットの値は規格化して示されている。CASE - III ではカットの増加と共に総流入流量もそのまま増加し続けるが、CASE - I においてはカット  $\theta^*$  が 1.085 で最大値をとるように変化する。また、CASE - II の場合は、カット  $\theta^*$  による総流入流量の変化はそれほど大きくなることが分る。

カスケード内の総流入流量の変化がプロダクト濃度にどのように影響するかを調べたのが Fig. 8 である。一般的に言って、カットが小さくなればプロダクト濃度は高くなるが、特に、CASE - I、CASE - II ではこの傾向が著しい。この事は Fig. 6 の流入流量分布特性から考えて、濃縮部での 2 成分系ガスの分離が一層進んだものと理解出来る。この場合のプロダクト濃度調整には、3 つのケースのうち最もゆるやかに変化する CASE - III が有利である。

次に、第  $j$  段の濃縮流量  $L'_j$  の一部、すなわち、 $p'_j$  を隣接する第  $(j-1)$  段濃縮流路中の  $f'_{j-1}$  に接続し、還流させる場合のプロダクト濃度変化を調べてみる。ここで、 $p'_j$  と  $L'_j$  との比をリサイクル率として表し、このリサイクル率とプロダクト濃度との関係を濃縮部の各段 ( $j = 3, 7, 9, 11$ ) について求めたのが Fig. 9 である。同図より、濃縮部の最上段に近い段ほどゆるやかに濃度の変化が起こるのが分る。また、どの段においてもリサイクル率が大きくなると急速に濃度

連立させて、明らかになった事実である。この意味で、本計算モデルはより現実に近い動特性シミュレーションになっている。

カスケード起動時は設計濃度とは異なる高い濃度 (< 20%) のプロダクトが一時的に生産されるが、その量と平均濃度について求めたのが Fig. 5 である。カスケード最上段からのプロダクト流量の定常値接近への様子を示したのが破線の部分である。実線は時々刻々のプロダクト生産量の積分値を示している。

一方、同図中からプロダクト濃度はコールド・トラップ等の捕集段階で均質・平均化され、通常の低濃縮ウランとしてシリンダーへ回収されるのが読みとれる。すなわち、実線上に示されている各時刻でのプロダクト平均濃度  $\bar{N}_p$  の時間推移を見れば分る。例えば、プロダクト流量がほぼ定常値になった時点 ( $t = 600$  分) での平均濃度は 5.9% である。その時の生産量は約 3000 gU になっている。

#### 4. 特性パラメーター操作による設計濃度の変更

カスケードの特性パラメーターを操作することで、通常的设计濃度とは異なるプロダクトを生産することができる<sup>(14),(15)</sup>。ここでは、特に、カスケード・カット、還流流量及び供給流量を操作して希望する濃度のプロダクトを得るものとする。カスケード各段のカットを一斉に設定カットから別のカットへと変更した場合、カスケード内流入流量分布がどのように変化するかを調べてみる。このカスケード・カット変更モードとして、カスケード全段変更 (CASE - I)、濃縮部全段変更 (CASE - II) および回収部全段変更 (CASE - III) の3つを代表例に選ぶ。このうち、Fig. 6 には CASE - I について、設定カットから  $\theta = 0.44, 0.5, 0.53$  へと変更した場合のそれぞれの流入流量分布が示されている。ここで、カスケード全段にわたってカットが 0.5 の場合、各段で濃縮流量と減損流量が互いに等しくなるので流入流量は直線的に変化する。この値より小さなカットでは濃縮部内の総流入流量の減少割合は回収部内のそれよりも大きくなっている。このようなカット変更に伴うカスケード内全体の総流入流量の変化を Fig. 7 に示す。ただし、総流入流量およびカットの値は規格化して示されている。CASE - III ではカットの増加と共に総流入流量もそのまま増加し続けるが、CASE - I においてはカット  $\theta^*$  が 1.085 で最大値をとるように変化する。また、CASE - II の場合は、カット  $\theta^*$  による総流入流量の変化はそれほど大きくなることが分る。

カスケード内の総流入流量の変化がプロダクト濃度にどのように影響するかを調べたのが Fig. 8 である。一般的に言って、カットが小さくなればプロダクト濃度は高くなるが、特に、CASE - I、CASE - II ではこの傾向が著しい。この事は Fig. 6 の流入流量分布特性から考えて、濃縮部での2成分系ガスの分離が一層進んだものと理解出来る。この場合のプロダクト濃度調整には、3つのケースのうち最もゆるやかに変化する CASE - III が有利である。

次に、第  $j$  段の濃縮流量  $L'_j$  の一部、すなわち、 $p'_j$  を隣接する第  $(j-1)$  段濃縮流路中の  $f'_{j-1}$  に接続し、還流させる場合のプロダクト濃度変化を調べてみる。ここで、 $p'_j$  と  $L'_j$  との比をリサイクル率として表し、このリサイクル率とプロダクト濃度との関係を濃縮部の各段 ( $j = 3, 7, 9, 11$ ) について求めたのが Fig. 9 である。同図より、濃縮部の最上段に近い段ほどゆるやかに濃度の変化が起こるのが分る。また、どの段においてもリサイクル率が大きくなると急速に濃度

は高くなるが、遠心分離機の分離機構からみて、その値には上限値がある。

これまでのカット変更、還流操作は通常の濃縮プラントではみられない特別な手段による濃度変更調整法と言える。これに対して、最も容易に実現できるのがカスケード供給流量を操作する方法である。この方法によるプロダクト濃度の供給流量への依存性を求めたのが Fig. 10 である。プロダクト濃度は供給流量が減少するにつれて、ゆるやかに増加して行くのが分る。

## 5. カスケード効率と濃度調整可能範囲の検討

前節では、3種類のパラメーター操作によるプロダクト濃度変化を検討した。どのパラメーターを操作するにしても設定された運転条件から異なってくるため、カスケードの分離作業量は減少する。すなわち、カスケード効率としては低下する。例えば、Fig. 10 に示されているように通常設定されたカスケード供給流量で効率は100%であるが、それ以外の供給流量ではいずれもその効率は低下する。

カスケード効率90%までの運転においては、同図中のカスケード効率曲線から下限は2.66%、上限は3.83%までのプロダクト濃度の変更調整ができる。供給流量変動に対する遠心分離機の分離パワーの低下が少なければ少ないほど、より広い範囲の濃度調整が可能になることがわかる。このプロダクト濃度調整可能範囲とカスケード効率の関係を整理した結果が Fig. 11 に示されている。これによると回収部全段のカット変更 (CASE-III) ではカスケード効率を高く維持したまま、3つのパラメーター操作中で最も広い範囲 (Region I) の濃度調整が可能となる。一方、濃縮流の還流操作の場合、カスケード効率90%において、設計濃度  $N_p = 3.345\%$  から上限は3.70%までの範囲 (Region II) で調整が可能となる。しかし、これは同じ効率の供給流量操作による調整範囲 (Region III) 内に包含されている。

さらに、カスケード効率95%の運転では CASE-III を除いて、その濃度調整可能範囲はきわめて狭くなる。特に、供給流量操作の場合、設計濃度よりも低い側のプロダクトの生産には別の単位カスケードを新たに建設しなければならない。このように、運転上許容されるカスケード効率とプロダクト別の単位カスケードの種類は互いに相反する性質のものであり、プラント全体としてのカスケード体系をどのようにするかはブレンディング・ロス<sup>(16)</sup>なども考慮に入れて最終的に決めなければならない。

