

JAERI-M

6455

圧縮機軸封部からのプロセスガスの漏れ出しを
考慮した場合のカスケード解析

(1) 理想カスケード, 準理想カスケード

1976年3月

成瀬 雄二・松田 祐二・丸山庸一郎・青地 哲男

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.

圧縮機軸封部からのプロセスガスの漏れ出しを
考慮した場合のカスケード解析

(1) 理想カスケード, 準理想カスケード

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・松田祐二・丸山庸一郎・青地哲男

(1976年2月10日受理)

ガス拡散法によるウラン濃縮プラントでは, 極めて高度の気密性が要求される。しかし, 現実のカスケードでは, 或る程度の漏洩は避けることはできない。

カスケードからプロセスガスが漏れ出すと, プラントの実質的な分離作業量は低下する。即ち, 所定の流量および濃度の製品を生産するためには, カスケード規模を漏れ出し量に応じて大きくしなければならない。

本報では, 各段から漏れ出しのある理想カスケードおよび準理想カスケードについて基礎方程式を誘導し, さらに, 漏れ出し量, 分離係数および製品濃度のカスケード静特性(所要段数, 循環流量, 廃棄材流量, 原料流量など)に及ぼす影響を検討した。

Static Characteristics of the Gaseous Diffusion Cascade
with Process Gas Loss from Compressor Shaft Seal

(1) Ideal and Quasi-ideal Cascades

Yuji NARUSE, Yuji MATSUDA, Yoichiro MARUYAMA and Tetsuo AOCHI

Uranium Enrichment Laboratory, Tokai, JAERI

(Received February 10, 1976)

In the gaseous diffusion plant for uranium enrichment, high degree of gas-tightness is required. However, small loss of the process gas is unavoidable.

With increase of loss, the yield decreases in the given cascade. The cascade with a loss must be larger in scale to produce the equivalent quantity.

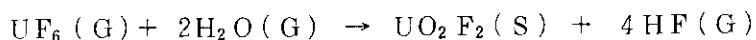
The basic equations are derived for analyzing static characteristics of both the ideal and the quasi-ideal cascades with losses. Effects of the separation factor and product concentration on the static characteristics are also described.

目 次

1.	はじめに	1
2.	圧縮機軸封部からの漏れ出し量の推定	2
3.	理想カスケード	6
3.1	濃縮部	6
3.2	回収部	10
4.	準理想カスケード	13
4.1	簡略法	13
4.2	逐次段法	15
5.	計算結果	21
5.1	計算条件	21
5.2	理想カスケードと準理想カスケードの比較	22
5.3	漏れ出し量のカスケード静特性に及ぼす影響	25
5.3.1	計算式の比較	25
5.3.2	所要段数への影響	28
5.3.3	全循環流量への影響	28
5.3.4	廃棄材流量への流量	29
5.3.5	原料流量への影響	30
6.	おわりに	53
	参考文献	53

1. はじめに

ガス拡散プラントでは、一般の化学工業に比べて、極めて高度の気密性が要求される。その理由の1つは、プロセスガスとして使用する六フッ化ウラン (UF_6) の化学的性質に起因している。 UF_6 は、反応性の強い物質であり、特に水分とは下記の如く激しく反応して、フッ化ウラニルとフッ化水素を生成する。



これらの生成物は、隔膜の目詰り、装置の腐食など各種トラブルの原因となる。

一方、ガス拡散法で達成できる分離係数には限度があり、かつ値そのものが非常に小さいので、Present - de Bethune の効果を考慮して、圧力条件を大気圧以下に設定するのが普通である。

以上のことから、ガス拡散プラントにおいては、装置内への空気（空気中の水分）の漏れ込みを極力防止しなければならない。

ガス拡散プラントにおける気密保持で技術的に問題となるのは、回転部を有する圧縮機である。圧縮機の軸封機構としては、装置内の UF_6 と外気（空気）とを遮断するために不活性ガスをバリアガス（シールガス）に用いるガスシールの方法が1つの有力な候補として上げられる。この場合、バリアガスの排出圧力をプロセスガス圧力より低くすると、無視できない量のプロセスガス (UF_6) がバリアガス中に同伴される。これは、プラントの分離能力（分離作業量）の実質的な低下を意味する。たとえば、バリアガス中の UF_6 を分離、回収し、カスケードに再供給したとしても、これに伴う装置は小型で、簡単なものであることが望ましい。一方、バリアガスの排出圧力を高くすると、 UF_6 の漏れ出しは少なくなるが、カスケード内へのバリアガスの漏れ込みは多くなり、カスケード特性に悪影響を及ぼす。この場合には、バリアガス除去カスケード（通常“パージカスケード”と呼ばれる）が必要になる。

ここでは、圧縮機軸封部からの UF_6 の漏れ出しに着目し、漏れ出し量がカスケード所要段数、循環流量（所要動力）などにどの程度影響するかを検討の対象にした。

カスケード各段からのプロセスガスの漏れ出しを考慮した場合の解析には、Cohen⁽¹⁾、Apelblat⁽²⁾ の報告がある。しかし、前者は、理想カスケードの濃縮部のみを取扱っており、回収部については解析されていない。また、後者は、準理想カスケードの濃縮部について、分離係数を簡略化 ($\alpha = x'/x''$) し、これを濃度に関係なく一定値とした近似解析である。そこで、本報では、テーパ型カスケード（理想カスケードおよび準理想カスケード）の濃縮部および回収部について、より正確な基礎式を導出し、8,750 ton SWU/yr のガス拡散プラントを想定して、広範囲の検討を行った。

2. 圧縮機軸封部からの漏れ出し量の推定

ガス拡散プラントの気密性，特に圧縮機軸封部の気密保持の重要性については，1.で述べたところであり，当研究室においても以下の条件を満足すべく軸封機構の研究開発を進めている。

- 1) 漏洩量が少ないこと。
- 2) 構造および制御機構が簡単なこと。
- 3) 耐久性があり，長期間使用しても性能が低下しないこと。
- 4) 保守，交換が容易なこと。
- 5) 小型であり，消費動力の少ないこと。
- 6) バリアガスの消費量が少ないこと。
- 7) 安価であること。

軸封（シール）機構には，接触型－非接触型，軸周型－端面（軸直角面）型，ドライ型－ウェット型など種々の分類法があるが，当研究室では，ラビリンスシール，ストレートブッシュシール〔以上，遠心型圧縮機を主体とした小型UF₆循環ループ（通称“小蛇”）で使用〕；ドライコンタクトシール；フローティングシール；スパイラルグループシール〔①動圧型，②（静圧＋動圧）型の2種；軸封試験装置では①，②を使用し，軸流型圧縮機を主体とした大型UF₆循環ループ（通称“大蛇”）には①を採用した〕などを取上げ，試験を重ねてきた。このうち，スパイラルグループ型については，かなり良好な性能が得られているので，この結果をカスケードの解析に利用する。

図2-1は，スパイラルグループシールの構造を示したものである。この型のシールの漏洩量は，一般に次式で表わされる。

$$l = \frac{\pi h^3 (P_2^2 - P_3^2)}{12 \mu RT \ln r_3 / r_2} \cdot \frac{1}{\gamma} \quad \text{----- (2.1)}$$

但し， l ；漏れ出し量

γ ；比重量

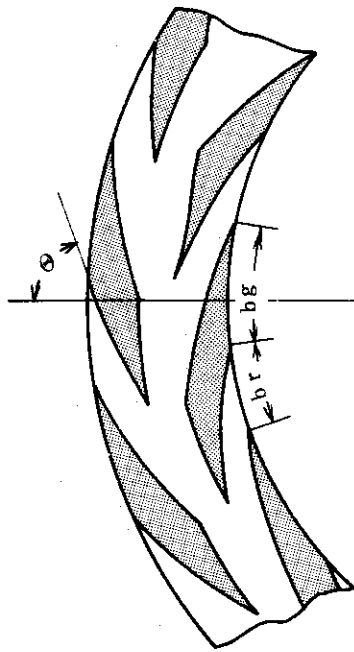
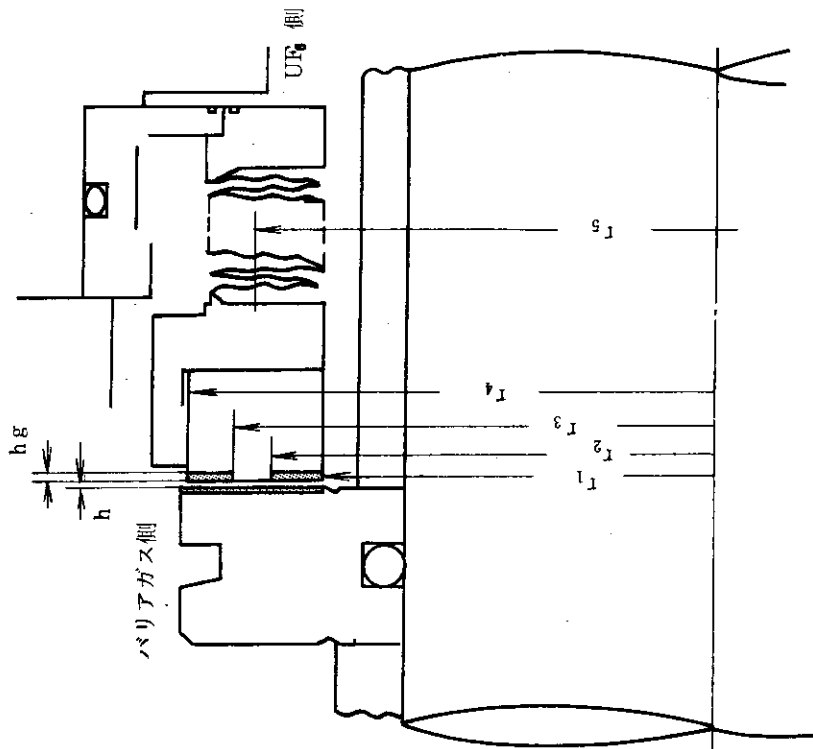
μ ；粘性係数

T ；温度

ここで，軸封部の温度，圧力条件およびシール隙間がカスケード全体を通じて（圧縮機容量が変化しても）一定に保たれるものとする，次のように簡略化できる。

$$l = \frac{K}{\ln r_3 / r_2} \quad \text{----- (2.2)}$$

また，本シールでは一般に $r_3 - r_2 = 5 \text{ mm}$ 程度であるので ($5/r_2 \ll 1$)，



記号

- r_1 ; シール面内半径
- r_2 ; 内側グルーブ外半径
- r_3 ; 外側グルーブ内半径
- r_4 ; シール面外半径
- r_5 ; ベローズ有効半径

- P_2 ; 半径 r_2 点の静圧
- P_3 ; 半径 r_3 点の静圧
- h ; シール隙間
- hg ; グループ深さ

図2-1-1 スパイラルグルーブシール(動圧発生型)の構造

$$\ell = \frac{K}{\ln\left(1 + \frac{5}{r_2}\right)} \cong \frac{k r_2}{5} \quad \text{-----} (23.)$$

即ち、軸封部漏れ出し量は、軸封径に比例することが分かる。

次に、軸流圧縮機の吐出流量と軸封径との関係は、ローター（主軸）材質がSUS-304、圧縮比が7～8程度の場合には、図2-2のようになる⁽³⁾。ここでは、一般的な軸封径を採用し、これを点線で示したような2本の直線で近似すると、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} L \geq 300 \text{ Nm}^3/\text{min} \text{ のとき} \\ r_2 = 0.17L + 88 \\ L \leq 300 \text{ Nm}^3/\text{min} \text{ のとき} \\ r_2 = 0.29L + 50 \end{aligned} \right\} \text{-----} (24.)$$

但し、 r_2 ; 軸封半径 (mm)
 L ; 吐出流量 (Nm³/min)

以上の検討結果を要約すると、圧縮機の吐出流量と軸封部漏れ出しの量の関係は、一般に次式で代表される。

$$\ell = aL + b \quad (a, b ; \text{定数}) \quad (25.)$$

ここで、ORO-685⁽⁴⁾に示された8,750 ton-SWU/yrのプラントにおいて第1ステップ（最上部）の圧縮機（吐出流量は250mol/sec程度と推定される）の漏れ出し量を1Ncc/secと仮定する。この値は、当研究室で実施している軸封試験結果に基づけば、さして困難なものではない。

この場合には、(25)式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} L \geq 223 \text{ mol/sec (300 Nm}^3/\text{min) のとき} \\ \ell = 1.06 \times 10^{-3} L + 0.735 \\ L \leq 223 \text{ mol/sec (300 Nm}^3/\text{min) のとき} \\ \ell = 2.08 \times 10^{-3} L + 0.480 \end{aligned} \right\} \text{-----} (26.)$$

但し、 L ; 吐出流量 (mol/sec)
 ℓ ; 漏れ出し量 (Ncc/sec)

次章からの基礎式の導出および実用プラントのケーススタディにおいては、カスケード形式をテーパ型に限定したため、(25)式をそのまま用いることはできず、次のような簡単な場合を検討対象にした。

$$\ell = aL \quad \text{-----} (27.)$$

ここで、 a を漏れ出し定数と定義する。

図2-3は、漏れ出し定数 a 、圧縮機吐出流量 L と軸封部からの漏れ出し量 ℓ との関係を示したものであり、以下の解析に使用している。

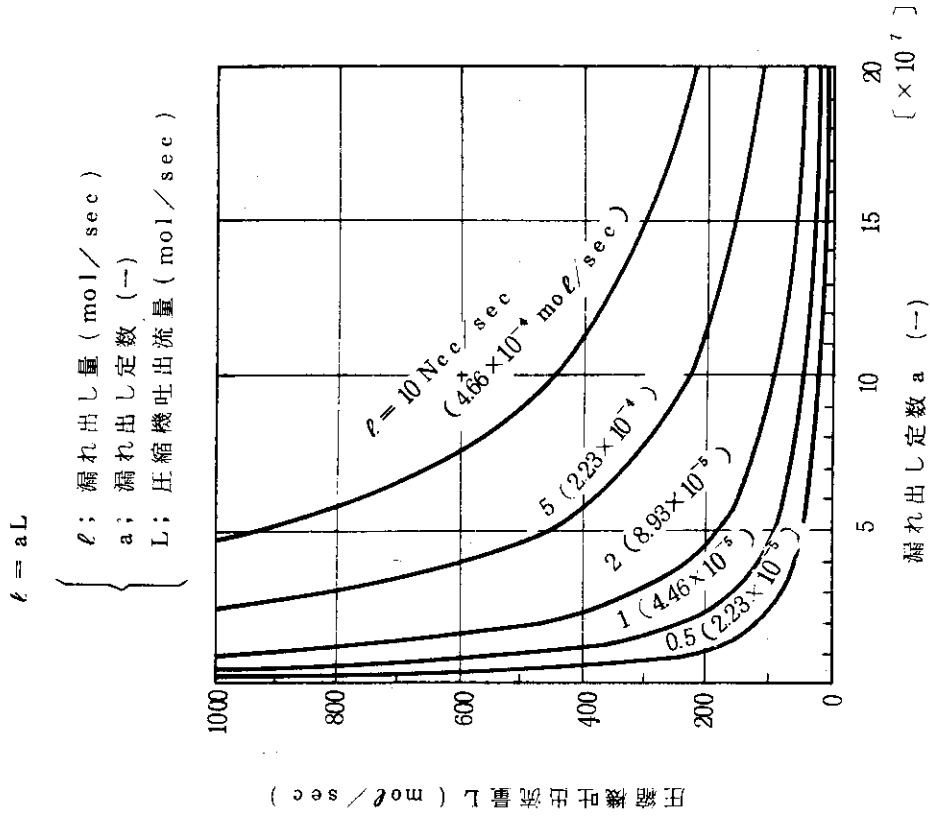


図 2-3 軸封部からの漏れ出し量

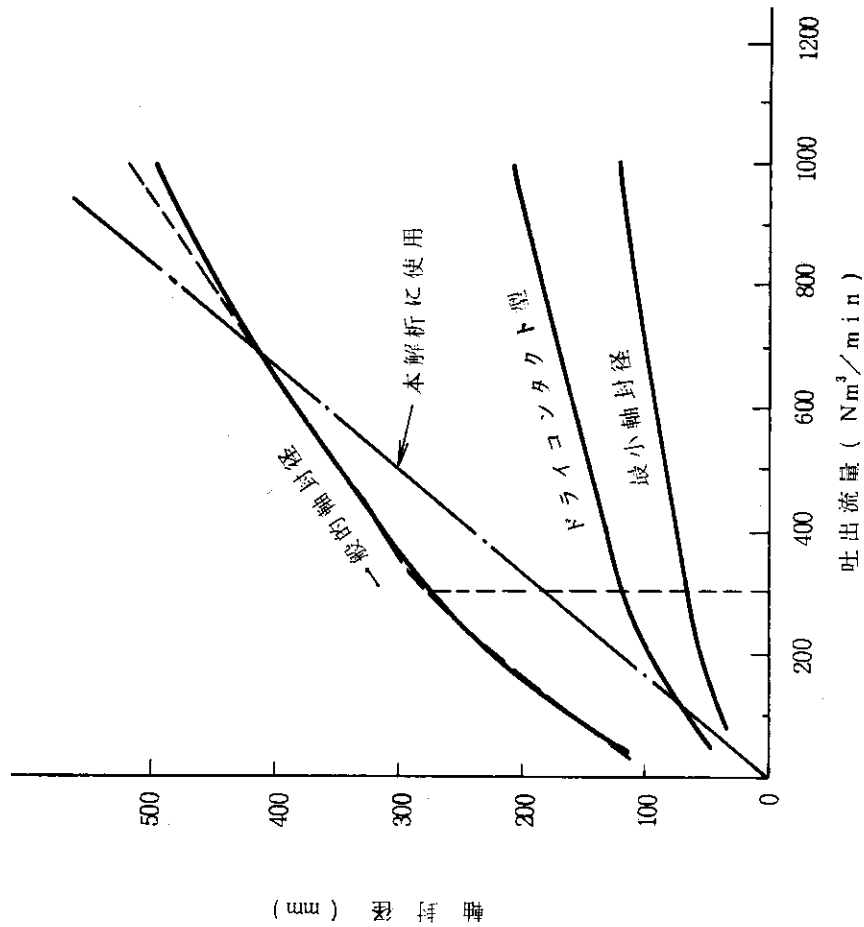


図 2-2 軸流圧縮機の軸封径
 (SUS-304, 圧縮比 7~8 の場合)
 (AL 合金の場合も、ほぼ同程度)