## 6. 結 論

本研究で得られた成果は次のようにまとめられる。

- (1) 非常定状態にあるカスケードの流量方程式を導出することができた。この成果により、各段で任意のカットをもつカスケードの設計計算が容易になった。
- (2) カスケード内に大きな流量変動があった場合、従来の流量一定モデルではその適用範囲に限界がある。ここに開発した流量変動の計算モデルによれば、より現実に近い数値解を与えることができ、カスケードの起動計算を例にとり、それを明らかにした。

は高くなるが、遠心分離機の分離機構からみて、その値には上限値がある。

これまでのカット変更、還流操作は通常の濃縮プラントではみられない特別な手段による濃度変更調整法と言える。これに対して、最も容易に実現できるのがカスケード供給流量を操作する方法である。この方法によるプロダクト濃度の供給流量への依存性を求めたのが Fig. 10 である。プロダクト濃度は供給流量が減少するにつれて、ゆるやかに増加して行くのが分る。

## 5. カスケード効率と濃度調整可能範囲の検討

前節では、3種類のパラメーター操作によるプロダクト濃度変化を検討した。どのパラメーターを操作するにしても設定された運転条件から異なってくるため、カスケードの分離作業量は減少する。すなわち、カスケード効率としては低下する。例えば、Fig. 10 に示されているように通常設定されたカスケード供給流量で効率は100%であるが、それ以外の供給流量ではいずれもその効率は低下する。

カスケード効率90%までの運転においては、同図中のカスケード効率曲線から下限は2.66%、上限は3.83%までのプロダクト濃度の変更調整ができる。供給流量変動に対する遠心分離機の分離パワーの低下が少なければ少ないほど、より広い範囲の濃度調整が可能になることがわかる。このプロダクト濃度調整可能範囲とカスケード効率の関係を整理した結果が Fig. 11 に示されている。これによると回収部全段のカット変更 (CASE-III) ではカスケード効率を高く維持したまま、3つのパラメーター操作中で最も広い範囲 (Region I) の濃度調整が可能となる。一方、濃縮流の還流操作の場合、カスケード効率90%において、設計濃度  $N_p = 3.345\%$  から上限は3.70%までの範囲 (Region II) で調整が可能となる。しかし、これは同じ効率の供給流量操作による調整範囲 (Region III) 内に包含されている。

さらに、カスケード効率95%の運転では CASE-III を除いて、その濃度調整可能範囲はきわめて狭くなる。特に、供給流量操作の場合、設計濃度よりも低い側のプロダクトの生産には別の単位カスケードを新たに建設しなければならない。このように、運転上許容されるカスケード効率とプロダクト別の単位カスケードの種類は互いに相反する性質のものであり、プラント全体としてのカスケード体系をどのようにするかはブレンディング・ロス<sup>(16)</sup>なども考慮に入れて最終的に決めなければならない。

## 6. 結 論

本研究で得られた成果は次のようにまとめられる。

- (1) 非定常状態にあるカスケードの流量方程式を導出することができた。この成果により、各段で任意のカットをもつカスケードの設計計算が容易になった。
- (2) カスケード内に大きな流量変動があった場合、従来の流量一定モデルではその適用範囲に限界がある。ここに開発した流量変動の計算モデルによれば、より現実に近い数値解を与えることができ、カスケードの起動計算を例にとり、それを明らかにした。



は高くなるが、遠心分離機の分離機構からみて、その値には上限値がある。

これまでのカット変更、還流操作は通常の濃縮プラントではみられない特別な手段による濃度変更調整法と言える。これに対して、最も容易に実現できるのがカスケード供給流量を操作する方法である。この方法によるプロダクト濃度の供給流量への依存性を求めたのが Fig. 10 である。プロダクト濃度は供給流量が減少するにつれて、ゆるやかに増加して行くのが分る。

## 5. カスケード効率と濃度調整可能範囲の検討

前節では、3種類のパラメーター操作によるプロダクト濃度変化を検討した。どのパラメーターを操作するにしても設定された運転条件から異なってくるため、カスケードの分離作業量は減少する。すなわち、カスケード効率としては低下する。例えば、Fig. 10 に示されているように通常設定されたカスケード供給流量で効率は100%であるが、それ以外の供給流量ではいずれもその効率は低下する。

カスケード効率90%までの運転においては、同図中のカスケード効率曲線から下限は2.66%、上限は3.83%までのプロダクト濃度の変更調整ができる。供給流量変動に対する遠心分離機の分離パワーの低下が少なければ少ないほど、より広い範囲の濃度調整が可能になることがわかる。このプロダクト濃度調整可能範囲とカスケード効率の関係を整理した結果が Fig. 11 に示されている。これによると回収部全段のカット変更 (CASE - III) ではカスケード効率を高く維持したまま、3つのパラメーター操作中で最も広い範囲 (Region I) の濃度調整が可能となる。一方、濃縮流の還流操作の場合、カスケード効率90%において、設計濃度  $N_p = 3.345\%$  から上限は3.70%までの範囲 (Region II) で調整が可能となる。しかし、これは同じ効率の供給流量操作による調整範囲 (Region III) 内に包含されている。

さらに、カスケード効率95%の運転では CASE - III を除いて、その濃度調整可能範囲はきわめて狭くなる。特に、供給流量操作の場合、設計濃度よりも低い側のプロダクトの生産には別の単位カスケードを新たに建設しなければならない。このように、運転上許容されるカスケード効率とプロダクト別の単位カスケードの種類は互いに相反する性質のものであり、プラント全体としてのカスケード体系をどのようにするかはブレンディング・ロス<sup>(16)</sup>なども考慮に入れて最終的に決めなければならない。

## 6. 結 論

本研究で得られた成果は次のようにまとめられる。

- (1) 非定常状態にあるカスケードの流量方程式を導出することができた。この成果により、各段で任意のカットをもつカスケードの設計計算が容易になった。
- (2) カスケード内に大きな流量変動があった場合、従来の流量一定モデルではその適用範囲に限界がある。ここに開発した流量変動の計算モデルによれば、より現実に近い数値解を与えることができ、カスケードの起動計算を例にとり、それを明らかにした。

- (3) カスケード特性パラメーター操作のうち、カット変更モードでは回収部のカット操作が低濃縮ウランの濃度調整に適している。しかも、高いカスケード効率で広い範囲の調整が可能になる。
- (4) 濃縮部最上段の還流操作が他の段と比較して、流量操作域も広く、濃度変化もゆるやかに起こるので低濃縮ウラン調整に適している。
- (5) しかし、最も現実的な低濃縮ウラン濃度調整は、カスケードの供給流量を操作することである。この場合、プロダクト別に建設するカスケードの種類については許容されるカスケード効率、遠心分離機の分離特性、それにカバーすべき濃縮度スペクトル範囲などが重要な決定要素となる。