3. 理想カスケード

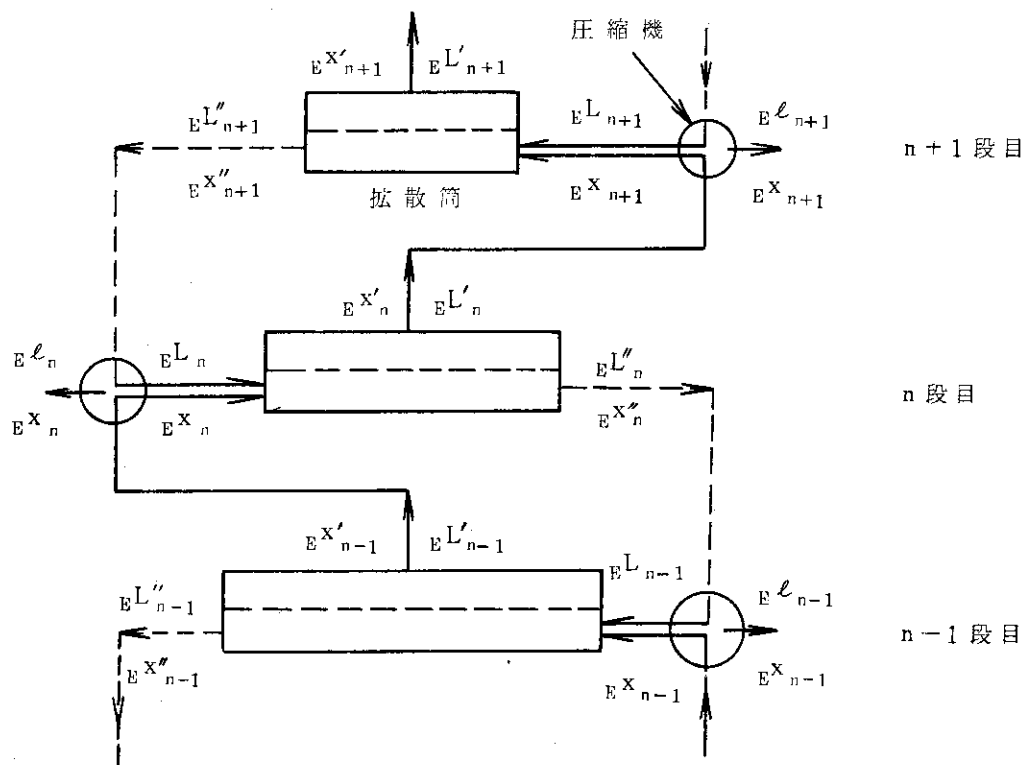
3.1 濃縮部

理想カスケードの濃縮部各段からプロセスガスが漏れ出す場合のカスケード特性についてはCohen⁽¹⁾により以下に示すような検討がなされている。

図3-1は、圧縮機軸封部からプロセスガス(UF₆)が漏れ出した場合の理想カスケードの概念を示したものである。理想カスケードでは、たとえ軸封部から漏れ出しがあっても、非混合の条件

$$x''_{n+1} = x_n = x'_{n-1} \quad \text{----- (3.1)}$$

は満足されるので、カスケードの所要段数および濃度分布には変化はない。ここでは、製品量に着目し、軸封部からの漏れ出しの有無に関係なく、同一濃度、同一流量で製品を取出すプラントを想定し、漏れ出し量のカスケード特性に及ぼす影響を検討する。



- L, x ; 供給流の流量および濃度
- L', x' ; 濃縮流の流量および濃度
- L'', x'' ; 減損流の流量および濃度
- l ; 圧縮機軸封部からの漏れ出し量

図3-1 圧縮機軸封部からの漏れ出しを考慮した場合のカスケード構成図 (理想カスケード、濃縮部)

まず、濃縮部の n 段目について、目的同位体の物質収支をとると、

$${}_E L'_n \cdot {}_E X'_n + {}_E L''_n \cdot {}_E X''_n = {}_E L''_{n+1} \cdot {}_E X''_{n+1} + {}_E L'_{n-1} \cdot {}_E X'_{n-1} - {}_E \ell_n \cdot {}_E X_n \quad (3.2)$$

理想カスケードでは各段で圧縮機容量が異なるので、軸封部漏れ出し量もそれに対応して変化すると考えられる。ここでは、漏れ出し量と循環流量との関係が、次式で表わされるものとした(前章参照)。

$${}_E \ell_n = a \cdot {}_E L_n \quad (3.3)$$

ただし、 L ; 供給流量

L' ; 上昇流量(濃縮流)

L'' ; 下降流量(減損流)

ℓ ; 軸封部漏れ出し量

a ; 漏れ出し定数

添字 E : 濃縮部

“ S : 回収部

“ n : 段数

段分離係数 α 、頭分離係数 β の定義から、

$$\frac{{}_E L'_n \cdot {}_E X'_n}{{}_E L'_n (1 - {}_E X'_n)} = \alpha \cdot \frac{{}_E L''_n \cdot {}_E X''_n}{{}_E L''_n (1 - {}_E X''_n)} \quad (3.4)$$

$$\frac{{}_E L'_n \cdot {}_E X'_n}{{}_E L'_n (1 - {}_E X'_n)} = \beta \cdot \frac{{}_E L'_n \cdot {}_E X'_n + {}_E L''_n \cdot {}_E X''_n}{{}_E L'_n (1 - {}_E X'_n) + {}_E L''_n (1 - {}_E X''_n)} \quad (3.5)$$

また、理想カスケードでは、

$$\alpha = \beta^2 \quad (3.6)$$

(3.4)~(3.6)式より、

$${}_E L'_n \cdot {}_E X'_n = \beta \cdot {}_E L''_n \cdot {}_E X''_n \quad (3.7)$$

つぎに、(3.3)式の軸封部漏れ出し量を目的同位体について表わすと、

$${}_E \ell_n \cdot {}_E X_n = a ({}_E L'_n \cdot {}_E X'_n + {}_E L''_n \cdot {}_E X''_n) \quad (3.8)$$

(3.2), (3.7), (3.8)式より、

$${}_E L'_{n+1} \cdot {}_E X'_{n+1} - (1+a)(1+\beta) {}_E L'_n \cdot {}_E X'_n + \beta \cdot {}_E L'_{n-1} \cdot {}_E X'_{n-1} = 0 \quad (3.9)$$

ここで、 ${}_E L'_n \cdot {}_E X'_n = {}_E M'_n$ とおくと、上式は

$${}_E M'_{n+1} - (1+a)(1+\beta) \cdot {}_E M'_n + \beta \cdot {}_E M'_{n-1} = 0 \quad (3.9)'$$

これは、線型の差分方程式であり、境界条件として

$$\left. \begin{aligned} n = N_p \text{ のとき, } {}_E M'_{N_p} &= {}_E L'_{N_p} \cdot {}_E X'_{N_p} = P \cdot x_p \\ n = N_p + 1 \text{ のとき, } {}_E M'_{N_p+1} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{----- (3.10)}$$

を与えると、次式が得られる。

$${}_E M'_n = {}_E L'_n \cdot {}_E X'_n = P \cdot x_p \left(\frac{r_1^{n-N_p}}{1 - \frac{r_1}{r_2}} + \frac{r_2^{n-N_p}}{1 - \frac{r_2}{r_1}} \right) \text{----- (3.11)}$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{1}{2} \left\{ (1+a)(1+\beta) + \sqrt{(\beta-1)^2 + a(2+a)(1+\beta)^2} \right\} \\ r_2 &= \frac{1}{2} \left\{ (1+a)(1+\beta) - \sqrt{(\beta-1)^2 + a(2+a)(1+\beta)^2} \right\} \end{aligned} \right\} \text{----- (3.12)}$$

同様にして、他の同位体について解くと、

$$\begin{aligned} {}_E m'_n &= {}_E L'_n \cdot (1 - {}_E X'_n) \\ &= P(1 - x_p) \left(\frac{s_1^{n-N_p}}{1 - \frac{s_1}{s_2}} + \frac{s_2^{n-N_p}}{1 - \frac{s_2}{s_1}} \right) \text{----- (3.13)} \end{aligned}$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= \frac{1}{2\beta} \left\{ (1+a)(1+\beta) + \sqrt{(\beta-1)^2 + a(2+a)(1+\beta)^2} \right\} = \frac{r_1}{\beta} \\ s_2 &= \frac{1}{2\beta} \left\{ (1+a)(1+\beta) - \sqrt{(\beta-1)^2 + a(2+a)(1+\beta)^2} \right\} = \frac{r_2}{\beta} \end{aligned} \right\} \text{ (3.14)}$$

従って、n 段目の上昇流量は、

$$\begin{aligned} {}_E L'_n &= {}_E M'_n + {}_E m'_n \\ &= P \left\{ x_p \left(\frac{r_1^{n-N_p}}{1 - \frac{r_1}{r_2}} + \frac{r_2^{n-N_p}}{1 - \frac{r_2}{r_1}} \right) + (1 - x_p) \left(\frac{s_1^{n-N_p}}{1 - \frac{s_1}{s_2}} + \frac{s_2^{n-N_p}}{1 - \frac{s_2}{s_1}} \right) \right\} \text{--- (3.15)} \end{aligned}$$

また、n 段目の供給流量は、

$$\begin{aligned} {}_E L_n &= {}_E M'_n + {}_E m'_n + {}_E M''_n + {}_E m''_n \\ &= {}_E M'_n \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) + {}_E m'_n (1 + \beta) \end{aligned}$$

$$= \frac{2 P x_p (1+\beta)(1+\Delta)}{\{\beta(1+\Delta)^2-1\} \cdot E x_n} \cdot \beta^{\frac{n-N_p-1}{2}} \cdot \sinh [(N_p+1-n) \cdot \sqrt{\beta} \cdot \ell_n(1+\Delta)] \quad \text{----- (3.16)}$$

ただし,

$$\Delta = \frac{r_1}{\beta} - 1 = s_1 - 1 \quad \text{----- (3.17)}$$

そこで、濃縮部における循環流量の総和を求めると、

$$\begin{aligned} J_p &= \sum_{n=1}^{N_p} E L_n \\ &= \frac{P x_p (1+\beta)}{\beta(1+\Delta)^2-1} \left[\frac{(1+\Delta)^{N_p}-1}{\Delta} \left\{ (1+\Delta)^2 - \frac{1-x_p}{x_p(1+\Delta)^{N_p-1}} \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1-\beta^{-N_p}(1+\Delta)^{-N_p}}{\beta(1+\Delta)-1} \left\{ \frac{(1+\Delta)^{N_p+2} \beta(1-x_p)}{x_F} - 1 \right\} \right] \quad \text{----- (3.18)} \end{aligned}$$

一方、漏れ出しのない場合の流量は、

$$E L'_n = P \left[1 + \frac{1}{\beta-1} \left\{ x_p (1-\beta^{n-N_p}) + (1-x_p) \beta (\beta^{N_p-n}-1) \right\} \right] \quad \text{----- (3.19)}$$

$$E L_n = E L'_n + E L''_n$$

$$= P \left[1 + \frac{1}{\beta-1} \left\{ x_p \left\{ 2-\beta^{n-N_p-1}(1+\beta) \right\} + (1-x_p) \beta \left\{ \beta^{N_p-n}(1+\beta)-2 \right\} \right\} \right] \quad \text{----- (3.20)}$$

$$\begin{aligned} J_p &= \frac{P}{\beta-1} \cdot \left[(1+\beta)(2x_p-1) \frac{\ell_n \frac{x_p(1-x_F)}{x_F(1-x_p)}}{\ell_n \beta} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(x_p-x_F) \{ \beta^2(1-x_F) + \beta(1-2x_F) - x_F \}}{(\beta-1)x_F(1-x_F)} \right] \quad \text{----- (3.21)} \end{aligned}$$

で与えられるので、両者を比較することにより、漏れ出し量のカスケード特性への影響を知ることができる。

3.2 回収部

前述したように、本章の目的は同一製品量を得る場合、漏れ出し量の有無がカスケード特性にどの程度影響するかを把握することにある。即ち、原料および廃棄材の流量は、当然漏れ出しのない場合と異なるので、これを F' , W' で表わすことにする。また、段の数え方も、濃縮部とは逆方向（廃棄材抜き出し段に向かって増加する）にとる。

まず、濃縮部と同様に、回収部の n 段目について、目的同位体の物質収支をとると、

$$sL'_n \cdot sX'_n + sL''_n \cdot sX''_n = sL'_{n+1} \cdot sX'_{n+1} + sL''_{n-1} \cdot sX''_{n-1} - s\ell_n \cdot sX_n \quad (3.22)$$

これを变形すると、

$$\beta \cdot sM''_{n+1} - (1+a)(1+\beta) \cdot sM''_n + sM''_{n-1} = 0 \quad (3.23)$$

境界条件として、

$$\left. \begin{aligned} n=N_W \text{ のとき, } sM''_{N_W} &= sL''_{N_W} \cdot sX''_{N_W} = W' \cdot x_W \\ n=N_W+1 \text{ のとき, } sM''_{N_W+1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

を与えると、(3.23) 式の解として次式が得られる。

$$sM''_n = sL''_n \cdot sX''_n = W' x_W \left(\frac{s_1^{n-N_W}}{1-\frac{s_1}{s_2}} + \frac{s_2^{n-N_W}}{1-\frac{s_2}{s_1}} \right) \quad (3.25)$$

ただし、 s_1, s_2 は、(3.14) 式で与えられる値である。

他の同位体についても、同様にして、

$$\begin{aligned} sm''_n &= sL''_n \cdot (1-sX''_n) \\ &= W'(1-x_W) \left(\frac{r_1^{n-N_W}}{1-\frac{r_1}{r_2}} + \frac{r_2^{n-N_W}}{1-\frac{r_2}{r_1}} \right) \end{aligned} \quad (3.26)$$

ただし、 r_1, r_2 は (3.12) 式で与えられる値である。

従って、 n 段目の下降流量は

$$\begin{aligned} sL''_n &= sM''_n + sm''_n \\ &= W' \left\{ x_W \left(\frac{s_1^{n-N_W}}{1-\frac{s_1}{s_2}} + \frac{s_2^{n-N_W}}{1-\frac{s_2}{s_1}} \right) + (1-x_W) \left(\frac{r_1^{n-N_W}}{1-\frac{r_1}{r_2}} + \frac{r_2^{n-N_W}}{1-\frac{r_2}{r_1}} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3.27)$$

また、n 段目の供給流量は、

$$\begin{aligned}
 {}_sL_n &= {}_sM''_n + {}_sm''_n + {}_sM'_n + {}_sm'_n \\
 &= {}_sM''_n (1+\beta) + {}_sm''_n (1+\frac{1}{\beta}) \\
 &= \frac{2W'x_W(1+\beta)(1+\Delta)}{\{\beta(1+\Delta)^2-1\} \cdot {}_sx_n} \cdot \beta^{\frac{N_W-n+1}{2}} \cdot \sinh [(N_W+1-n) \cdot \sqrt{\beta} \cdot \ell_n(1+\Delta)]
 \end{aligned}
 \tag{3.28}$$

そこで、回収部における循環流量の総和を求めると、

$$\begin{aligned}
 J_W &= \sum_{n=1}^{N_W} {}_sL_n \\
 &= \frac{W'x_W(1+\beta)(1+\Delta)}{\beta(1+\Delta)^2-1} \cdot \left[\frac{(1+\Delta)^{-N_W}-1}{\Delta} \cdot \left\{ 1 - \frac{\beta^{N_W}(1-x_F)(1+\Delta)^{N_W+1}}{x_F} \right\} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\beta^{N_W}(1+\Delta)^{N_W-1}}{\beta(1+\Delta)-1} \cdot \left\{ \beta(1+\Delta) - \frac{1-x_F}{x_F(1+\Delta)^{N_W}} \right\} \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.29}$$

一方、漏れ出しのない場合の循環流量は、

$${}_sL'_n = \frac{W}{\beta-1} \left\{ x_W\beta(\beta^{N_W-n}-1) + (1-x_W)(1-\beta^{n-N_W}) \right\}
 \tag{3.30}$$

$$\begin{aligned}
 {}_sL''_n &= W + {}_sL'_{n+1} \\
 &= W \left[1 + \frac{1}{\beta-1} \left\{ x_W\beta(\beta^{N_W-n-1}-1) + (1-x_W)(1-\beta^{n+1-N_W}) \right\} \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.31}$$

$$\begin{aligned}
 {}_sL_n &= {}_sL'_n + {}_sL''_n \\
 &= W \left[\left[1 + \frac{1}{\beta-1} \left\{ x_B\beta \left\{ \beta^{N_W-n-1}(1+\beta)-2 \right\} + (1-x_W) \left\{ 2-\beta^{n-N_W}(1+\beta) \right\} \right\} \right] \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.32}$$

$$\begin{aligned}
 J_W &= \frac{W}{\beta-1} \left[(1+\beta)(2x_W-1) \frac{\ell_n \frac{x_F(1-x_W)}{x_W(1-x_F)}}{\ell_n \beta} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{(x_F-x_W) \{ \beta^2(1-x_F) + \beta(1-2x_F) - x_F \}}{(\beta-1)x_F(1-x_F)} \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.33}$$