今後の研究課題として、次のような問題点が挙げられる。すなわち、遠心分離機の処理流量と内部循環流量、分離係数、滞留時間の因果関係はガス・ダイナミックスが複雑で理論的に予測は困難であるが、これらの諸量を現実に近い値で計算できるように計算手法を改良ないしは修正しなければならない。勿論、実験用遠心分離プラントからのデータを直接用いて計算モデルを修正するのが最も理想的であるのは言うまでもない。また、原料供給時のプロダクト濃度のすどい立ち上りを積極的に利用したパルス化運転を行えば、製品の高濃縮度化に十分対処できる方法になろう。この周期運転制御に関する理論的検討も今後期待される。

## 謝 辞

本研究は大型ウラン濃縮施設の保障措置システム設計研究の一部として行われた。これに関して、終始一貫してご指導下さり、かつ、有益なご助言をいただきました日本原子力研究所大洗研究所の平田実穂所長と多大なご支援とご理解を賜りました東海大学工学部の清瀬量平教授に深く感謝の意を表します。

- (3) カスケード特性パラメーター操作のうち、カット変更モードでは回収部のカット操作が低濃縮ウランの濃度調整に適している。しかも、高いカスケード効率で広い範囲の調整が可能になる。
- (4) 濃縮部最上段の還流操作が他の段と比較して、流量操作域も広く、濃度変化もゆるやかに起こるので低濃縮ウラン調整に適している。
- (5) しかし、最も現実的な低濃縮ウラン濃度調整は、カスケードの供給流量を操作することである。この場合、プロダクト別に建設するカスケードの種類については許容されるカスケード効率、遠心分離機の分離特性、それにカバーすべき濃縮度スペクトル範囲などが重要な決定要素となる。

今後の研究課題として、次のような問題点が挙げられる。すなわち、遠心分離機の処理流量と内部循環流量、分離係数、滞留時間の因果関係はガス・ダイナミックスが複雑で理論的に予測は困難であるが、これらの諸量を現実に近い値で計算できるように計算手法を改良ないしは修正しなければならない。勿論、実験用遠心分離プラントからのデータを直接用いて計算モデルを修正するのが最も理想的であるのは言うまでもない。また、原料供給時のプロダクト濃度のすどい立ち上りを積極的に利用したパルス化運転を行えば、製品の高濃縮度化に十分対処できる方法になろう。この周期運転制御に関する理論的検討も今後期待される。

## 謝 辞

本研究は大型ウラン濃縮施設の保障措置システム設計研究の一部として行われた。これに関して、終始一貫してご指導下さり、かつ、有益なご助言をいただきました日本原子力研究所大洗研究所の平田実穂所長と多大なご支援とご理解を賜りました東海大学工学部の清瀬量平教授に深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

1. AIChE Symposium Series, vol. 78, No 221 (1982).
2. 柴 是行, 他: 原子力工業, vol. 30, No 12, 35 (1984).
3. J. L. EMMETT, et al. : IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-20, No 6, 591 (1984).
4. Nuclear Engineering International, vol. 29, No 350 (1984).
5. Nuclear News, vol. 27, No 2 (1984).
6. Nuclear Engineering International, vol. 29, No 356 (1984).
7. S. YAMASHITA : Nucl. Sci. Eng., vol. 54, 432 (1974).
8. S. YAMASHITA, et al. : Nucl. Technol., vol. 25, No 6 (1975).
9. 成瀬雄二, 他: JAERI-M 6272 (1975).
10. J. At. Energy Soc. Japan, Vol. 17, No 1 pp. 31~44 (1975).
11. 金川 昭, 他: 日本原子力学会誌, vol. 3, No 12, 918 (1961).
12. T. OKAMOTO, et al. : J. Nucl. Sci. & Technol., vol. 15, No 4 (1978).
13. H. MURATA, T. MINATO, Y. IWAMATSU, H. NISHIMURA, H. AKIYAMA and T. OKAMOTO "A Safeguards System for a Commercial Uranium Enrichment Facility" 6th International Symposium Vienna Austria, November 1986, IAEA.
14. J. Nucl. Sci. Technol., 13 [4], pp. 179~189 (1976).
15. Nucl. Sci. Eng., 50 [1], pp. 63~72 (1973).
16. FINIS S. PATTON, et al. : Enriched Uranium Processing, Pergamon Press Inc. (1963).