で与えられ、両者の比較が可能となる。

なお、上記の解析を行うには、廃棄材流量 W' を知る必要がある。これは、回収部1段目の圧縮機について、着目同位体の物質収支をとることにより求めることができる。即ち、図3-2より、

$$sM_1 = eM''_1 + sM'_2 - a(eM''_1 + sM'_2) \quad \text{----- (3.34)}$$

上式を(3.7)式を用いて変形し、 W' について解くと次式が得られる。

$$W' = \frac{P \times p \left(\frac{r_1^{1-N_p}}{1-r_1} + \frac{r_2^{1-N_p}}{1-r_2} \right)}{\beta \times w \left[(1+a)(1+\beta) \left(\frac{s_1^{1-N_w}}{1-s_1} + \frac{s_2^{1-N_w}}{1-s_2} \right) - \beta \left(\frac{s_1^{2-N_w}}{1-s_1} + \frac{s_2^{2-N_w}}{1-s_2} \right) \right]} \quad \text{----- (3.35)}$$

また、原料 F' は、カスケード全体の物質収支から、

$$F' = P + W' + a(J_p + J_w) \quad \text{----- (3.36)}$$

となる。

以上の計算手順により、理想カスケードの各段からプロセスガスが漏れ出した場合のカスケード特性が把握できる。

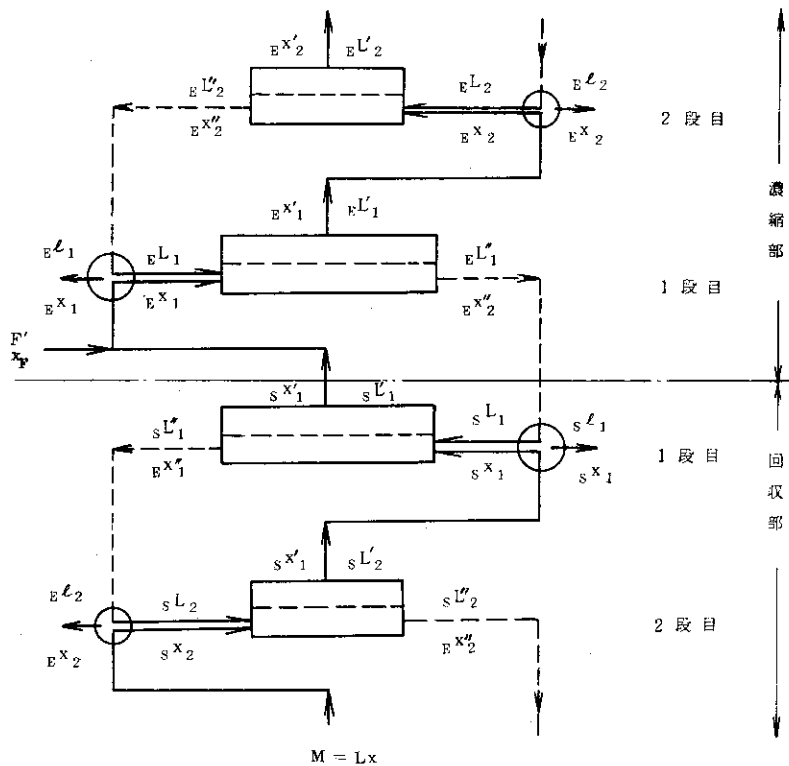


図3-2 濃縮部と回収部の継ぎ方

4. 準理想カスケード

4.1 簡略法

理想カスケードは、上昇流と下降流の合流点において、濃度的に混合があってはならないという条件〔(3.1)式で示される非混合の条件〕が満足されるもので、最も無駄の少ないカスケードである。

この場合、カット θ は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} E\theta_n &= \frac{E L'_n}{E L_n} = \frac{\alpha - \beta}{(\alpha - 1) \{ (\beta - 1) (1 - E x'_n) + 1 \}} \\ &= \frac{\beta}{(1 + \beta) \{ (\beta - 1) (1 - E x'_n) + 1 \}} \quad \dots\dots\dots (4.1) \end{aligned}$$

即ち、カットは、各段で変化する。

いま、数%程度の低濃縮ウランを製造する場合を対象にすると、カットの濃度依存性は小さいので、(4.1)式は次式で近似できる。

$$E\theta_n \cong \frac{1}{1 + \beta} = \frac{1}{1 + \sqrt{\alpha}} = \theta \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで、カスケード全体にわたって、(4.2)式で示される一定のカットを持つカスケードを取り上げてみる。これは、準理想カスケード (Quasi-ideal Cascade) と呼ばれている。

準理想カスケードでは、非混合の条件を満足しないので、所定の製品 (濃度, 流量) を得るのに必要な段数, 循環流量は、理想カスケードの場合とは若干異なることになる。しかし、分離係数が1に近く、製品濃度が低い場合には、その差は小さいことが報告されている⁽²⁾。

ここでは、まず、所要段数が理想カスケードと同じであると仮定できる場合につき、循環流量と軸封部漏れ出し量との関係を求めてみる。

いま、濃縮部 n 段目の圧縮機について流量収支をとると (図3-1参照)。

$$\begin{aligned} E L_n &= E L'_{n-1} + E L''_{n+1} - \ell_n \\ &= E L'_{n-1} + E L''_{n+1} - a \cdot E L_n \quad \dots\dots\dots (4.3) \end{aligned}$$

上式を上昇流量のみで表わすと、

$$E L'_{n+1} - \frac{(1+a)(1+\beta)}{\beta} \cdot E L'_n + \frac{1}{\beta} \cdot E L'_{n-1} = 0 \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

いま、境界条件として、

$$\left. \begin{aligned} n = N_p \text{ のとき} & \quad E L'_{N_p} = P \\ n = N_p + 1 \text{ のとき} & \quad E L'_{N_p+1} = 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

を用いると、差分方程式 (4.4) 式の解として次式が得られる。

$$E L'_n = \frac{s_1 s_2 P}{s_1 - s_2} \cdot (s_2^{n-N_p-1} - s_1^{n-N_p-1}) \quad (4.6)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= \frac{1}{2\beta} \left\{ (1+a)(1+\beta) + \sqrt{(\beta-1)^2 + a(2+a)(1+\beta)^2} \right\} \\ s_2 &= \frac{1}{2\beta} \left\{ (1+a)(1+\beta) - \sqrt{(\beta-1)^2 + a(2+a)(1+\beta)^2} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

なお、(4.7)式は前章の(3.14)式と全く同じである。

つぎに、供給流量は、(4.2)式を用いて、

$$E L_n = \frac{E L'_n}{E \theta_n} = \frac{s_1 s_2 P (1+\beta)}{s_1 - s_2} (s_2^{n-N_p-1} - s_1^{n-N_p-1}) \quad (4.8)$$

そこで、濃縮部における循環流量の総和を求めると、

$$\begin{aligned} J'_P &= \sum_{n=1}^{N_p} E L'_n \\ &= \frac{s_1 s_2 P}{s_1 - s_2} \left(\frac{1 - s_1^{-N_p}}{1 - s_1} - \frac{1 - s_2^{-N_p}}{1 - s_2} \right) \quad (4.9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_P &= J'_P (1+\beta) \\ &= \frac{s_1 s_2 P (1+\beta)}{s_1 - s_2} \left(\frac{1 - s_1^{-N_p}}{1 - s_1} - \frac{1 - s_2^{-N_p}}{1 - s_2} \right) \quad (4.10) \end{aligned}$$

なお、軸封部から漏れ出しがない場合の循環流量は、 $s_1 = 1$ 、 $s_2 = 1/\beta$ とおくことにより簡単に求まる。

つぎに、回収部について考える。この場合にも、所要段数、廃棄材流量として理想カスケードで求めた値を採用すると、循環流量と漏れ出し量との関係は以下のようなになる。

いま、回収部 n 段目の圧縮機について流量収支をとり、これを下降流量のみで表わすと、

$$s L''_{n+1} - (1+a)(1+\beta) s L''_n + \beta s L''_{n-1} = 0 \quad (4.11)$$

境界条件として、

$$\left. \begin{aligned} n = N_W \quad \text{のとき} \quad s L''_{N_W} &= W' \\ n = N_W + 1 \quad \text{のとき} \quad s L''_{N_W+1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

を用いて、(4.11)式の差分方程式を解くと、回収部の任意段の下降流量として次式が得られる。

$$sL''_n = \frac{r_1 r_2 W'}{r_1 - r_2} (r_2^{n-N_W-1} - r_1^{n-N_W-1}) \quad \text{----- (4.13)}$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{1}{2} \left\{ (1+a)(1+\beta) + \sqrt{(\beta-1)^2 + a(2+a)(1+\beta)^2} \right\} \\ r_2 &= \frac{1}{2} \left\{ (1+a)(1+\beta) - \sqrt{(\beta-1)^2 + a(2+a)(1+\beta)^2} \right\} \end{aligned} \right\} \text{----- (4.14)}$$

なお、(4.14)式は前章の(3.12)式と全く同じである。

また、供給流量は、

$$sL_n = \frac{r_1 r_2 W' (1+\beta)}{\beta (r_1 - r_2)} (r_2^{n-N_W-1} - r_1^{n-N_W-1}) \quad \text{----- (4.15)}$$

つぎに、回収部における循環流量の総和を求めると、

$$\begin{aligned} J''_W &= \sum_{n=1}^{N_W} sL''_n \\ &= \frac{r_1 r_2 W'}{r_1 - r_2} \left(\frac{1 - r_1^{-N_W}}{1 - r_1} - \frac{1 - r_2^{-N_W}}{1 - r_2} \right) \quad \text{----- (4.16)} \end{aligned}$$

$$J_W = \frac{r_1 r_2 W' (1+\beta)}{\beta (r_1 - r_2)} \left(\frac{1 - r_1^{-N_W}}{1 - r_1} - \frac{1 - r_2^{-N_W}}{1 - r_2} \right) \quad \text{----- (4.17)}$$

以上の関係式より、製品濃度の小さい準理想カスケードについて、各段からプロセスガスが漏れ出した場合のカスケード特性が把握できる。

4.2 逐次段法

前章では、準理想カスケードの所要段数に理想カスケードの値を使用できるとして、濃縮部、回収部の循環流量の算出式を導出した。しかし、製品濃度が高くなると、準理想カスケードと理想カスケードの所要段数の違いは大きくなり、前節の簡便法は使用できなくなる。

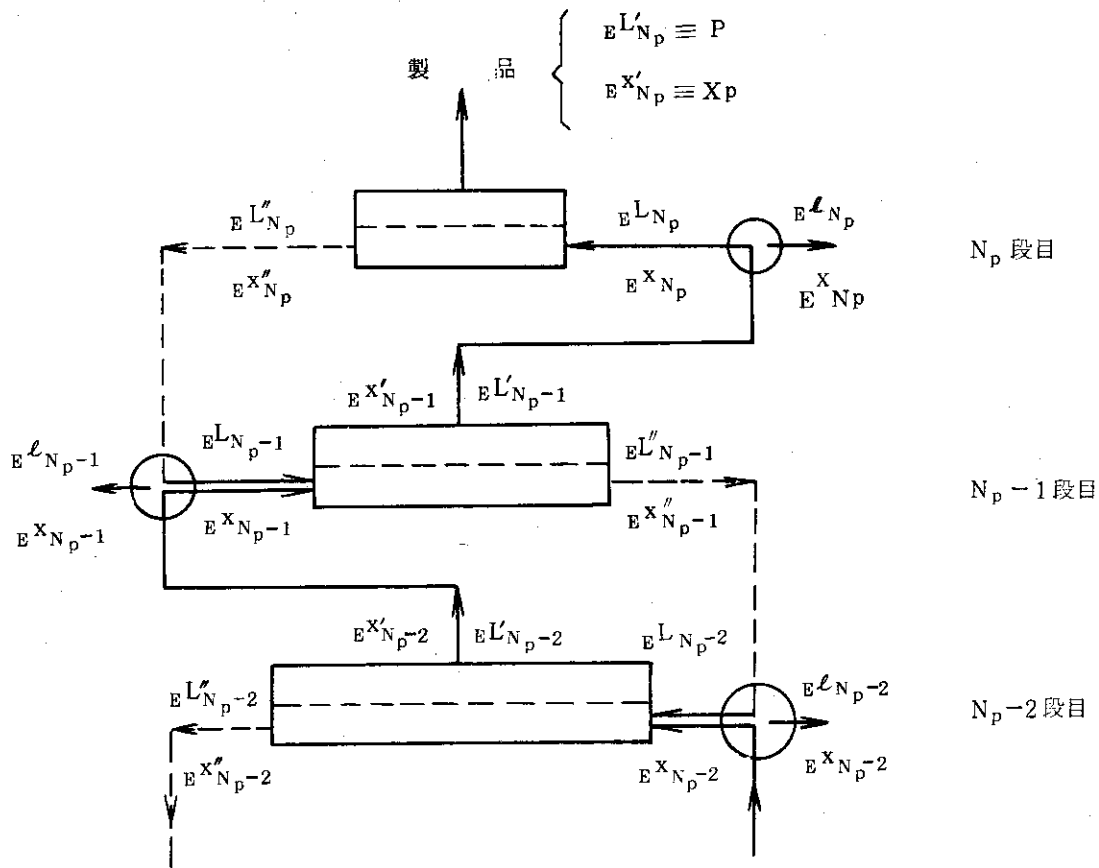
この場合には、以下に示す逐次段法により、所要段数、濃度分布、循環流量を同時に正確に求めることができる(図4-1参照)。

まず、濃縮部については、

N_p 段 (製品取出し段)

$$E x'_{N_p} = x_p \text{ (既知)} \quad \text{----- (4.18)}$$

$$E L'_{N_p} = P \text{ (既知)} \quad \text{----- (4.19)}$$



カット $\theta = \frac{1}{1 + \beta}$ (一定)

図4-1 圧縮機軸封部からの漏れ出しを考慮した場合のカスケード構成図 (準理想カスケード、濃縮部)

$$E X''_{Np} = \frac{E X'_{Np}}{\alpha - E X'_{Np} (\alpha - 1)} \quad (4.20)$$

$$E X_{Np} = \theta \cdot E X'_{Np} + (1 - \theta) \cdot E X''_{Np} \quad (4.21)$$

$$E L_{Np} = \frac{E L'_{Np}}{\theta} = \frac{P}{\theta} \quad (4.22)$$

$$E L''_{Np} = (1 - \theta) \cdot E L_{Np} = \frac{(1 - \theta) P}{\theta} \quad (4.23)$$

$N_p - 1$ 段

$$E X'_{Np-1} = E X_{Np} \quad (4.24)$$

$$E X''_{Np-1} = \frac{E X'_{Np-1}}{\alpha - E X'_{Np-1} (\alpha - 1)} \quad (4.25)$$

$$E X_{N_p-1} = \theta \cdot E X'_{N_p-1} + (1-\theta) \cdot E X''_{N_p-1} \quad \text{-----} \quad (4.26)$$

$$E L'_{N_p-1} = (1+a) \cdot E L_{N_p} \quad \text{-----} \quad (4.27)$$

$$E L_{N_p-1} = \frac{E L'_{N_p-1}}{\theta} \quad \text{-----} \quad (4.28)$$

$$E L''_{N_p-1} = (1-\theta) \cdot E L_{N_p-1} = \frac{(1-\theta) \cdot E L'_{N_p-1}}{\theta} \quad \text{-----} \quad (4.29)$$

$N_p - 2$ 段

$$E L'_{N_p-2} = (1+a) \cdot E L_{N_p-1} - E L''_{N_p} \quad \text{-----} \quad (4.30)$$

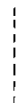
$$E L_{N_p-2} = \frac{E L'_{N_p-2}}{\theta} \quad \text{-----} \quad (4.31)$$

$$E L''_{N_p-2} = (1-\theta) \cdot E L_{N_p-2} = \frac{(1-\theta) \cdot E L'_{N_p-2}}{\theta} \quad \text{-----} \quad (4.32)$$

$$E X'_{N_p-2} = \frac{(1+a) \cdot E L_{N_p} \cdot E X_{N_p-1} - E L''_{N_p} \cdot E X''_{N_p}}{E L'_{N_p-2}} \quad \text{-----} \quad (4.33)$$

$$E X''_{N_p} = \frac{E X'_{N_p-2}}{\alpha - E X'_{N_p-2} \cdot (\alpha - 1)} \quad \text{-----} \quad (4.34)$$

$$E X_{N_p-2} = \theta \cdot E X'_{N_p-2} + (1-\theta) \cdot E X''_{N_p-2} \quad \text{-----} \quad (4.35)$$



n 段

$$E L'_n = (1+a) \cdot E L_{n+1} - E L''_{n+2} \quad \text{-----} \quad (4.36)$$

$$E L_n = \frac{E L'_n}{\theta} \quad \text{-----} \quad (4.37)$$

$$E L''_n = (1-\theta) \cdot E L_n = \frac{(1-\theta) \cdot E L'_n}{\theta} \quad \text{-----} \quad (4.38)$$

$$E X'_n = \frac{(1+a) \cdot E L_{n+1} \cdot E X_{n+1} - E L''_{n+1} \cdot E X''_{n+2}}{E L'_n} \quad \text{-----} \quad (4.39)$$

$$E X''_n = \frac{E X'_n}{\alpha - E X'_n \cdot (\alpha - 1)} \quad (4.40)$$

$$E X_n = \theta \cdot E X'_n + (1 - \theta) \cdot E X''_n \quad (4.41)$$

以上の計算を $E X_n$ が原料濃度 x_f になるまで繰返し行えばよい。

つぎに、回収部について逐次段法を適用する場合には、廃棄材流量が未知数であるが、

- ① 濃縮部との結合点で流量がバランスすること。
- ② 回収部1段目の上昇流濃度が原料濃度に等しくなること。

の2つの条件を使用することにより、以下の手順で計算できる。

まず、廃棄材流量 W'_Q の目安として、漏れ出しのある理想カスケードの値 W' を用いて、一連の逐次段計算を行う。

$W'_Q = W'$ のとき

N_W 段 (廃棄材取出し段)

$$s x''_{N_W} = x_W \quad (\text{既知}) \quad (4.42)$$

$$s L''_{N_W} = W'_Q = W' \quad (\text{仮定}) \quad (4.43)$$

$$s x'_{N_W} = \frac{\alpha \cdot s x''_{N_W}}{1 + (\alpha - 1) \cdot s x''_{N_W}} \quad (4.44)$$

$$s x_{N_W} = \theta \cdot s x'_{N_W} + (1 - \theta) \cdot s x''_{N_W} \quad (4.45)$$

$$s L_{N_W} = \frac{s L''_{N_W}}{1 - \theta} = \frac{W'}{1 - \theta} \quad (4.46)$$

$$s L'_{N_W} = \frac{\theta \cdot s L''_{N_W}}{1 - \theta} = \frac{\theta W'}{1 - \theta} \quad (4.47)$$

$N_W - 1$ 段

$$s x''_{N_W - 1} = s x_{N_W} \quad (4.48)$$

$$s x'_{N_W - 1} = \frac{\alpha \cdot s x''_{N_W - 1}}{1 + (\alpha - 1) \cdot s x''_{N_W - 1}} \quad (4.49)$$

$$s x_{N_W - 1} = \theta \cdot s x'_{N_W - 1} + (1 - \theta) \cdot s x''_{N_W - 1} \quad (4.50)$$

$$sL''_{N_W-1} = (1+a) \cdot sL_{N_W} \quad \text{-----} \quad (4.51)$$

$$sL_{N_W-1} = \frac{sL''_{N_W-1}}{1-\theta} \quad \text{-----} \quad (4.52)$$

$$sL'_{N_W-1} = \frac{\theta \cdot sL''_{N_W-1}}{1-\theta} \quad \text{-----} \quad (4.53)$$

$N_W - 2$ 段

$$sL''_{N_W-2} = (1+a) \cdot sL_{N_W-1} - sL'_{N_W} \quad \text{-----} \quad (4.54)$$

$$sL_{N_W-2} = \frac{sL''_{N_W-2}}{1-\theta} \quad \text{-----} \quad (4.55)$$

$$sL'_{N_W-2} = \frac{\theta \cdot sL''_{N_W-2}}{1-\theta} \quad \text{-----} \quad (4.56)$$

$$sX''_{N_W-2} = \frac{(1+a) \cdot sL_{N_W-1} \cdot sX_{N_W-1} - sL'_{N_W} \cdot sX'_{N_W}}{sL''_{N_W-2}} \quad \text{-----} \quad (4.57)$$

$$sX'_{N_W-2} = \frac{\alpha \cdot sX''_{N_W-2}}{1 + (\alpha - 1) \cdot sX''_{N_W-2}} \quad \text{-----} \quad (4.58)$$

$$sX_{N_W-2} = \theta \cdot sX'_{N_W-2} + (1-\theta) \cdot sX''_{N_W-2} \quad \text{-----} \quad (4.59)$$

⋮

n 段

$$sL''_n = (1+a) \cdot sL_{n+1} - sL'_{n+2} \quad \text{-----} \quad (4.60)$$

$$sL_n = \frac{sL''_n}{1-\theta} \quad \text{-----} \quad (4.61)$$

$$sL'_n = \frac{\theta \cdot sL''_n}{1-\theta} \quad \text{-----} \quad (4.62)$$

$$sX''_n = \frac{(1+a) \cdot sL_{n+1} \cdot sX_{n+1} - sL'_{n+2} \cdot sX'_{n+2}}{sL''_n} \quad \text{-----} \quad (4.63)$$

$$sX'_n = \frac{\alpha \cdot sX''_n}{1 + (\alpha - 1) \cdot sX''_n} \quad \text{-----} \quad (4.64)$$

$$s x_n = \theta \cdot s x'_n + (1-\theta) \cdot s x''_n \quad \text{-----} \quad (4.65)$$

以上の計算を $s x'_n$ が原料濃度 x_f になるまで繰返し行い、濃縮部との結合点で次の流量バランスが成立することを確認しなければならない。即ち、回収部1段目の圧縮機について流量バランスをとると、

$$s L_1 = \frac{s L'_2 + e L''_1}{1+a} \quad \text{-----} \quad (4.66)$$

が得られる。(4.61)式から求めた $s L_1$ の値が、(4.66)式の値と異なるならば、

$$W'_Q = W' + \Delta W' \quad \text{-----} \quad (4.67)$$

とおき、両者が一致するまで、試行錯誤法により、一連の逐次計算を行う必要がある。

5. 計算結果

5.1 計算条件

カスケードの大きさは循環流量の総和（全圧縮機の所要動力，隔膜の総面積に相当する）を1つの目安とすることができる。

理想カスケードでは，全循環流量は，次式のように，製品濃度に関係なく，分離係数と分離作業量から計算できる。

$$J = \frac{\beta+1}{(\beta-1)\ln\beta} \left\{ P(2x_P-1)\ln\frac{x_P}{1-x_P} + W(2x_W-1)\ln\frac{x_W}{1-x_W} - F(2x_F-1)\ln\frac{x_F}{1-x_F} \right\}$$

$$= \frac{\beta+1}{(\beta-1)\ln\beta} \cdot U \cong \frac{8}{(\alpha-1)^2} U \quad (5.1)$$

ここで， U ；分離作業量

しかし，理想カスケード以外のカスケードでは，分離とは逆の作業をする混合現象が各段で生ずるため，カスケード全体の見掛けの分離作業量でカスケード規模の正確な比較はできない。この混合による負の分離作業量のため，カスケード全体の分離作業量が同じときでも，理想カスケード以外のカスケードの全循環流量は，理想カスケードの全循環流量よりも大きくなる。

つぎに，軸封部からプロセスガスが漏れ出す場合を考えると，カスケードの流出物としての製品および廃棄材に各段からの漏れ出し量が増えらるることになるので，当然，カスケードの全循環流量は増大する。

以上のことから，本計算例においては，カスケードの形式および軸封部からの漏れ出しの有無にかかわらず製品抜き出し流量が一定のプラントを想定し，製品濃度 x_P および分離係数 α をパラメーターにとり，漏れ出し量のカスケード静特性に与える影響を検討する。なお，計算には下記の値を採用した。

- (1) 漏れ出し定数 a ； $2 \times 10^{-7} \sim 1.8 \times 10^{-6}$

〔 $\ell = aL$ と定義したもので，軸封機構の開発研究の結果を考慮して設定した。〕

- (2) 分離係数 α ；1.0030～1.0045

〔隔膜の開発研究の結果を考慮して設定した。〕

- (3) 製品濃度 x_P ；3.05～10.0 mol %

〔低濃縮ウランの生産を対象にし， x_P の影響を調べるために範囲を広めた。〕

- (4) 原料濃度 x_F ；0.721 mol %

〔天然ウランのみを原料とした。〕

(5) 廃棄材濃度 x_w ; 0.253 mol %
 [計算を簡単にするために固定した。]

(6) 製品流量 P ; 製品濃度 x_p に対し次の値を採用した。

x_p (mol %)	3.05	4.05	5.05	7.25	10.0
P (mol/sec)	0.30421	0.20040	0.14772	0.08819	0.06278

なお、製品流量 P は、カスケード全体の分離作業量を 8750 ton-SWU/yr とし、次式から求めた。

$$\begin{aligned}
 U &= P \cdot V(x_p) + W \cdot V(x_w) - F \cdot V(x_f) \\
 V(x) &= (2x-1) \log \frac{x}{1-x} \\
 F &= P + W \\
 F x_f &= P x_p + W x_w
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

図5-1は、1例として製品濃度が4.05mol%で、軸封部から漏れ出しのない場合の理想カスケードの概要を示したものである。横軸には各段の循環流量(供給流量)、縦軸には段数をとっており、分離係数とカスケードの大きさ(全循環流量)との関係が理解できる。図に示した製品、原料、廃棄材の各流量は、(5.2)式により求めたものであるが、実際のカスケードでは段数が整数となるため、若干この値と異ってくる。そこで、以下の解析では、製品流量を(6)の値に固定し、所定の整数の段数で流量がバランスするよう原料、廃棄材流量を再計算し、その値を用いた。

5.2 理想カスケードと準理想カスケードの比較

準理想カスケードでは、非混合の条件が成立しないため、1段当りの分離作業量は分離器(即ち、拡散筒)でなされる分離作業量より小さい。Kokubu, H⁽⁵⁾は、ステップカスケードに関し $(\beta-1) \ll 1$ で、かつ $\theta \cong 0.5$ の場合には、次のように混合係数を定義することにより、混合の分離作業量を計算できることを示した。

即ち、濃縮部 n 段の混合係数 ${}_E \beta'_n$ は、

$${}_E \beta'_n = \frac{x'_{n-1} (1-x_n)}{x_n (1-x'_{n-1})} \tag{5.3}$$

で与えられ、 n 段の分離作業量 ${}_E U_n$ 、分離器の分離作業量 ${}_E u_n$ 、混合の分離作業量 ${}_E u'_n$ は次式で計算できる。

$$\begin{aligned}
 {}_E U_n &= {}_E u_n - {}_E u'_n \\
 {}_E u_n &= \frac{\theta}{2(1-\theta)} \cdot {}_E L_n \cdot (\beta-1)^2
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

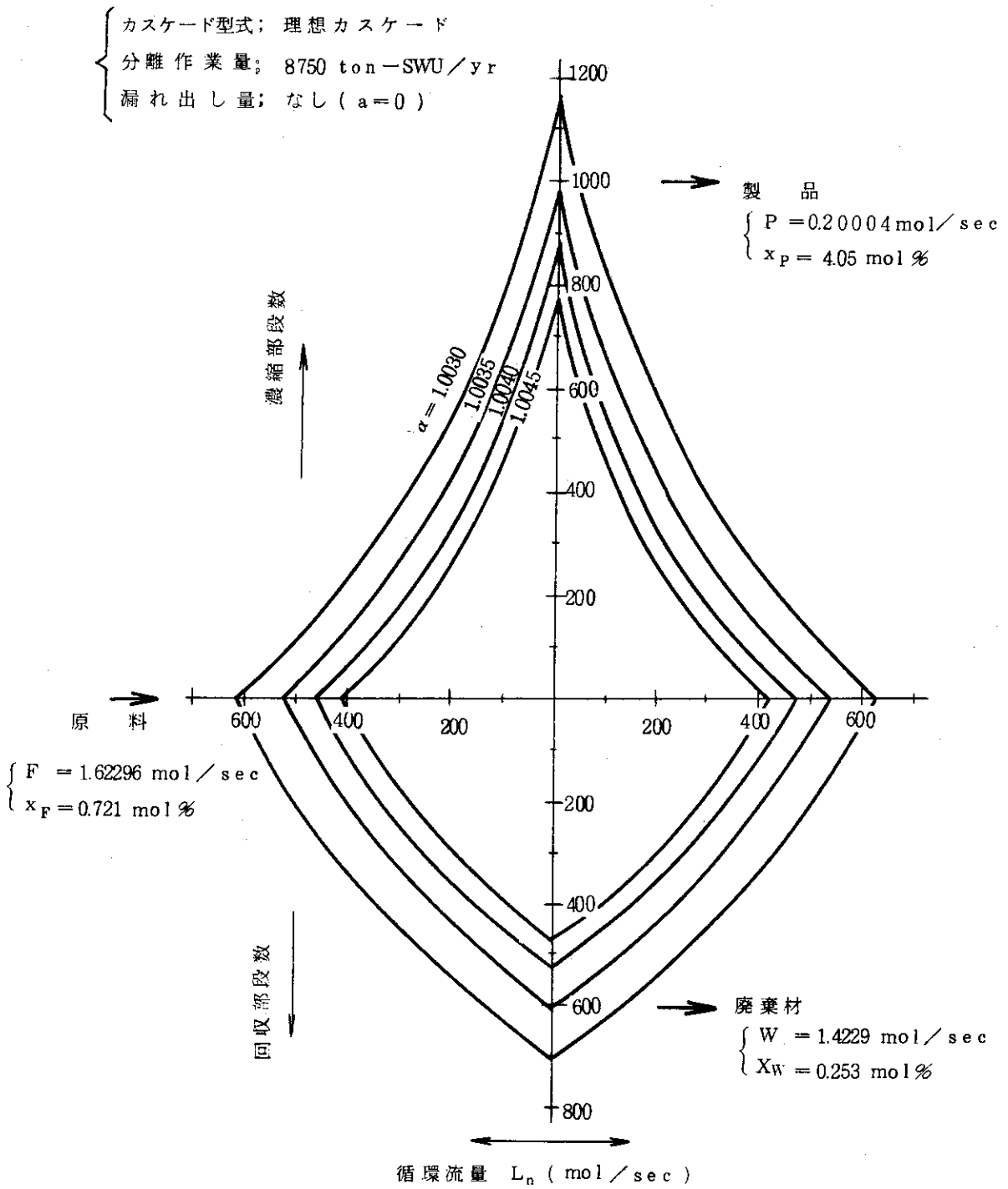


図5-1 分離係数とカスケード循環流量との関係 (理想カスケード)

$$E u'_n = \frac{\theta}{2(1-\theta)} \cdot E L_n \cdot (E \beta'_n - 1)^2$$

ただし、製品抜き出し段 $n=N_p$ では混合は起らない ($E \beta'_{N_p} = 1$)。また、混合係数 $E \beta'_n$ は、頭分離係数 β とは異なり、段によって変化する。

同様に、回収部については

$$S \beta'_n = \frac{x''_{n-1} (1-x_n)}{x_n (1-x''_{n-1})} \quad \text{----- (5.5)}$$

$$\left. \begin{aligned} S U_n &= S u_n - S u'_n \\ S u_n &= \frac{\theta}{2(1-\theta)} \cdot S L_n \cdot (\beta - 1)^2 \\ S u'_n &= \frac{\theta}{2(1-\theta)} \cdot S L_n \cdot (S \beta'_n - 1)^2 \end{aligned} \right\} \text{----- (5.6)}$$

を用いて計算できる。

ここで、濃度分布および流量分布は、第4章で述べた逐次段法により計算するものとする。この方法を準理想カスケードに採用する際、製品および廃棄材抜き出し段に近いところでは各段の混合の分離作業量の値にかなりの誤差を伴うが、以下に示すカスケード全体に関する検討では大きな問題にならないと考えられる。

従って、準理想カスケードの全体の分離作業量 U_Q は、

$$\begin{aligned} U_Q &= \left\{ \sum_{n=1}^{N_p} E U_n + \sum_{n=1}^{N_w} S U_n \right\} \\ &= \frac{\theta}{2(1-\theta)} \left\{ \sum_{n=1}^{N_p} E L_n \{ (\beta - 1)^2 - (E \beta'_n - 1)^2 \} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=1}^{N_w} S L_n \{ (\beta - 1)^2 - (S \beta'_n - 1)^2 \} \right\} \text{----- (5.7)} \end{aligned}$$

となる。

各段から漏れ出しのある場合には、そのときの所要段数、循環流量および混合係数を用いればよい。

一方、理想カスケードでは、非混合の条件が成立するので、分離器の分離作業量と1段当りの分離作業量とは等しい。従って、カスケード全体の分離作業量 U_I は、次式で計算できる。

$$U_I = \frac{(\beta - 1)^2}{2} \left\{ \sum_{n=1}^{N_p} \frac{E \theta_n \cdot E L_n}{(1 - E \theta_n)} + \sum_{n=1}^{N_w} \frac{S \theta_n \cdot S L_n}{(1 - S \theta_n)} \right\} \text{----- (5.8)}$$

各段から漏れ出しのある場合には、そのときの循環流量を用いればよい。

図5-2は、準理想カスケードの濃縮部について、漏れ出しのない場合の混合の分離作業量と製品濃度の関係を示したものである。ここで、縦軸には混合の分離作業量の濃縮部全体の分離作業量に対する割合 ($\Sigma_E u'_n / \Sigma_E U_n$) をとっている。この図から、混合の分離作業量は、製品濃度の上昇とともに増大しているが、製品濃度が10mol%のときでも $5 \times 10^{-2}\%$ 程度であり分離器の分離作業量と比べて小さいことが分かる。また、分離係数を1.0030~1.0045と変化しても、ほぼ1つの曲線で表わし得ることも理解できる。なお、回収部における混合の分離作業量は、廃棄材濃度を0.253 mol%に固定しているため、一定値となっている(即ち、 $\Sigma_S u'_n / \Sigma_S U_n \cong 5 \times 10^{-6}$)。

表5-1は、漏れ出しのない場合の理想カスケードと準理想カスケードの濃縮部および回収部の所要段数を示したものである。ここで、理想カスケードの所要段数は、

$$(N_P)_I = \ln \frac{x_P(1-x_F)}{x_F(1-x_P)} / \ln \beta \quad \text{----- (5.9)}$$