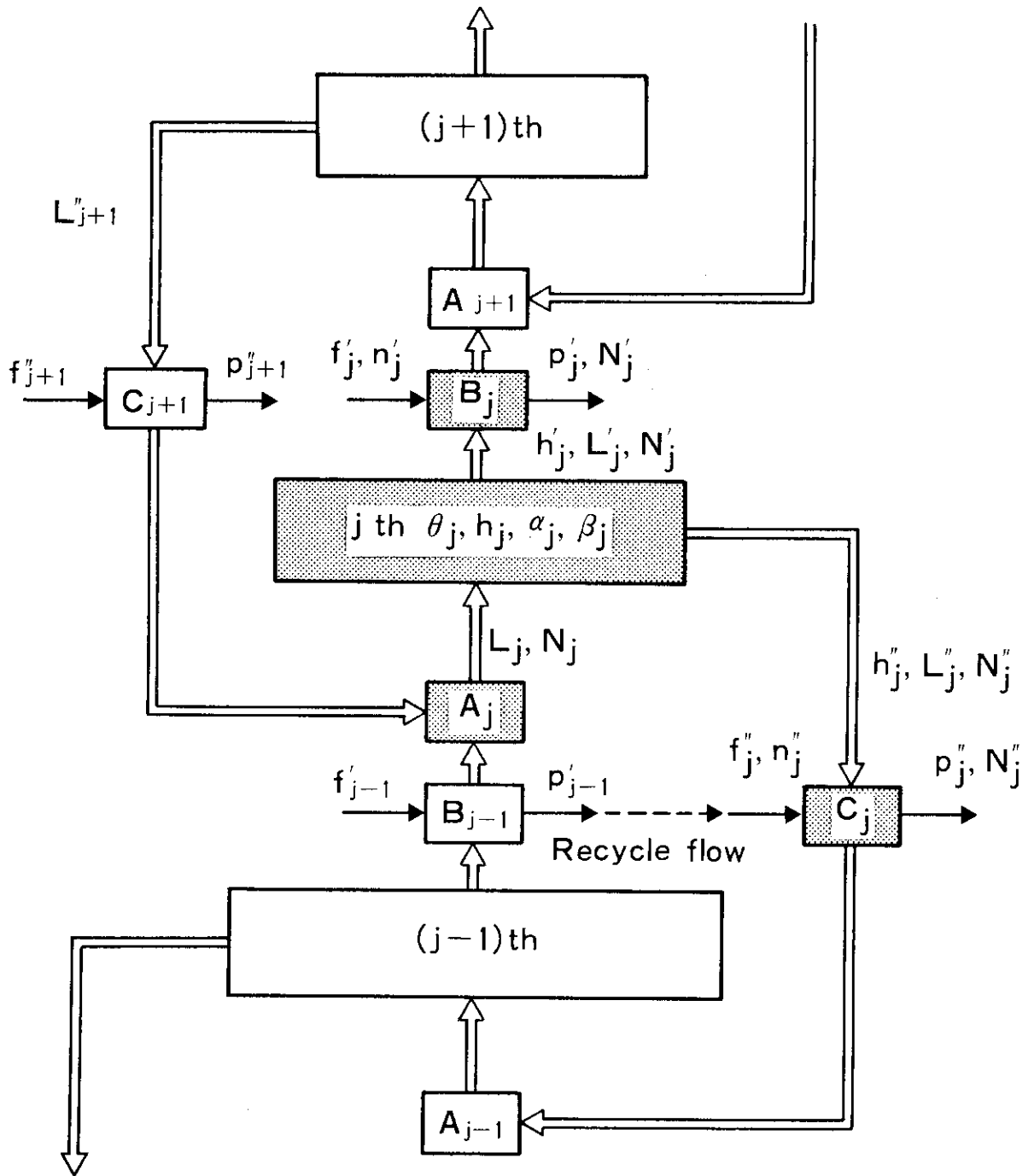


Fig. 1 Generalized flow diagram near by the  $j$ -th stage in a cascade

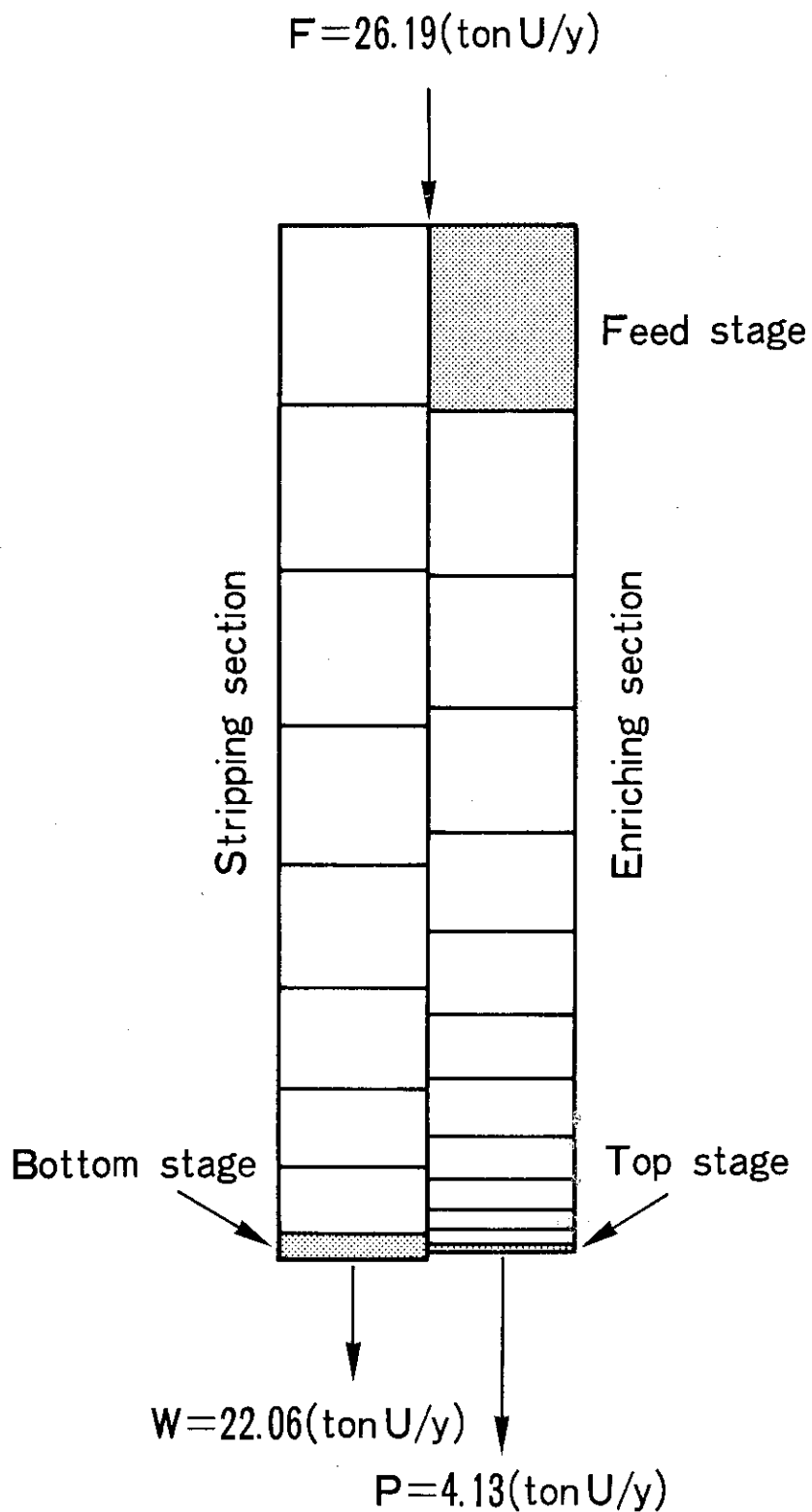


Fig. 2 Example of an unit cascade composed of model  $\text{UF}_6$  gas centrifuges

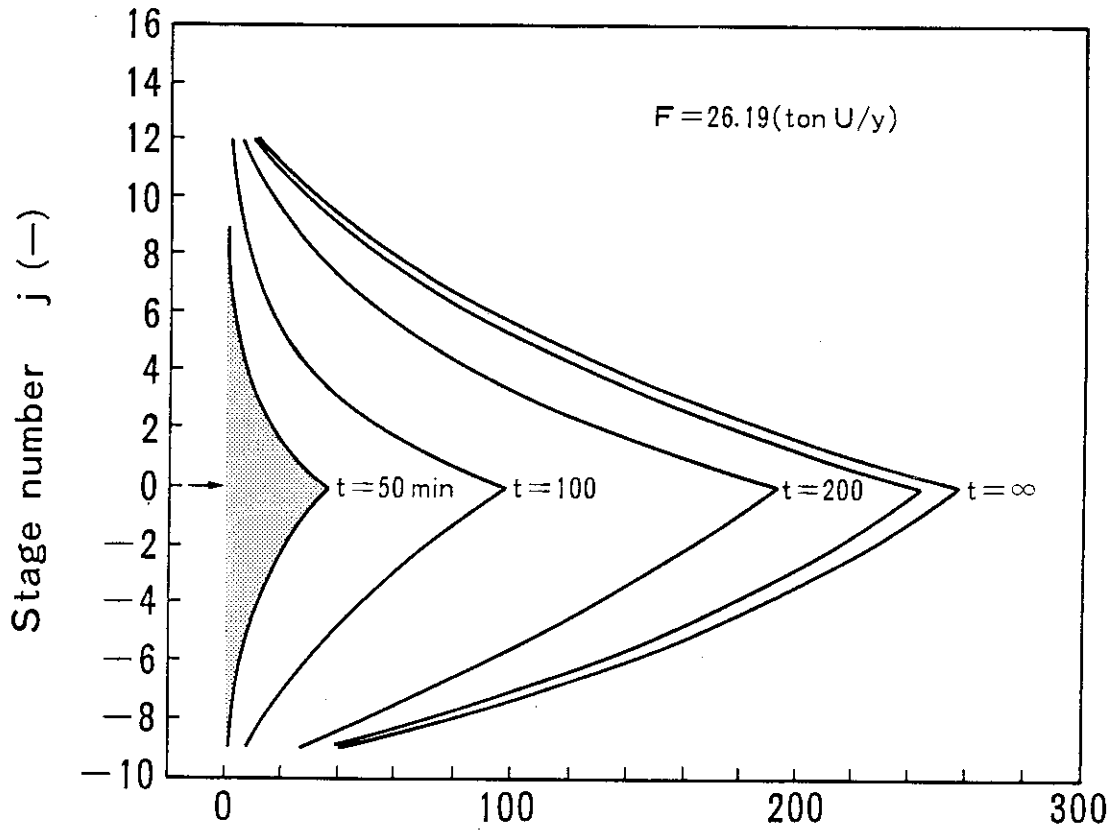


Fig. 3 Feed flow rate profile at each stage after material feeding.