で求め、準理想カスケードの所要段数は逐次段法で計算した。図5-3は、両カスケードの濃縮部所要段数の差を図示したものであり、横軸には理想カスケードの所要段数 $(N_P)_I$ を、縦軸には両カスケードの所要段数の差 $\{(N_P)_I - (N_P)_Q\}$ をとっている。この図から、準理想カスケードの所要段数は、理想カスケードのそれより小さく、その差は製品濃度(従って、理想カスケードの所要段数)および分離係数の増加とともに増大することが分かる。

両カスケードの所要段数の差は、混合係数が1より小さいことから説明できる。即ち、n段目の供給流濃度は、(5.3)式より、

$$x_n = x'_{n-1} + (1 - E\beta'_n) x_n (1 - x'_{n-1}) \quad \text{----- (5.10)}$$

と表わすことができ、 $x_n = x'_{n-1}$ なる理想カスケードと比べて、見掛け上、濃度が高くなっている。さらに、図5-2より濃縮部における混合の分離作業量が製品濃度とともに増大していることから、混合係数の平均的な大きさは製品濃度の上昇とともに減少する筈である。従って、(5.10)式から分かるように、n段への供給流濃度 x_n は、n-1段からの上昇流濃度 x'_{n-1} よりも高く、製品濃度の上昇に伴い増大する。即ち、両カスケードの所要段数の差は増大することになる。なお、回収部については、逆に、準理想カスケードの所要段数の方が理想カスケードのそれに比べて、 $\alpha = 1.0045, 1.0040$ のとき1段、 $\alpha = 1.0035, 1.0030$ のとき2段大きくなっている。

5.3 漏れ出し量のカスケード静特性に及ぼす影響

5.3.1 計算式の比較

図5-4は、軸封部から漏れ出しのある場合について、製品濃度と濃縮部の全循環流量との関係を示したものである。ここで、縦軸には準理想カスケードと理想カスケードの全循環流量の差の理想カスケードの全循環流量に対する割合 $\{ (J_P)_Q - (J_P)_I \} / (J_P)_I$ をとっている。この図より逐次段法で計算した準理想カスケードの濃縮部全循環流量 $(J_P)_Q$ は、理想カスケードのそれ $(J_P)_I$ より若干大きく、その差は分離係数および漏れ出し流量を変化しても ($\alpha = 1.0030 \sim$

計算条件 $\begin{cases} \alpha = 1.0030 \sim 1.0045 \\ a = 0 \end{cases}$

$(\times 10^4)$ 回収部 $\Sigma_s u_n / \Sigma_s U_n \cong 5.2 \times 10^6$ (一定)

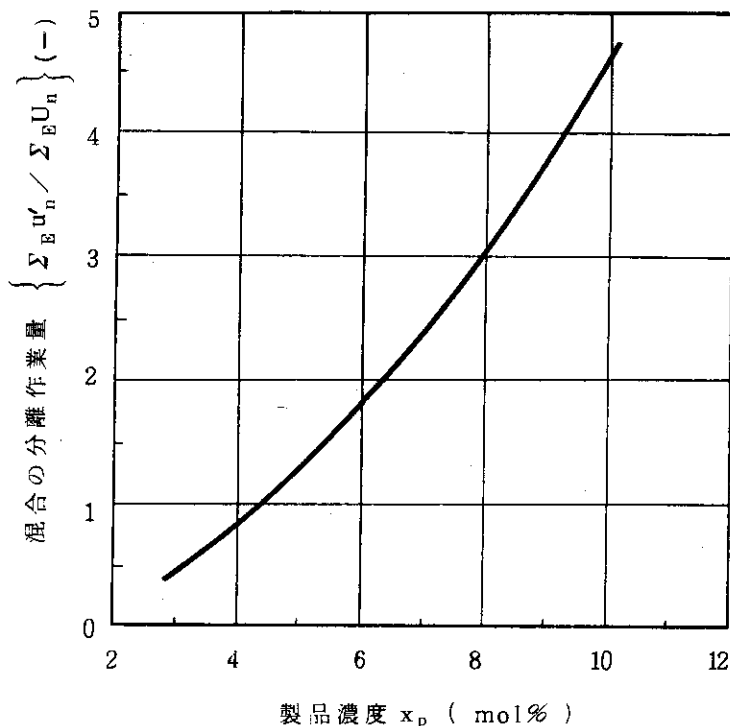


図5-2 製品濃度と濃縮部全体の混合の分離作業量との関係 (準理想カスケード)

{ 濃縮部
製品濃度 $x_p = 3.05 \sim 10.0$ mol%

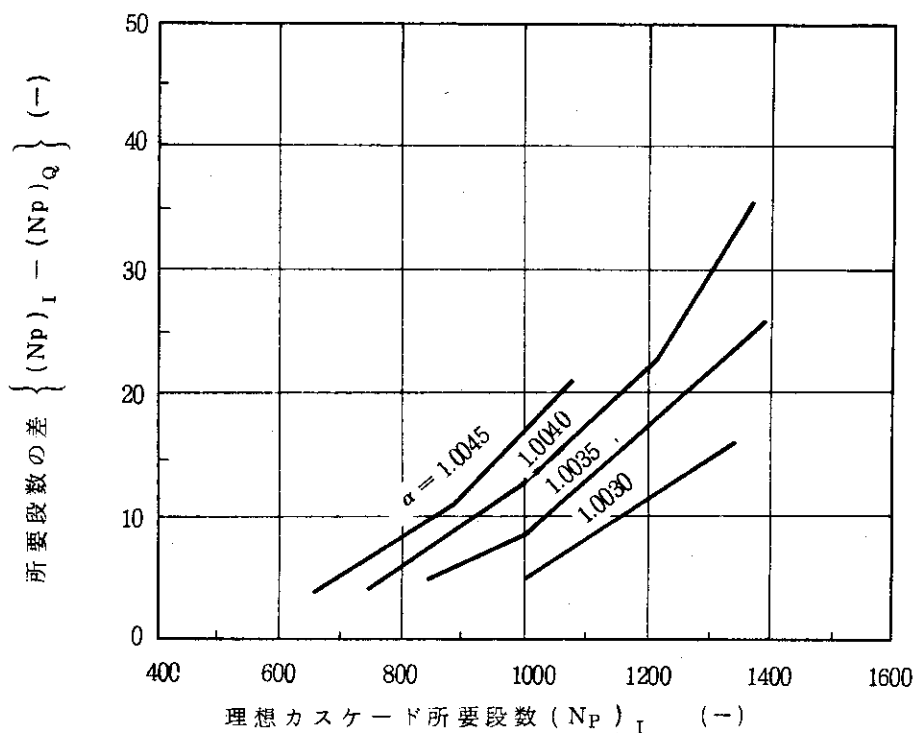


図5-3 理想カスケードおよび準理想カスケードの濃縮部所要段数

表 5-1 理想カスケードおよび準理想カスケードの所要段数

製品濃度 x_p	分離係数 α	1.0030		1.0035		1.0040		1.0045	
		理想カスケード	準理想カスケード	理想カスケード	準理想カスケード	理想カスケード	準理想カスケード	理想カスケード	準理想カスケード
3.05	濃縮部	977	972	839	834	734	730	653	649
	回収部	701	703	601	603	526	527	468	469
4.05	濃縮部	1176	1164	1007	998	882	873	784	776
	回収部	701	703	601	603	526	527	468	469
5.05	濃縮部	1329	1313	1140	1124	998	985	887	876
	回収部	701	703	601	603	526	527	468	469
7.55	濃縮部	--	--	1385	1359	1212	1189	1078	1057
	回収部	--	--	601	603	526	527	468	469
10.0	濃縮部	--	--	--	--	1367	1332	--	--
	回収部	--	--	--	--	526	527	--	--

$x_F = 0.721 \text{ mol}\%$
 $x_W = 0.253 \text{ mol}\%$

1.0045, $a < 1.8 \times 10^{-6}$ の範囲) 0.5%以下であることが分かる。一方, 簡略法で計算した場合には過大な値を示し, 理想カスケードとの差は製品濃度とともに増大する。これは, 簡略法では所要段数を理想カスケードと同じとしているため, 段数が過大評価されているからである(図5-3より, 過大評価の程度は, 製品濃度の上昇とともに増大する)。

図5-5は, 前図と同じ表わし方で, 製品濃度 x_p とカスケードの全循環流量(濃縮部+回収部)との関係を示したものである。これより, 逐次段法で計算した準理想カスケードの全循環流量 $(J_T)_Q$ は, 理想カスケードのそれ $(J_T)_I$ より1%程度大きくなっていることが分かる。一方, 簡略法で求めた場合には, 製品濃度に対する増加の割合は図5-4に似ているが, 逐次段法とのずれの程度は濃縮部のみの場合より小さくなっている。

以上のことから, 準理想カスケードの理想カスケードに対する全循環流量の増加の割合の変動巾(バラツキの大きさ)は, 逐次段法でも簡略法でも本計算条件の範囲内では, 分離係数, 製品濃度の大小および漏れ出しの有無に関係なく, 約0.5%の巾の中に入っていることが分かる。このことは, 分離係数又は漏れ出し量に変化しても, 準理想カスケードと理想カスケードの全循環流量は製品濃度に関係なくほぼ同じ挙動をとることを示している。即ち, 漏れ出し量のカスケード全循環流量に及ぼす影響を検討するとき, 理想カスケードを選んでも準理想カスケードを選んでも, 計算結果にはさほど大きな差は現われない。

5.3.2 所要段数への影響

準理想カスケードにおいて各段の圧縮機軸封部から漏れ出しがある場合には, カスケード内の流量分布が変化し, それに伴い濃度分布, 即ち, 所要段数も変化する。

図5-6は, 漏れ出し定数 a と準理想カスケードの濃縮部所要段数との関係を示したものである。ここで, 縦軸には理想カスケードと準理想カスケードの所要段数の差 $\{(N_p)_I - (N_p)_Q\}$ をとっている。この図から, 準理想カスケードの濃縮部所要段数は, 特に製品濃度が高いときに漏れ出しの影響を受けて増大し, 理想カスケードの所要段数に近づく傾向があることが分かる。一方, 製品濃度が低い場合の濃縮部所要段数および回収部所要段数(ここでは, 廃棄材濃度を一定としている)は, 漏れ出しの影響はあまり受けず, 理想カスケードの値とほぼ等しくなっている。

図5-7は, 準理想カスケードについて, 分離係数が1.0040のときの漏れ出し定数 a と混合の分離作業量との関係を示したものである。ここで, 縦軸には混合の分離作業量のカスケードの分離作業量に対する割合(濃縮部では $\Sigma_E u'_n / \Sigma_E U_n$, 回収部では $\Sigma_S u'_n / \Sigma_S U_n$)をとっている。この図から, 濃縮部および回収部の混合の分離作業量の占める割合は, 漏れ出し量の増加とともに減少し, 特に製品濃度が高い場合の濃縮部で顕著であることが分かる。このことは, 漏れ出しによって混合係数の値が1に近づくこと, 即ち, 混合点における各流れの濃度差が減少し, 濃度的には理想カスケードの状態に近くなっていることを意味している。以上のようにして, 図5-6と図5-7との関連性が説明できる。

5.3.3 全循環流量への影響

図5-8は, 漏れ出し量のカスケード循環流量への影響を理想カスケードについて示したものである。計算はカスケード全体の分離作業量 8,750 ton-SWU/yr, 製品濃度 4.05mol%, 分離係数 1.0040 の条件でなされており, 図の左半分は漏れ出し量の段方向の分布 l_n を, 図

の右半分はカスケード内の循環流量分布 L_n を示している。これより、漏れ出し量の循環流量に与える影響は、原料供給段近くになるにつれて大きくなり、漏れ出し定数 a が増加すると顕著になることが分かる。

図5-9(a)~(d)は、漏れ出し量と全循環流量の増加の割合 $\{(J_T)_I / (J_T)_{I, a=0} - 1\}$ の関係を代表的な分離係数に対して示したものである。これらの図より、分離係数が与えられた場合、漏れ出し量が多いほど、また、同じ漏れ出し量では製品濃度が高いほど全循環流量を大きくしなければならないことが分かる。このことは、全循環流量の算出式(3.18)および(3.29)式が、漏れ出し定数 a と製品濃度(従って、カスケード所要段数) x_p をパラメーターとしていることから理解できる。即ち、漏れ出しのある場合の全循環流量が、漏れ出し定数 a のみで定まるパラメーター Δ の所要段数乗となっていることから、製品濃度が高いほど漏れ出しの影響が大きくなる。

図5-10は、漏れ出し量と全循環流量との関係を分離係数をパラメーターにとり、各製品濃度に対して示したものである。これより、分離係数が小さいほど漏れ出し定数 a の全循環流量への影響は大きい。分離係数の大きさは、図5-1から分かるように、カスケードの規模、即ち全循環流量を表わしているので、分離係数が小さい場合のプロセスガスの漏れ出しによる全循環流量の増加量は大きく、圧縮機の容量(所要動力)の増大をまねくことになる。

以上の結果は、理想カスケードについて、漏れ出しのない場合の分離作業量を 8,750 ton-SWU/yr に固定して計算したものであるが、漏れ出し量の全循環流量の増加の割合に及ぼす影響は分離作業量の大小に関係しない。また、前述したように、準理想カスケードについても全循環流量に与える漏れ出しの影響を図5-9, 10 から推定しても大きな誤差はない。

以上のことをまとめると、理想カスケードまたは準理想カスケードの各段からプロセスガスが漏れ出す場合の全循環流量への影響は、カスケードの全循環流量を表わすパラメーターである $1/(\alpha-1)^2$ 、漏れ出し定数 a および製品濃度 x_p に依存するといえよう。これは、全循環流量と漏れ出し定数の積が漏れ出すプロセスガスの全流量を示しているので、漏れ出すプロセスガスの全流量と製品濃度に依存するといいかえることができる。図5-11は、横軸に漏れ出すプロセスガスの全流量を示すパラメーター $a/(\alpha-1)^2$ 、縦軸に全循環流量の増加の割合をとり、図5-9をまとめ直したものである。

5.3.4 廃棄材流量への影響

漏れ出しのある理想カスケードの廃棄材流量は、(3.35)式で計算することができる。

図5-12(a)~(d)は、漏れ出し流量と廃棄材流量の増加の割合 $(W/W-1)$ との関係を示したものである。これらの図から、分離係数が与えられた場合、漏れ出し量が多いほど、また、同じ漏れ出し量では製品濃度が高いほど廃棄材流量が増大することが分かる。

図5-13は、漏れ出し流量と廃棄材流量の増加の割合との関係を分離係数をパラメーターにとって示したものである。これより、分離係数が小さいほど漏れ出しの影響を受け、廃棄材流量が増加することが分かる。また、漏れ出しのない場合の廃棄材流量は分離係数に関係なく一定であるが、漏れ出しのある場合には、前述のように、流量分布が分離係数により変わり、この流量分布の変化を廃棄材流量を変えることによりバランスさせているため、分離係数の影響は製品濃度の高いほど顕著に現われている。

漏れ出し量の全循環流量に与える影響の場合と同様に、漏れ出すプロセスガスの全流量を表わすパラメータ $a/(\alpha-1)^2$ と廃棄材流量の増加の割合との関係を図 5-14 に示した。この図と図 5-11 とを比較すると、両流量の増加の傾向はよく似ているが、製品濃度が高くなると廃棄材流量の増加の割合の方が大きくなる。これは、廃棄材流量の算式出 (3.35) 式の分子が濃縮部 1 段目の下降流量を表わしており、かつ、図 5-8 から明らかなように漏れ出しの循環流量への影響が原料供給段近くで顕著であることから理解できる。

5.3.5 原料流量への影響

漏れ出しのある場合の原料流量は、カスケード全体の物質収支から (3.36) 式により求められ、全漏れ出し流量と廃棄材流量の増加分の和だけ漏れ出しのないときに比べて増加する。

図 5-15 は、漏れ出し定数とカスケード全体から漏れ出すプロセスの全流量との関係を分離係数 1.0040 の場合について示したものである。この図から、プロセスガスの全漏れ出し流量は、漏れ出し定数が小さい場合 ($a \leq 5 \times 10^{-7}$) には製品濃度に関係なくほぼ直線的に増加するが、漏れ出し定数が大きくなると製品濃度の影響を受けることが分かる。これは、プロセスガスの全漏れ出し流量が全循環流量と漏れ出し定数の積であり、かつ、全循環流量は漏れ出し定数と製品濃度の増加とともに増大するためである。

図 5-16 は、漏れ出し定数とカスケード全体から漏れ出すプロセスガスの全流量との関係を製品濃度 4.05 mol % の場合について示したものである。この図から、全漏れ出し流量は、分離係数の影響を大きく受けることが分かる。これは、カスケードの全循環流量が分離係数に依存することによる (図 5-1 参照)。

図 5-17(a)~(d) は、漏れ出し流量と原料流量の増加の割合との関係を製品濃度をパラメータとして示したものである。また、図 5-18(a)~(c) は、この関係を分離係数をパラメータにとり示したものである。これらの図より、原料流量は漏れ出し流量により大きな影響を受け、同じ漏れ出し係数に対しては、製品濃度が高いほど、また、分離係数が小さいほど原料流量は増加することが分かる。

図 5-19 は、以上の結果を漏れ出すプロセスガスの全流量を示すパラメータ $a/(\alpha-1)^2$ と原料流量の増加の割合との関係に書き直したものである。

図 5-20 は、分離係数が 1.0040 の場合について、漏れ出し流量とカスケード全体から漏れ出す ^{235}U の流量 ($\sum l_n x_n$) および漏れ出し流中の ^{235}U の平均濃度 \bar{x} との関係を製品濃度をパラメータにとって示したものである。この図から、カスケード全体から漏れ出す ^{235}U の流量は、漏れ出し定数の増加とともに急激に増大し、その傾向は製品濃度が高いほど顕著であることが分かる。一方、漏れ出し流中の ^{235}U の平均濃度は、漏れ出し定数の増加とともに減少している。これは、漏れ出しの循環流量への影響が原料供給段近くで顕著に現われることから説明できる。

図 5-21(a)~(d) は、与えられた分離係数について、漏れ出し量とカスケード全体から漏れ出す ^{235}U の製品中の ^{235}U に対する割合との関係を示したものである。この関係をカスケード全体から漏れ出す全流量を表わすパラメータ $a/(\alpha-1)^2$ でまとめると図 5-22 が得られる。これらの図から、漏れ出し量の増加により、有効成分である多量の ^{235}U がカスケードから損失となって流出することが理解できる。

表5-2は、理想カスケードについての計算結果の1例をまとめたものである。

以上の検討結果は、カスケードから漏れ出したウランを損失として取扱っているが、実際にはこれをカスケードに再供給して有効利用をはからなければならない。このような現実的な議論は、次報のステップカスケードの解析にゆずる。

表5-2 計算結果の1例(理想カスケード)

8750 ton-SWU/yr $P = 200 \times 10^{-1} \text{ mol/sec}$
 $\alpha = 1.0040$ $1.50 \times 10^3 \text{ tonU/yr}$
 $x_p = 405 \text{ mol\%}$ $N_p = 882$
 $x_f = 0.721 \text{ "}$ $N_w = 526$
 $x_w = 0.253 \text{ "}$

漏れ出し定数 a	0	2×10^{-7}	4×10^{-7}	6×10^{-7}	8×10^{-7}	10×10^{-7}	12×10^{-7}	14×10^{-7}	16×10^{-7}	18×10^{-7}
J _p	mol/sec	2.98×10^5	3.07×10^5	3.16×10^5	3.25×10^5	3.33×10^5	3.43×10^5	3.53×10^5	3.62×10^5	3.72×10^5
	tonU/yr	2.24×10^9	2.30×10^9	2.37×10^9	2.44×10^9	2.50×10^9	2.57×10^9	2.65×10^9	2.72×10^9	2.79×10^9
J _w	mol/sec	2.87×10^5	2.99×10^5	3.10×10^5	3.22×10^5	3.34×10^5	3.47×10^5	3.59×10^5	3.72×10^5	3.85×10^5
	tonU/yr	2.15×10^9	2.24×10^9	2.33×10^9	2.42×10^9	2.51×10^9	2.60×10^9	2.69×10^9	2.79×10^9	2.89×10^9
J _T	mol/sec	5.85×10^5	6.06×10^5	6.26×10^5	6.47×10^5	6.67×10^5	6.90×10^5	7.12×10^5	7.34×10^5	7.57×10^5
	tonU/yr	4.39×10^9	4.55×10^9	4.70×10^9	4.86×10^9	5.01×10^9	5.17×10^9	5.34×10^9	5.51×10^9	5.68×10^9
F(F')	mol/sec	1.62	1.79	1.96	2.14	2.34	2.54	2.75	2.97	3.20
	tonU/yr	1.22×10^4	1.34×10^4	1.47×10^4	1.61×10^4	1.76×10^4	1.91×10^4	2.06×10^4	2.23×10^4	2.40×10^4
W(W')	mol/sec	1.42	1.47	1.51	1.55	1.60	1.65	1.70	1.74	1.83
	tonU/yr	1.07×10^4	1.10×10^4	1.13×10^4	1.16×10^4	1.20×10^4	1.24×10^4	1.28×10^4	1.31×10^4	1.34×10^4
$\Sigma \ell_n$	mol/sec	0	1.21×10^{-1}	2.50×10^{-1}	3.88×10^{-1}	5.34×10^{-1}	6.90×10^{-1}	8.54×10^{-1}	1.028	1.212
	tonU/yr	0	9.08×10^2	1.88×10^3	2.91×10^3	4.01×10^3	5.18×10^3	6.41×10^3	7.72×10^3	9.10×10^3
$\Sigma \ell_n x_n$	mol/sec	0.0	1.08×10^{-3}	2.22×10^{-3}	3.43×10^{-3}	4.69×10^{-3}	6.03×10^{-3}	7.43×10^{-3}	8.90×10^{-3}	1.04×10^{-2}
	tonU/yr	0	8.11	1.67×10	2.57×10	3.52×10	4.53×10	5.58×10	6.68×10	7.81×10

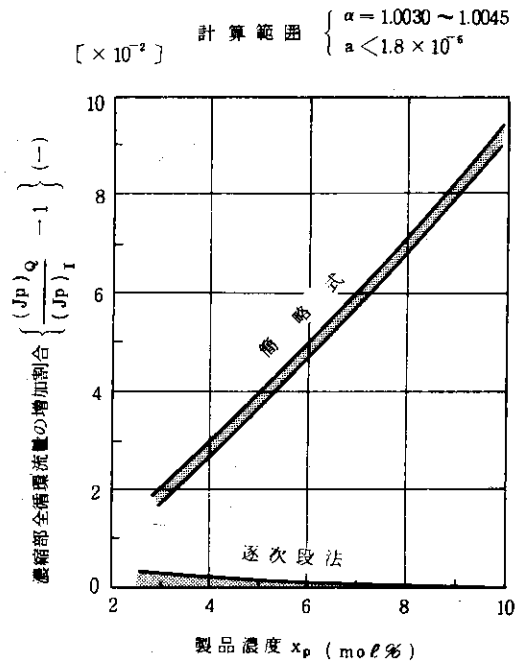


図 5-4 漏れ出しがある場合の製品濃度と濃縮部全循環流量の増加割合との関係 (準理想カスケード)

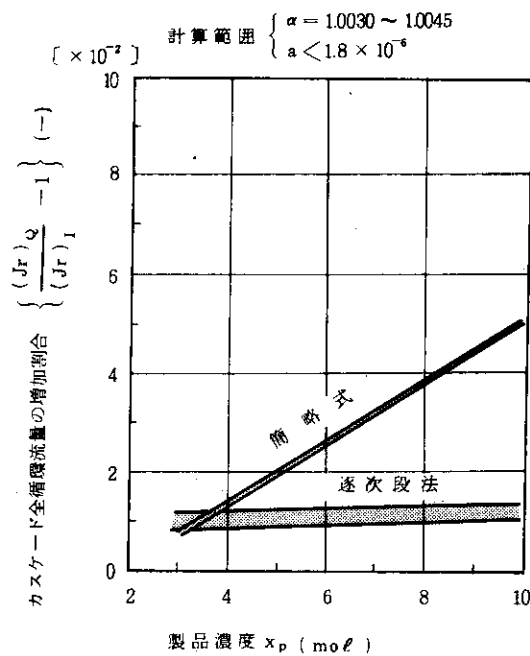


図 5-5 漏れ出しがある場合の製品濃度とカスケード全循環流量の増加割合との関係 (準理想カスケード)

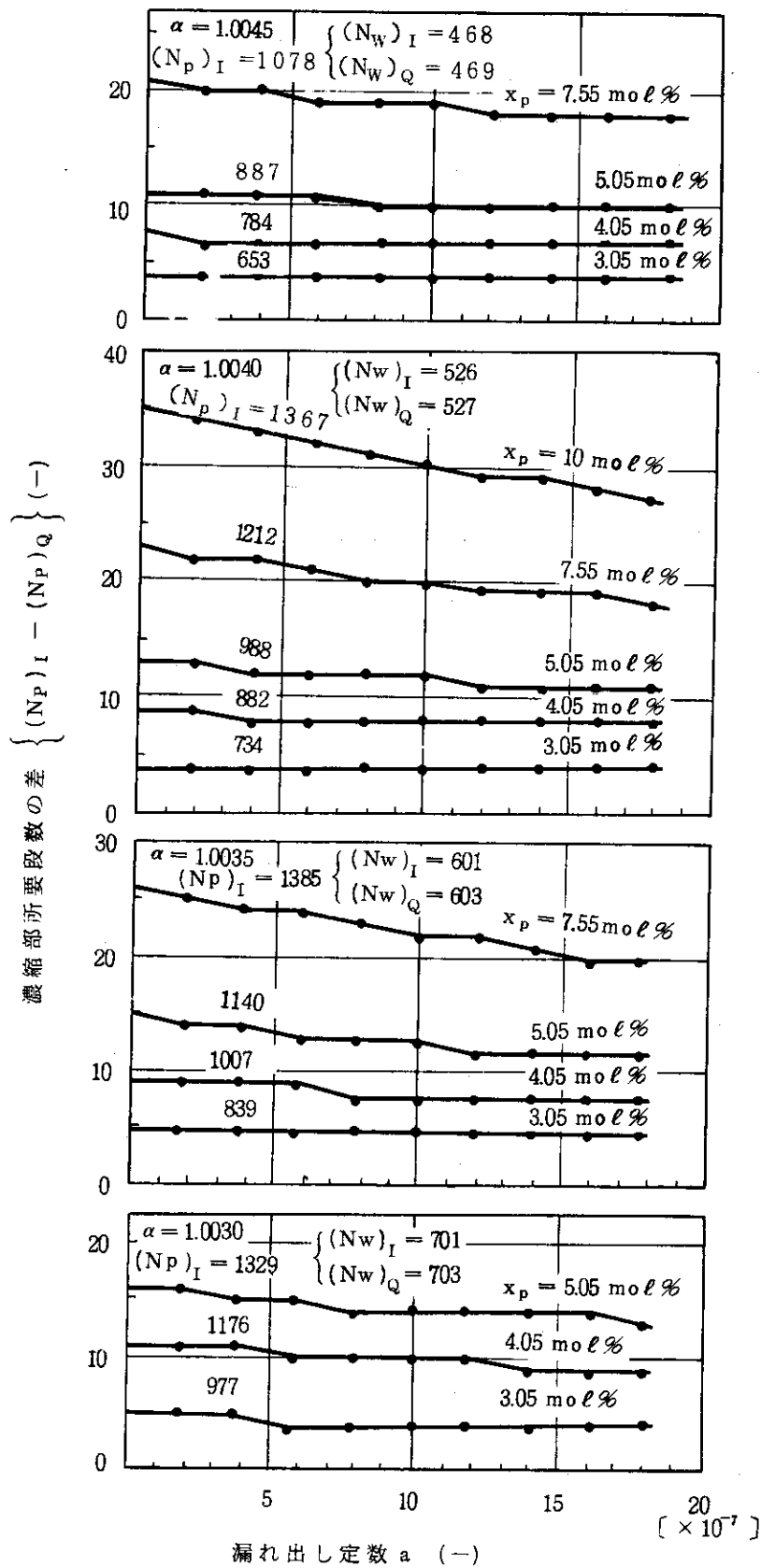


図 5-6 漏れ出し量と濃縮部所要段数との関係 (準理想カスケード)

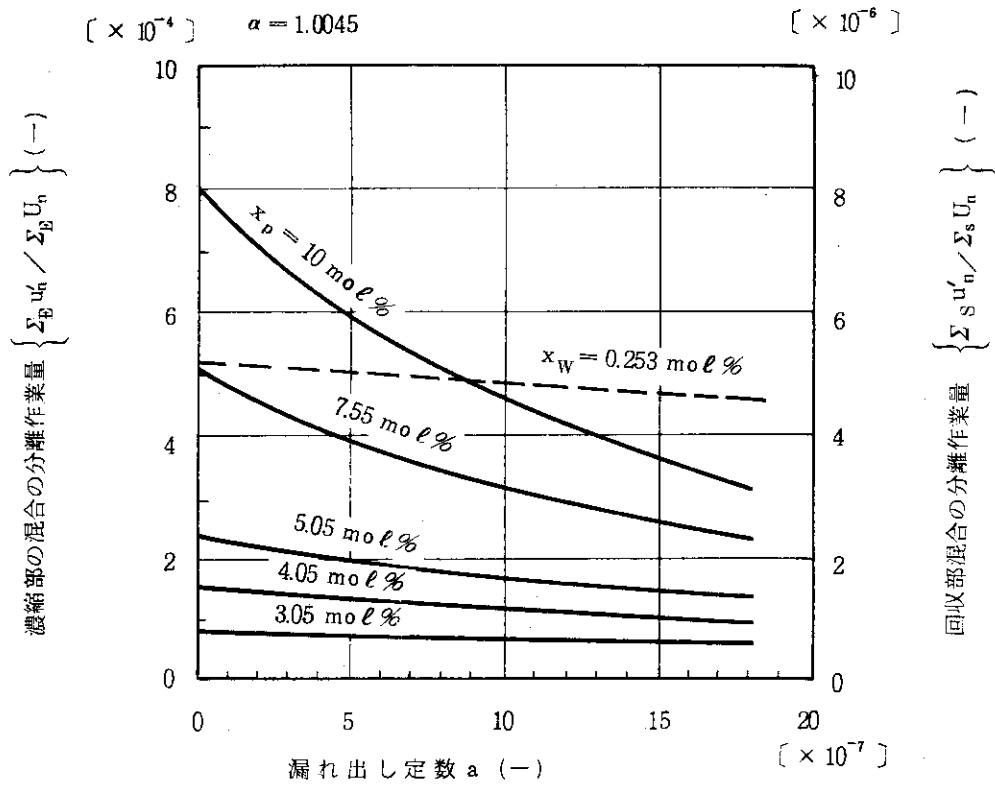


図5-7 漏れ出し量と混合の分離作業量との関係(準理想カスケード)

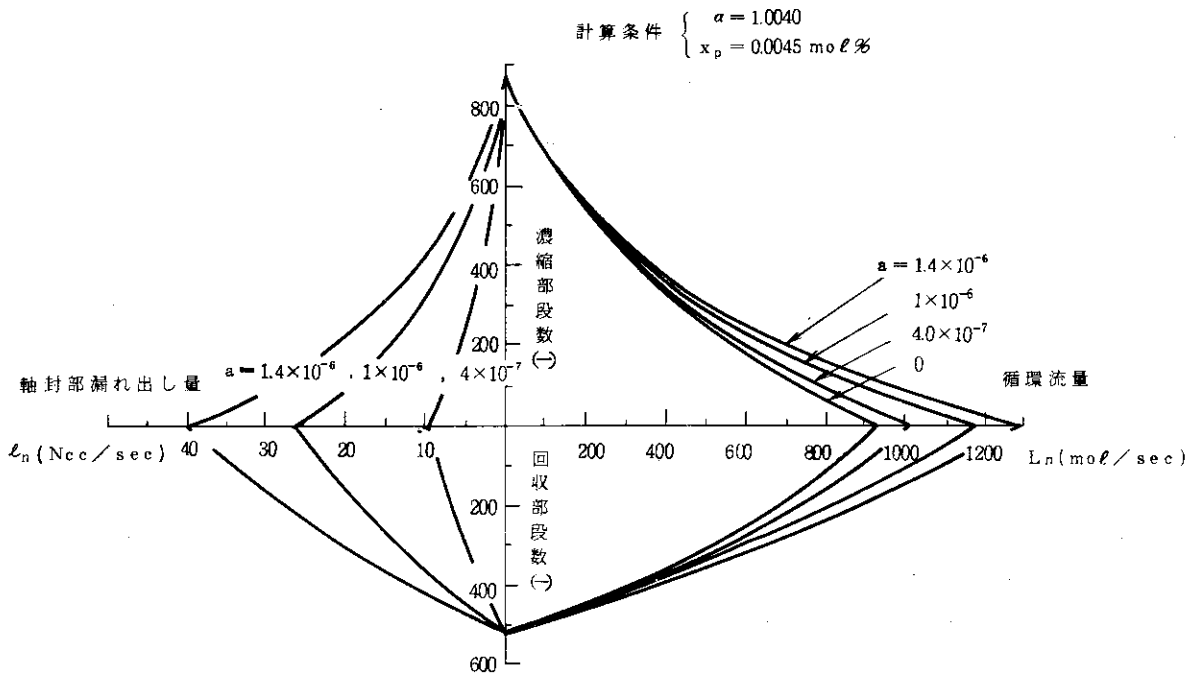


図5-8 漏れ出し量とカスケード内循環流量との関係(準理想カスケード)