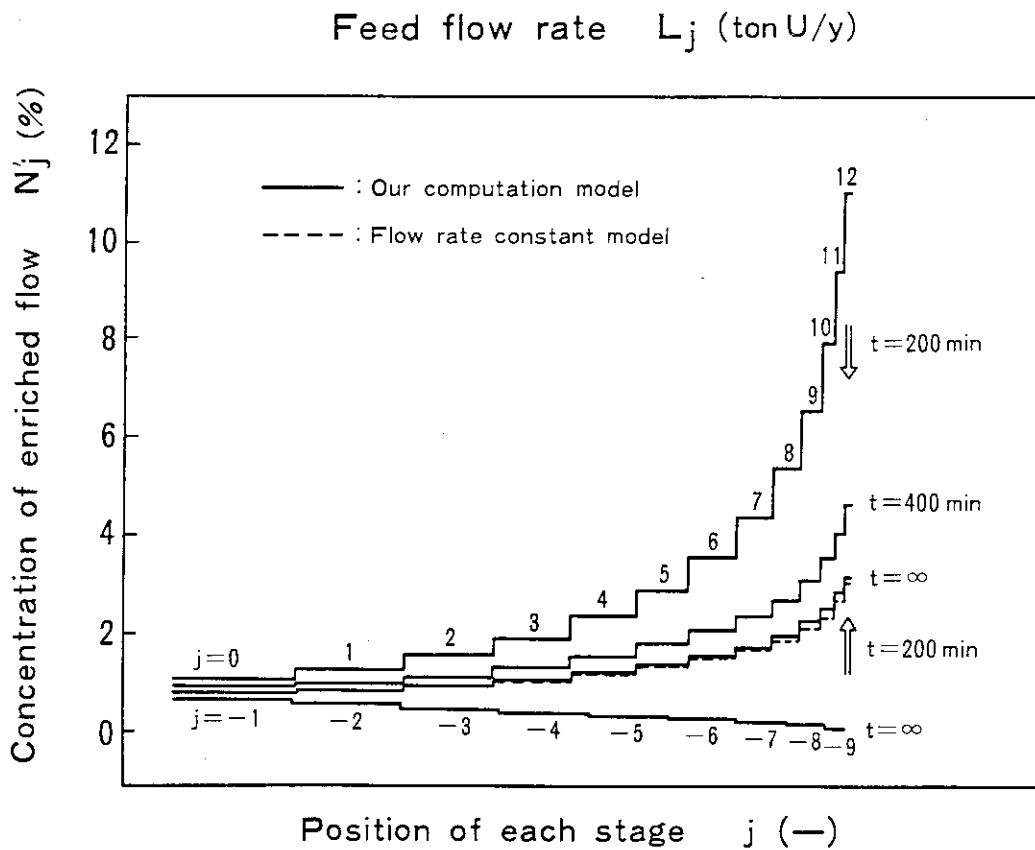


Fig. 4 Transitional profile of concentration gradient in a centrifuge cascade at start-up

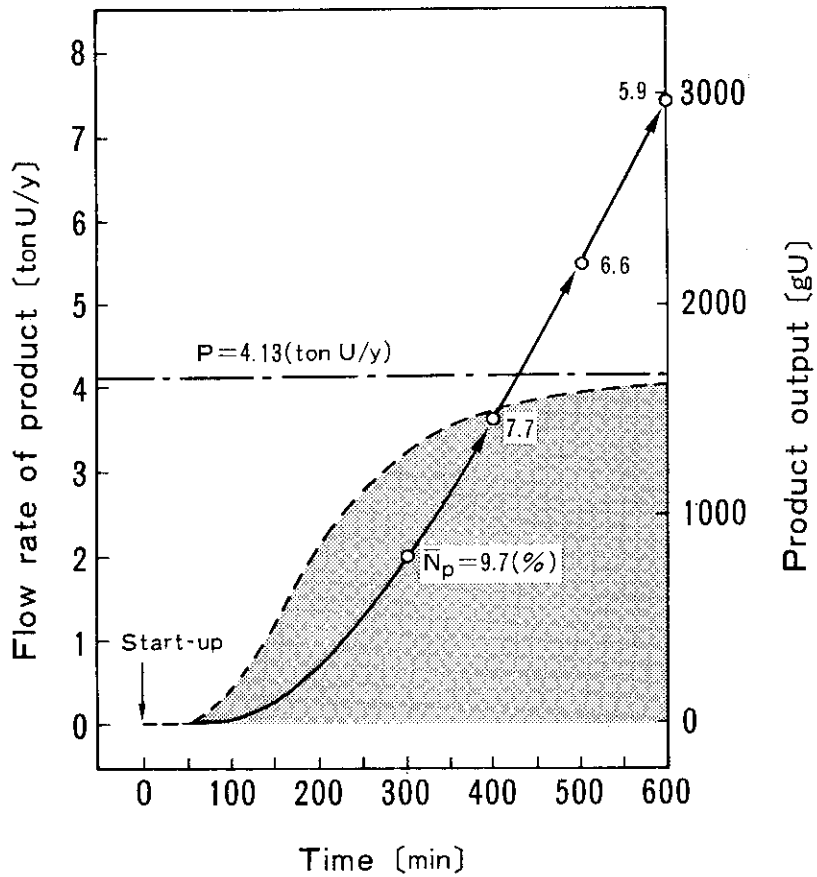


Fig. 5 Momentary change of average product enrichment and its product output

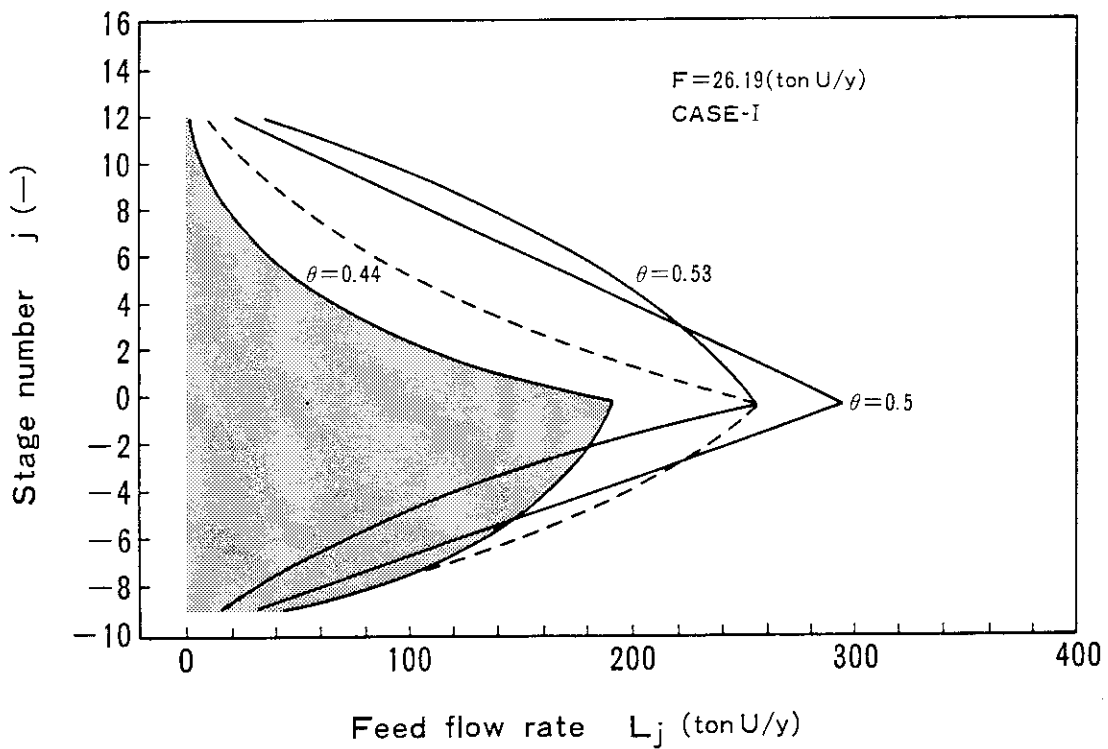


Fig. 6 Flow shape in an unit cascade resulting from cut regulation in all stages



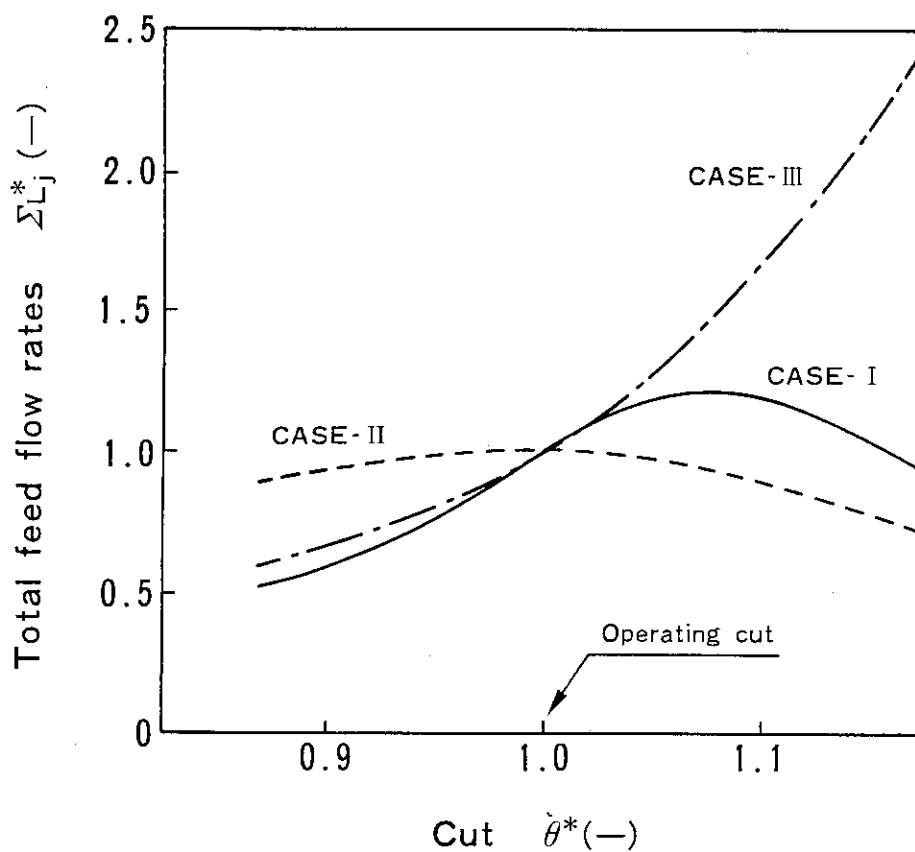


Fig. 7 Change of total feed flow rates vs. cut regulation