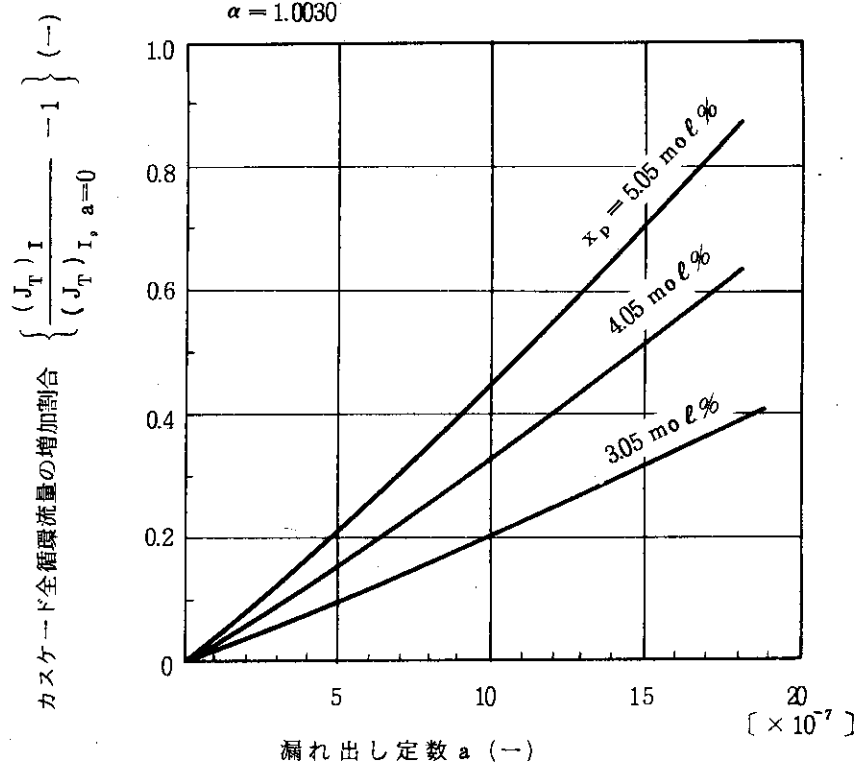


図5-9(a) 漏れ出し量とカスケード全循環流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

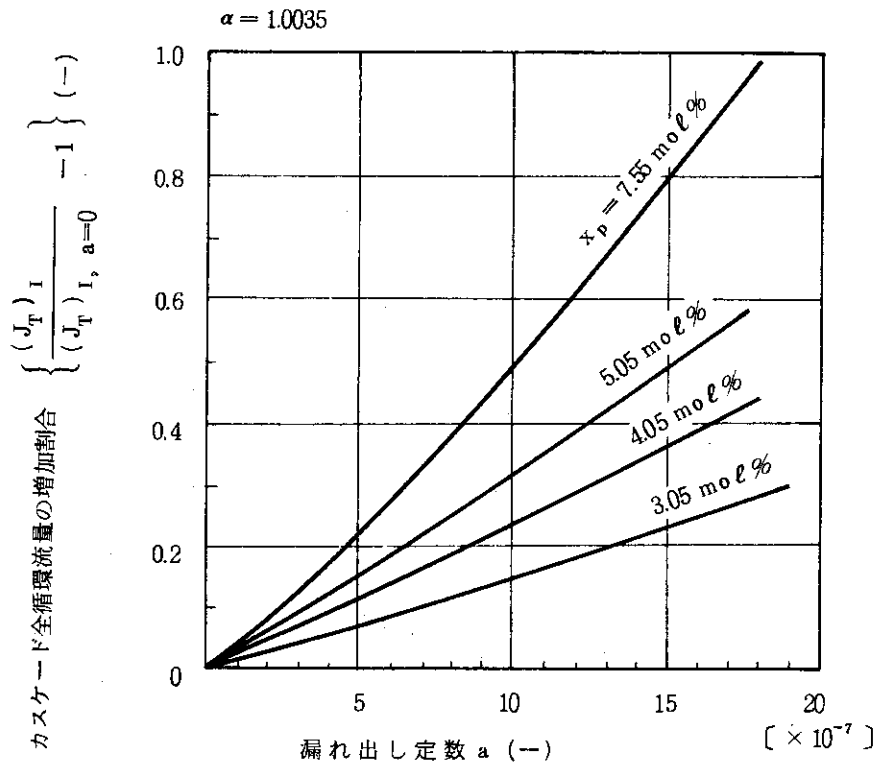


図5-9(b) 漏れ出し量とカスケード全循環流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

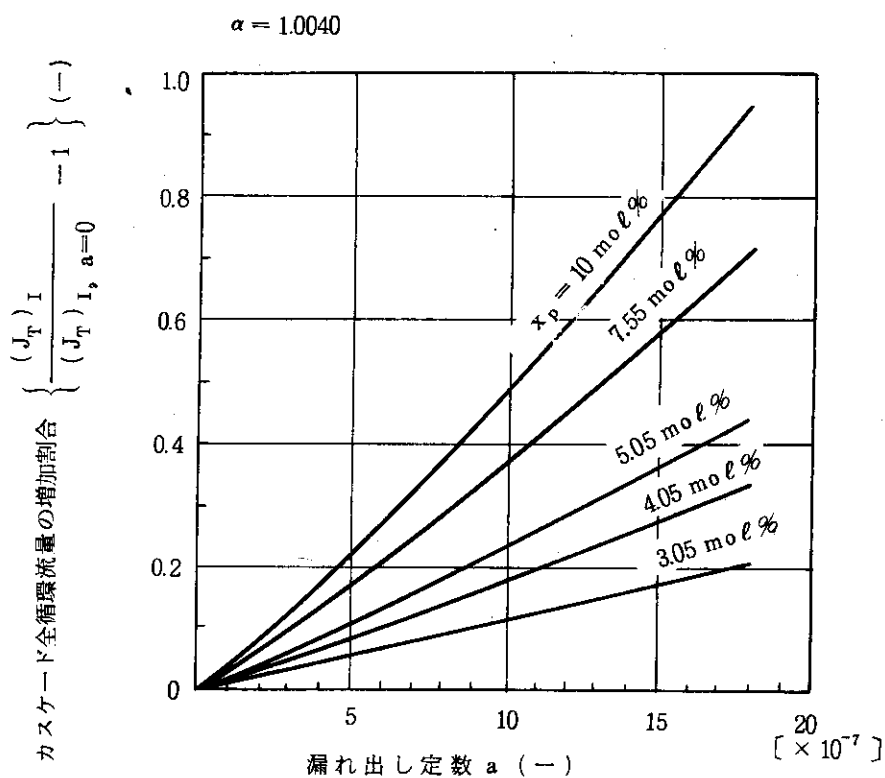


図 5-9 (c) 漏れ出し量とカスケード全循環流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

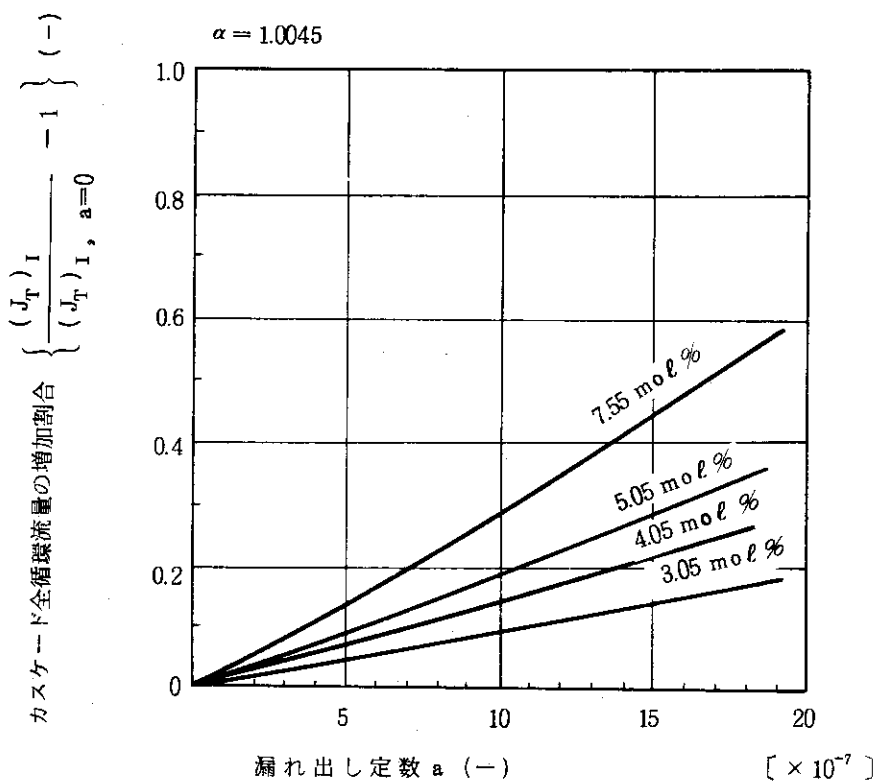


図 5-9 (d) 漏れ出し量とカスケード全循環流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

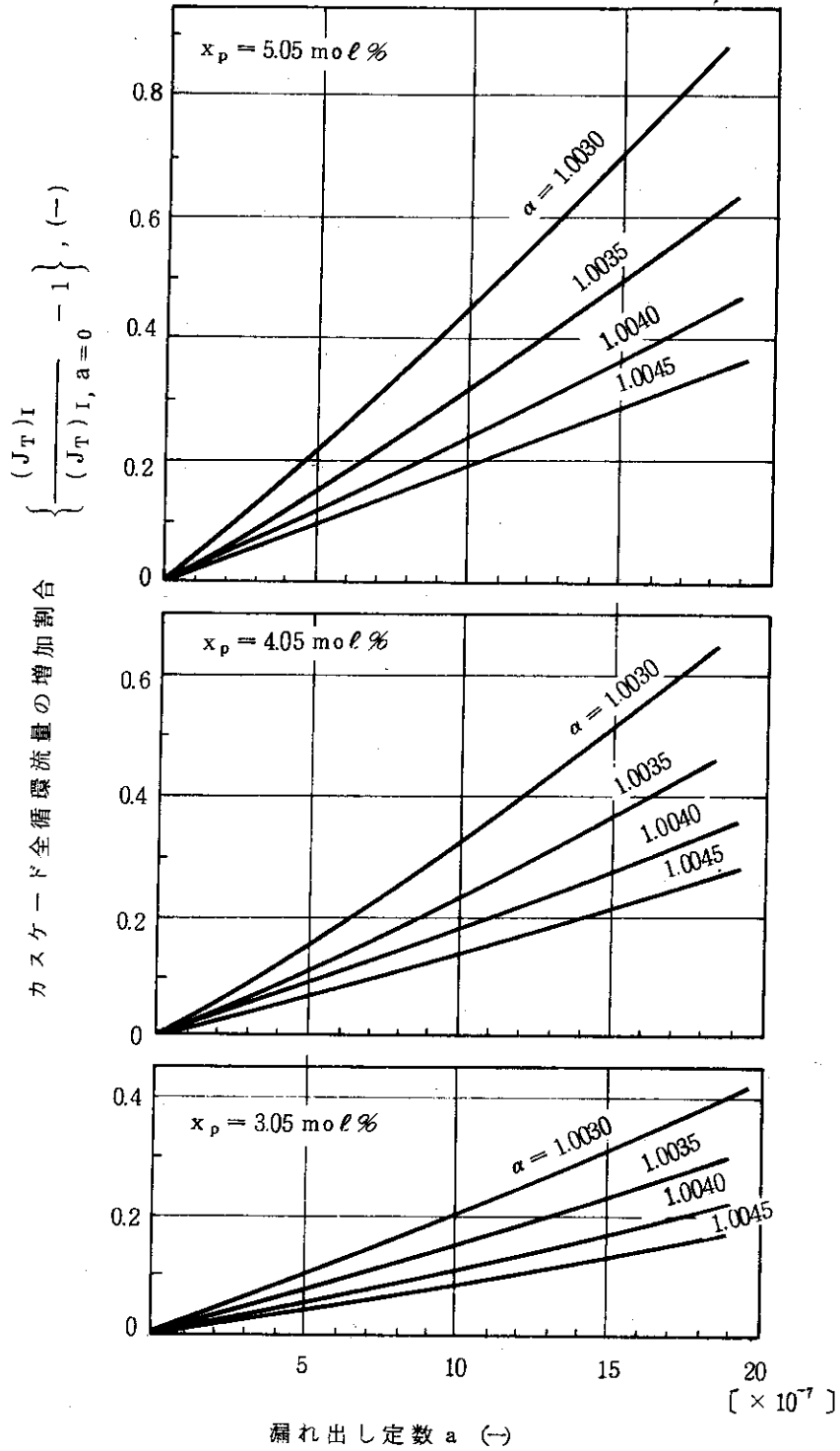


図5-10 漏れ出し量とカスケード全循環流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

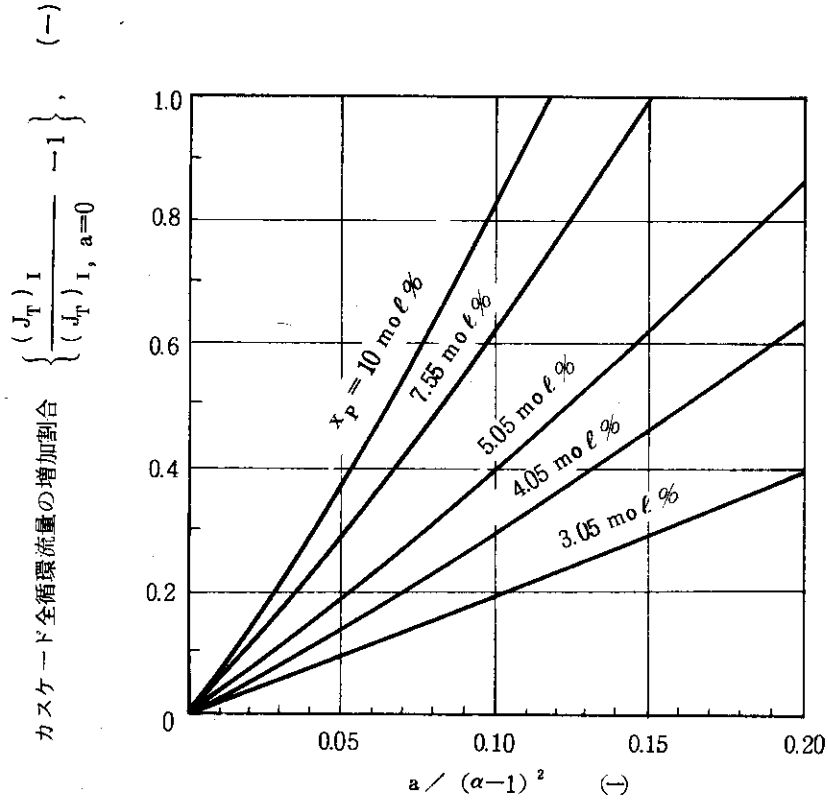


図 5 - 11 全漏れ出し流量とカスケード全循環流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

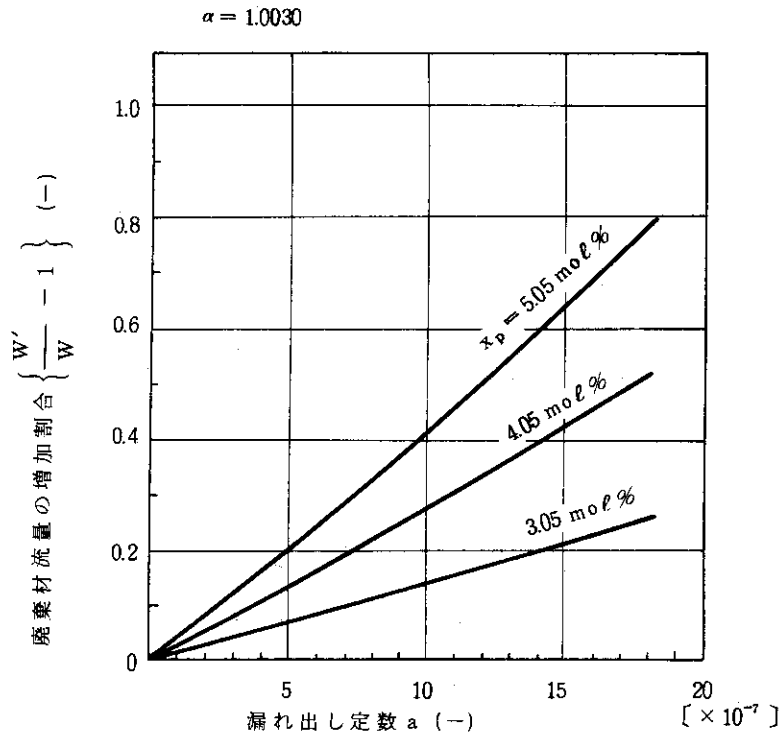


図 5-12 (a) 漏れ出し流量と廃棄材流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

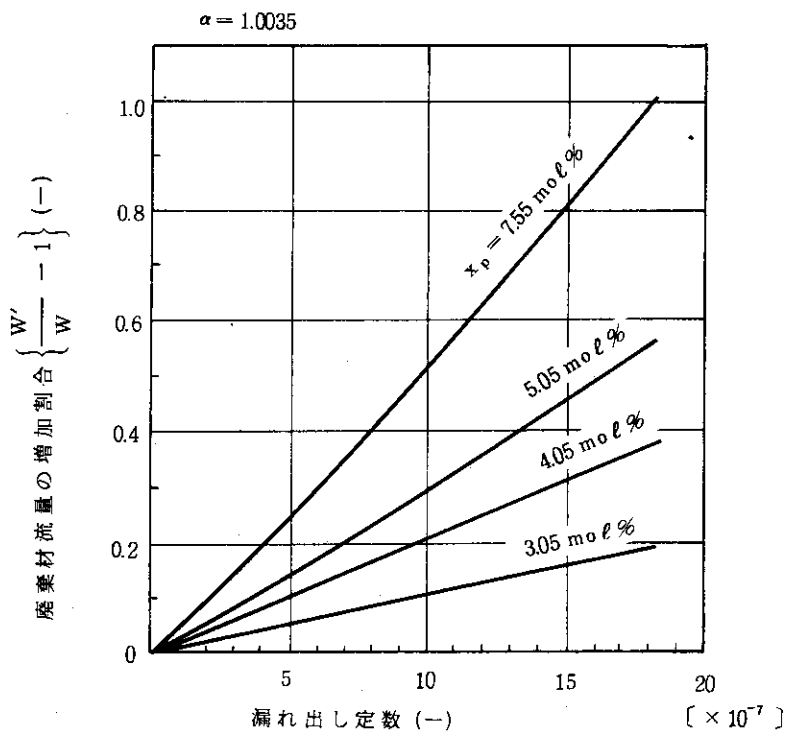