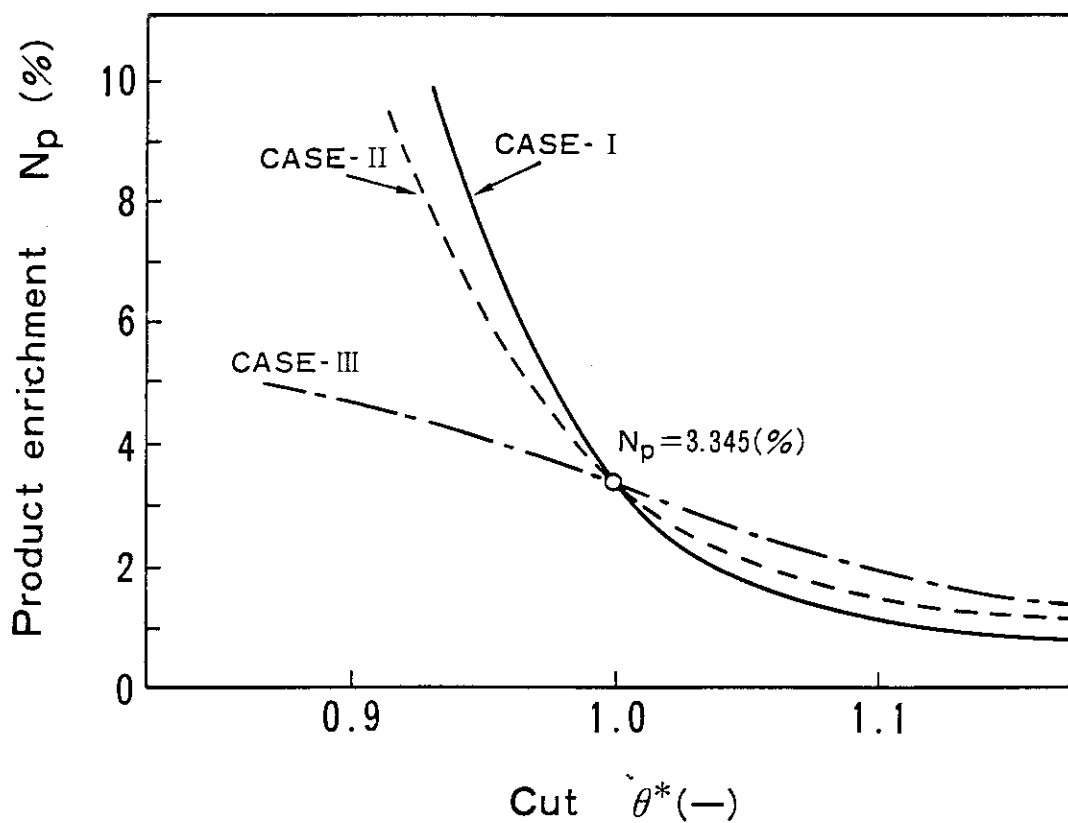


Fig. 8 Effect of cut regulation on product enrichment

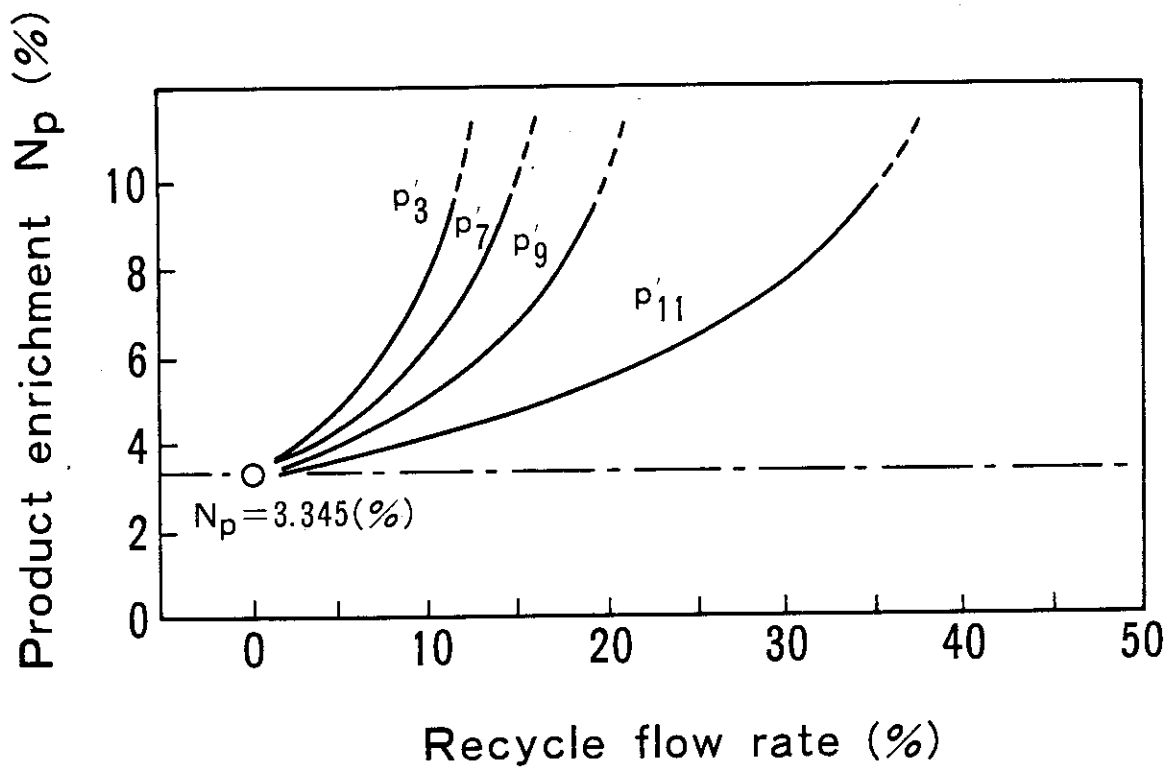


Fig. 9 Difference in enrichent characteristics among recycle stages in enriching section

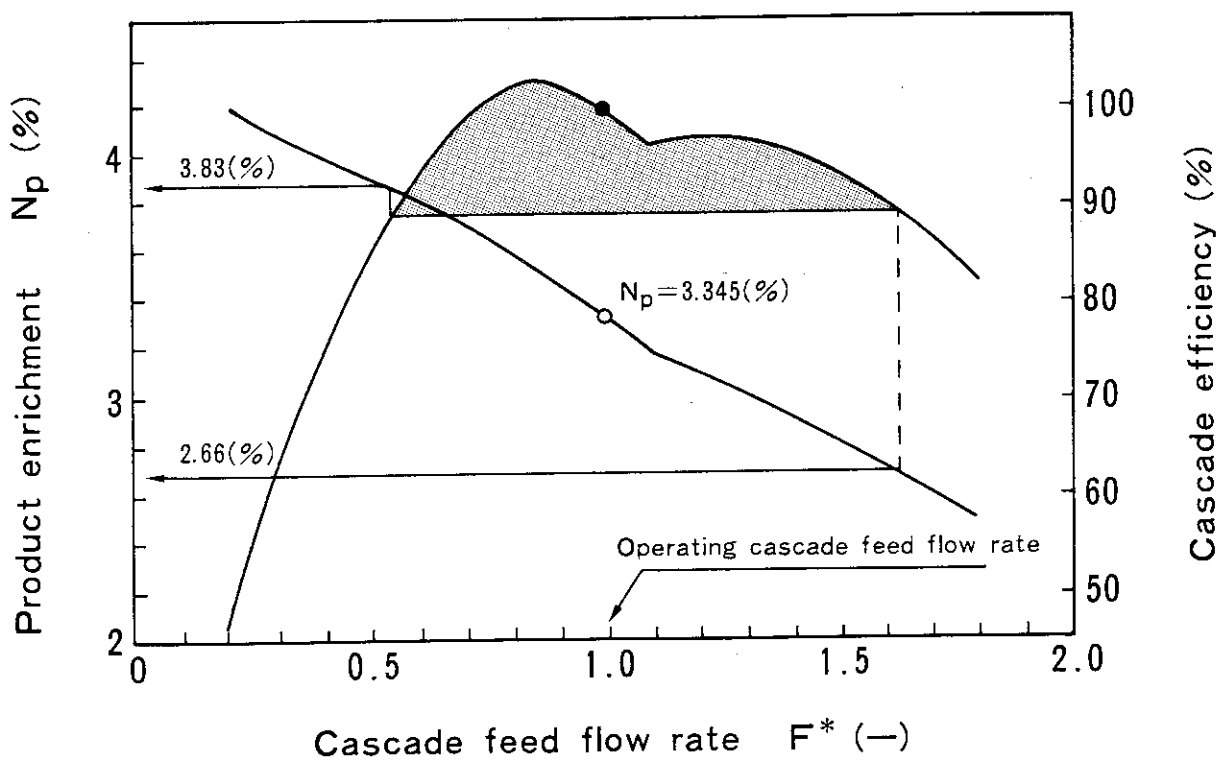
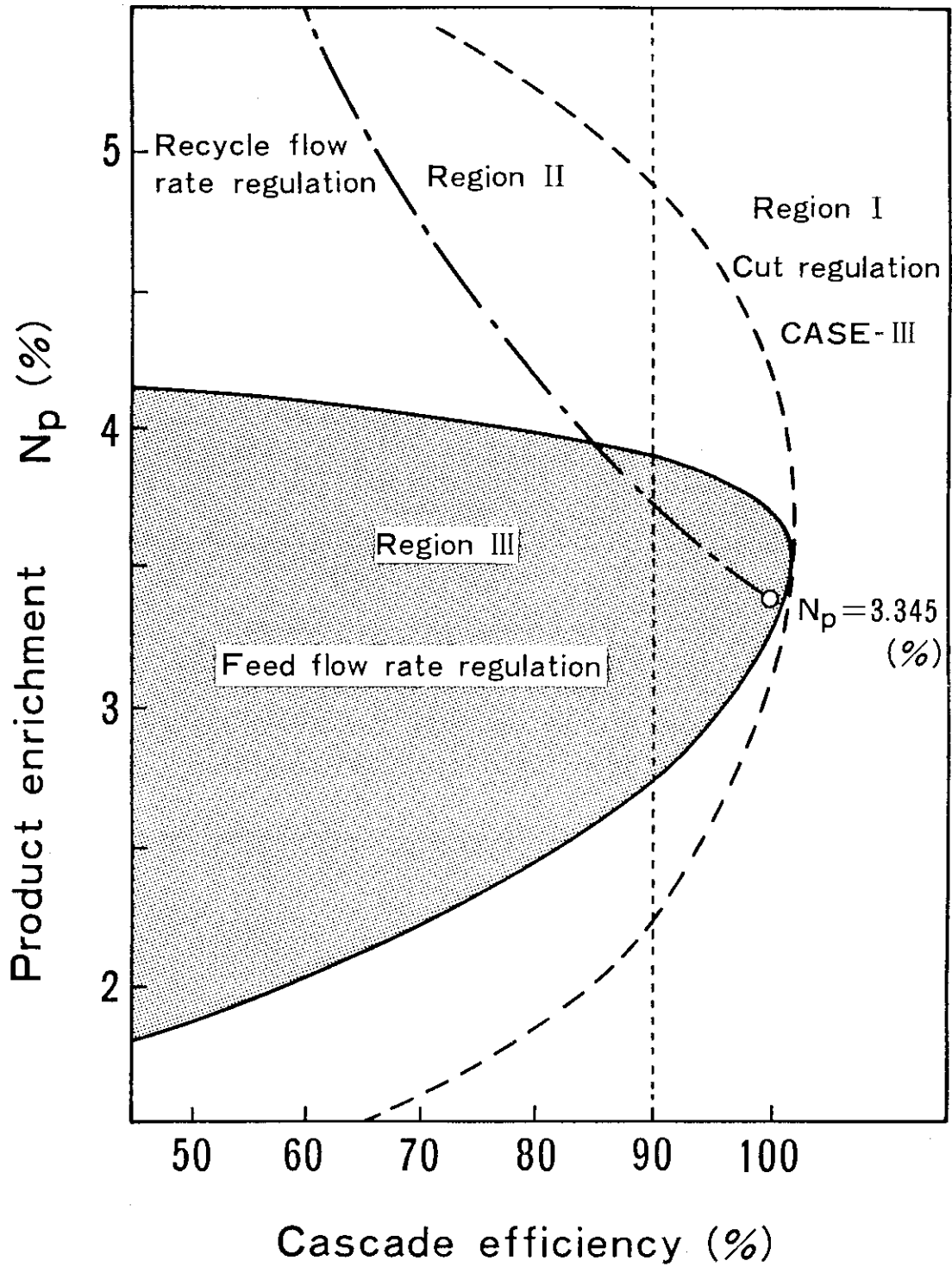


Fig. 10 Dependence of product enrichment on cascade feed flow rate



Region I : Cut regulation in stripping section for CASE-III

Region II : Recycle flow rate regulation at 11-th stage

Region III : Cascade feed flow rate regulation

Fig. 11 Relation between cascade efficiency and adjustable range of product enrichment

## 付録 濃縮流量に関する差分方程式

〔最上段・濃縮部〕

$$L'_S(t+\Delta t) \simeq L'_S(t) + \frac{1}{(h_S+h'_S)K_S} \left[ L'_{S-1}(t) - G_S(t) + f'_{S-1} - p'_{S-1} \right] \Delta t$$

(j=S) (A1)

$$L'_j(t+\Delta t) \simeq L'_j(t) + \frac{1}{(h_j+h'_j)K_j} \left[ \left\{ -L'_S(t) + L'_{j-1}(t) - G_j(t) \right. \right. \\ \left. \left. + L'_j(t) + \sum_{i=j-1}^{S-1} (f'_i - p'_i) + \sum_{i=j+1}^S (f''_i - p''_i) \right\} \Delta t \right. \\ \left. - \sum_{i=j+1}^S Q_i \left\{ L'_i(t+\Delta t) - L'_i(t) \right\} \right]$$

(A2)

[ j = 1, 2, \dots, (S-1) ]

〔原料供給段〕

$$L'_0(t+\Delta t) \simeq L'_0(t) + \frac{1}{(h_0+h'_0)K_0} \left[ \left\{ \sum_{\ell=1}^k F_\ell(t) - L'_S(t) + L'_{-1}(t) \right. \right. \\ \left. \left. - G_0(t) + L'_0(t) + \sum_{i=-1}^{S-1} (f'_i - p'_i) + \sum_{i=1}^S (f''_i - p''_i) \right\} \Delta t \right. \\ \left. - \sum_{i=1}^S Q_i \left\{ L'_i(t+\Delta t) - L'_i(t) \right\} \right]$$

(A3)

(j=0)

〔回収部・最底段〕

$$L'_{-1}(t+\Delta t) \simeq L'_{-1}(t) + \frac{1}{(h_{-1}+h'_{-1})K_{-1}} \left[ \left\{ \sum_{\ell=1}^k F_\ell(t) - L'_S(t) + L'_{-2}(t) \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
 & -G_{-1}(t) + L'_{-1}(t) + \left. \left\{ \sum_{i=-2}^{S-1} (f'_i - p'_i) + \sum_{i=0}^S (f''_i - p''_i) \right\} \Delta t \right. \\
 & \left. - \sum_{i=0}^S Q_i \left\{ L'_i(t + \Delta t) - L'_i(t) \right\} \right] \quad (A 4) \\
 & \qquad \qquad \qquad (j = -1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L'_j(t + \Delta t) \simeq & L'_j(t) + \frac{1}{(h_j + h'_j) K_j} \left[ \left\{ \sum_{\ell=1}^k F_{\ell}(t) - L'_S(t) + L'_{j-1}(t) - G_j(t) \right. \right. \\
 & \left. \left. + L'_j(t) + \sum_{i=j-1}^{S-1} (f'_i - p'_i) + \sum_{i=j+1}^S (f''_i - p''_i) \right\} \Delta t - \sum_{i=0}^S Q_i \times \right. \\
 & \left. \left\{ L'_i(t + \Delta t) - L'_i(t) \right\} - \sum_{i=j+1}^{-1} Q_i \left\{ L'_i(t + \Delta t) - L'_i(t) \right\} \right] \quad (A 5) \\
 & \qquad \qquad \qquad [ j = -2, -3, \dots, -(B-1) ]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L'_{-B}(t + \Delta t) \simeq & L'_{-B}(t) + \frac{1}{(h_{-B} + h'_{-B}) K_{-B}} \left[ \left\{ \sum_{\ell=1}^k F_{\ell}(t) - L'_S(t) - G_{-B}(t) \right. \right. \\
 & \left. \left. + L'_{-B}(t) + \sum_{i=-B}^{S-1} (f'_i - p'_i) + \sum_{i=-(B-1)}^S (f''_i - p''_i) \right\} \Delta t \right. \\
 & \left. - \sum_{i=0}^S Q_i \left\{ L'_i(t + \Delta t) - L'_i(t) \right\} - \sum_{i=-(B-1)}^{-1} Q_i \left\{ L'_i(t + \Delta t) \right. \right. \\
 & \left. \left. - L'_i(t) \right\} \right] \quad (A 6) \\
 & \qquad \qquad \qquad (j = -B)
 \end{aligned}$$

ただし、 $\Delta t$  は数値計算上の時間刻み幅である。