図 5-12 (b) 漏れ出し流量と廃棄材流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

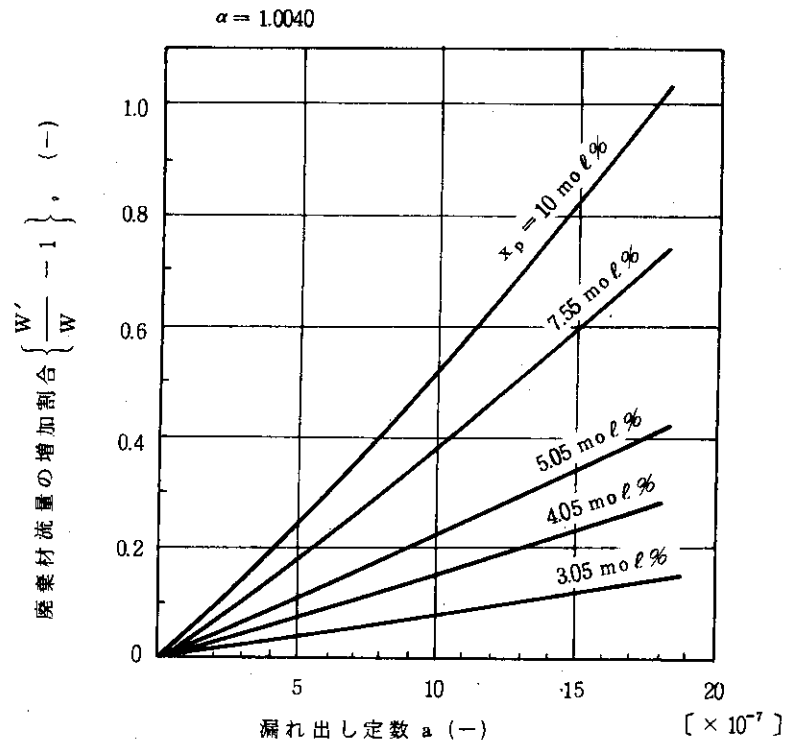


図 5 - 12 (c) 漏れ出し流量と廃棄材流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

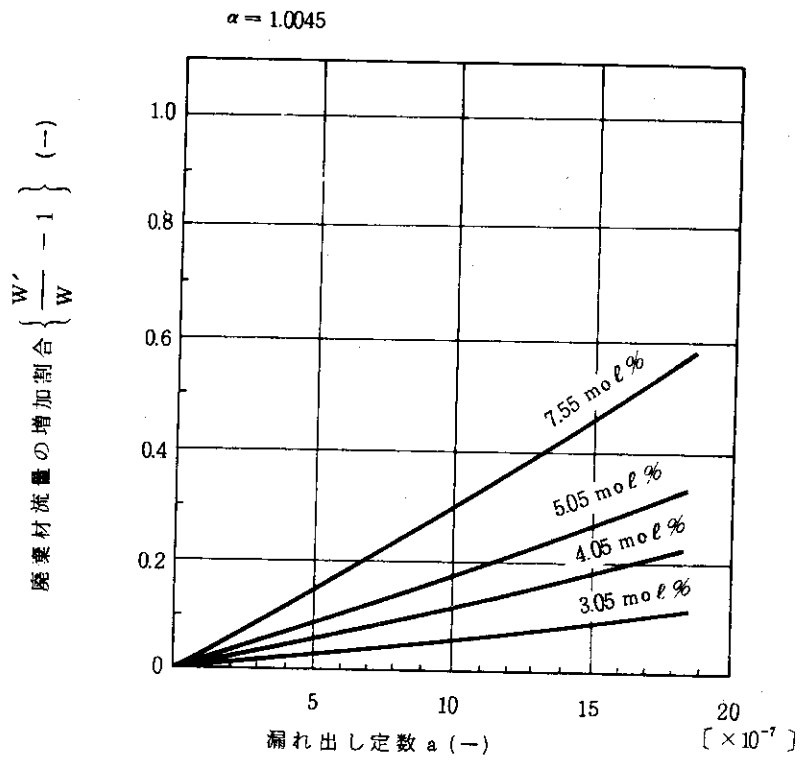


図 5 - 12 (d) 漏れ出し流量と廃棄材流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

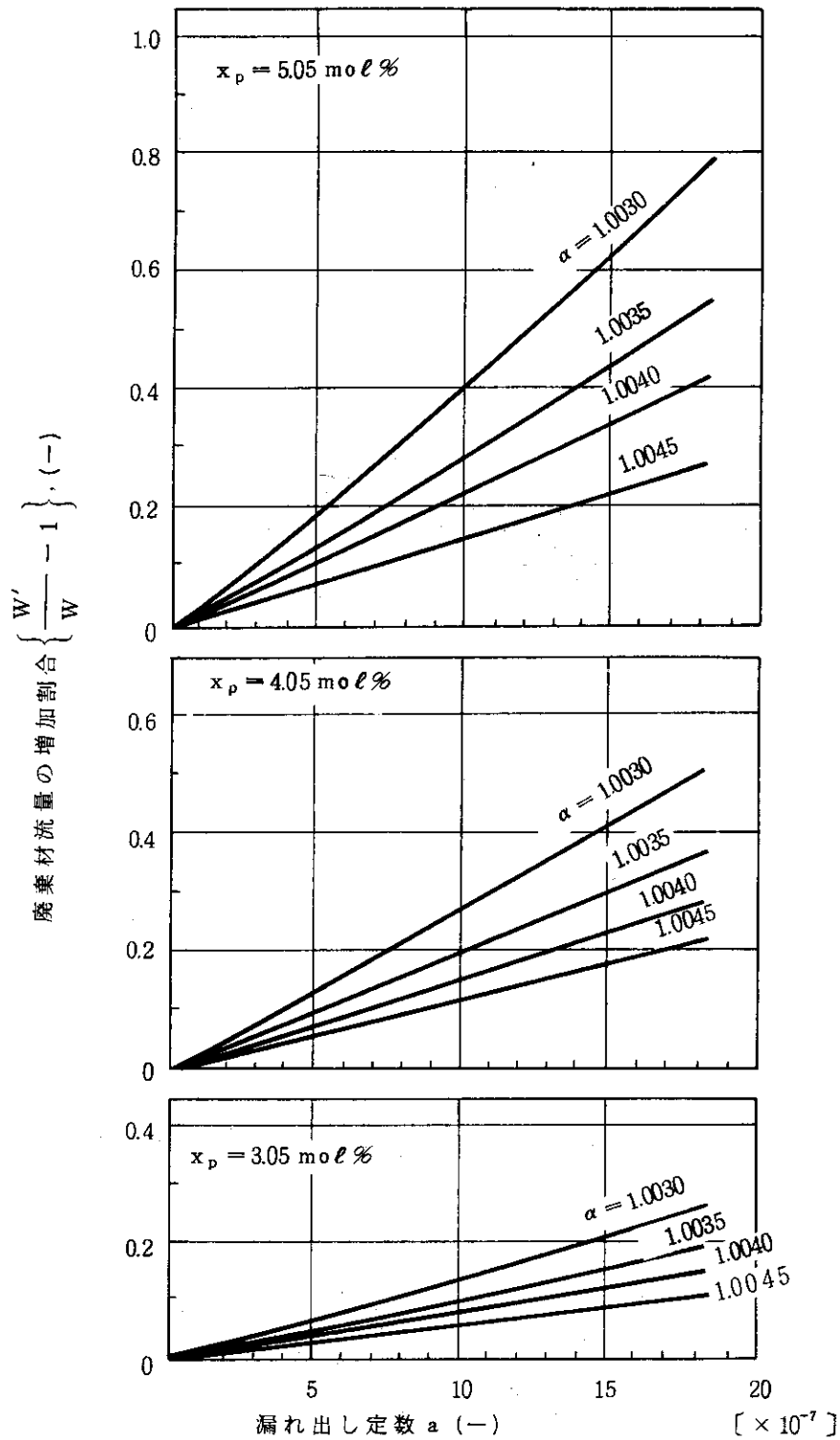


図5-13 漏れ出し流量と廃棄材流量の増加割合との関係
(理想カスケード)

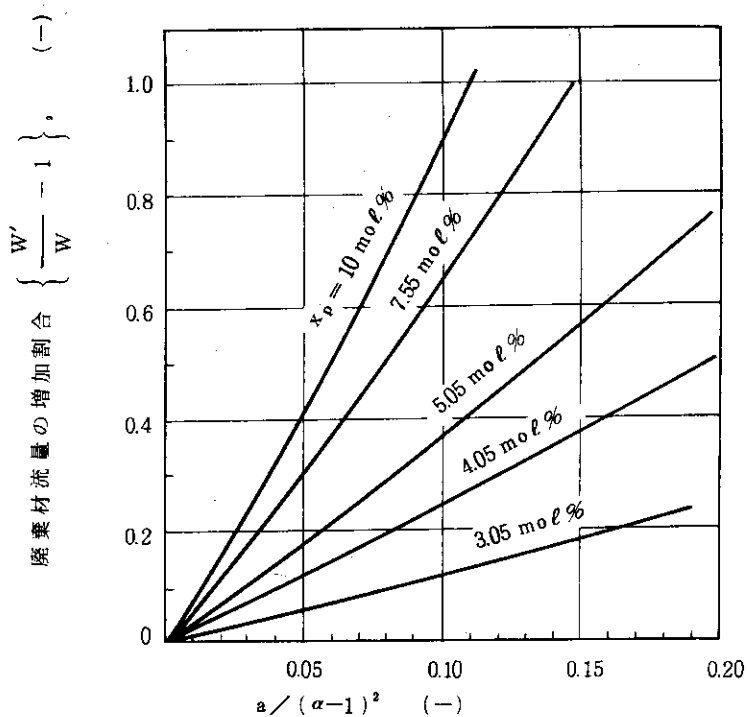


図 5 - 14 全漏れ出し流量と廃棄材流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

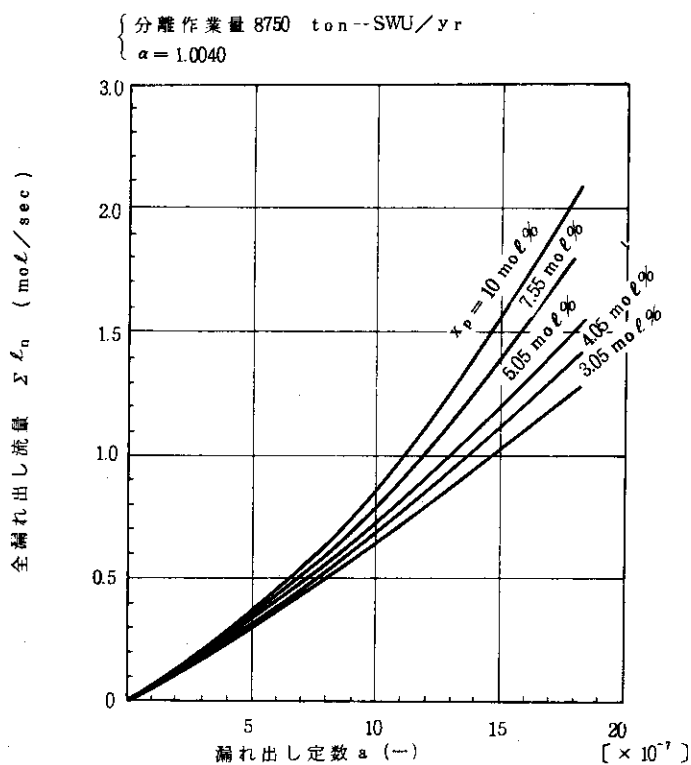


図 5 - 15 漏れ出し定数とカスケード全漏れ出し流量との関係 (理想カスケード)

分離作業量 8750 ton-SWU/yr
 $x_p = 4.05 \text{ mol}\%$

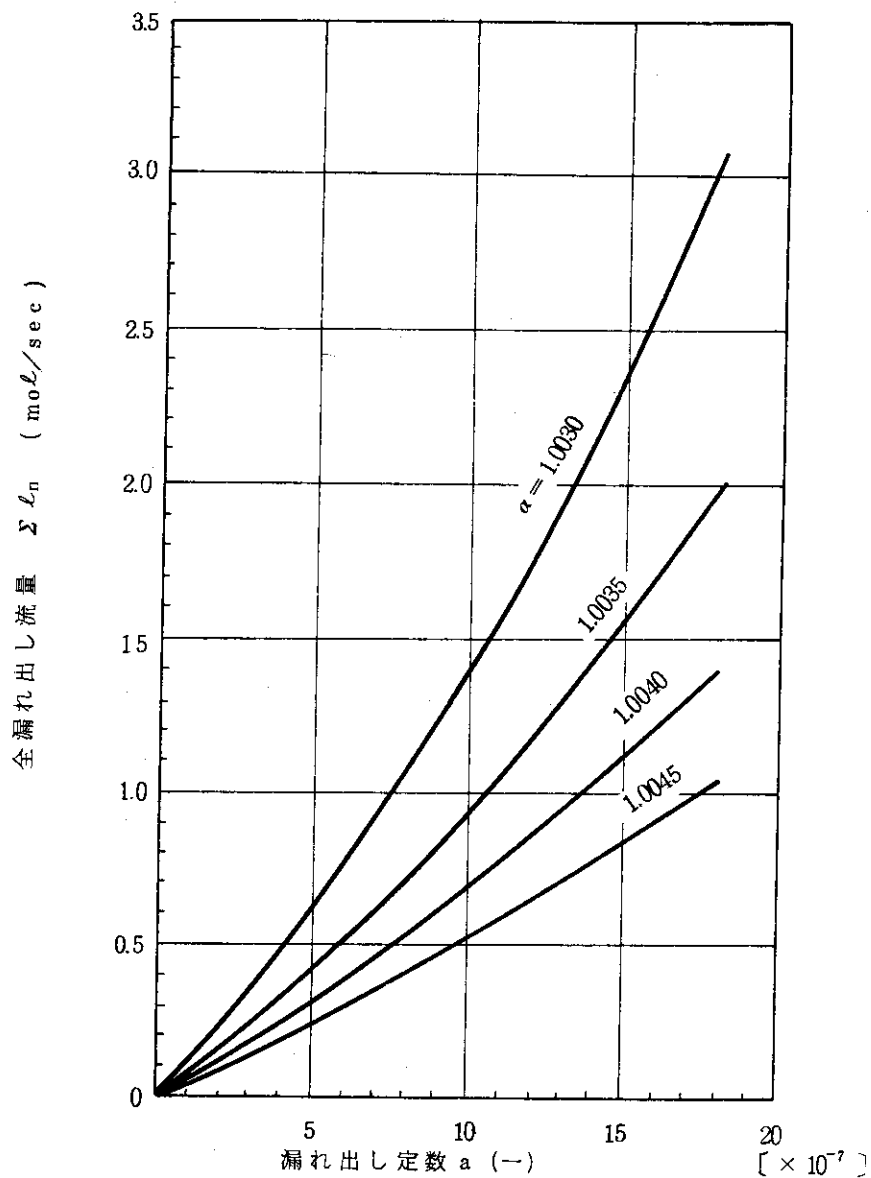


図5-16 漏れ出し定数とカスケード
 全漏れ出し量との関係
 (理想カスケード)

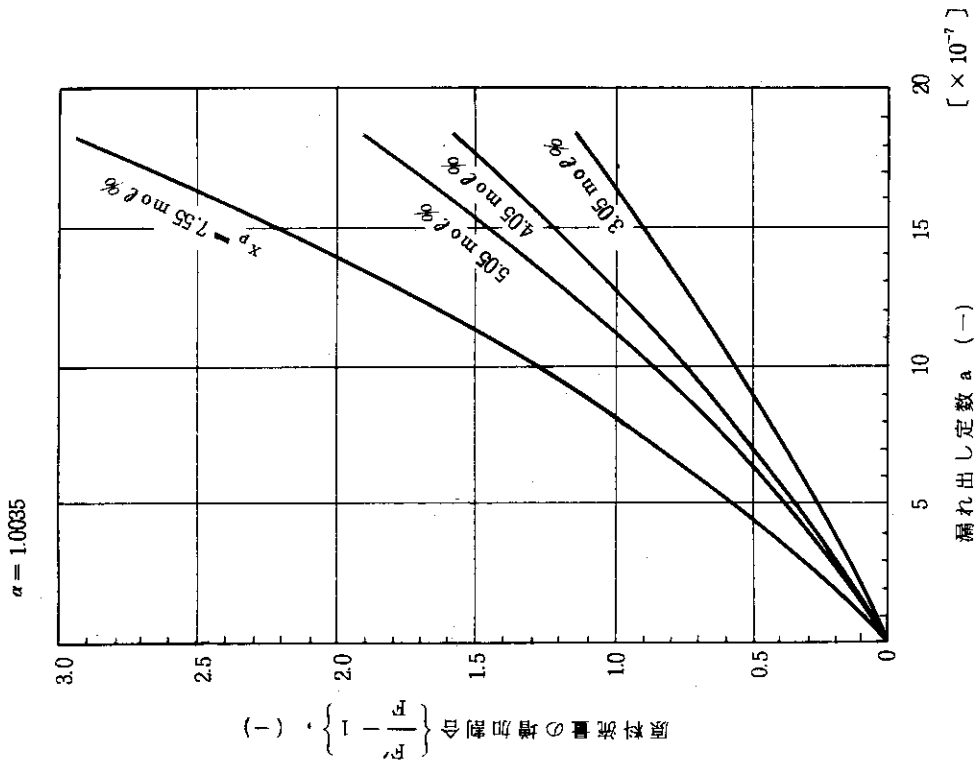


図 5-17 (b) 漏れ出し量と原料流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

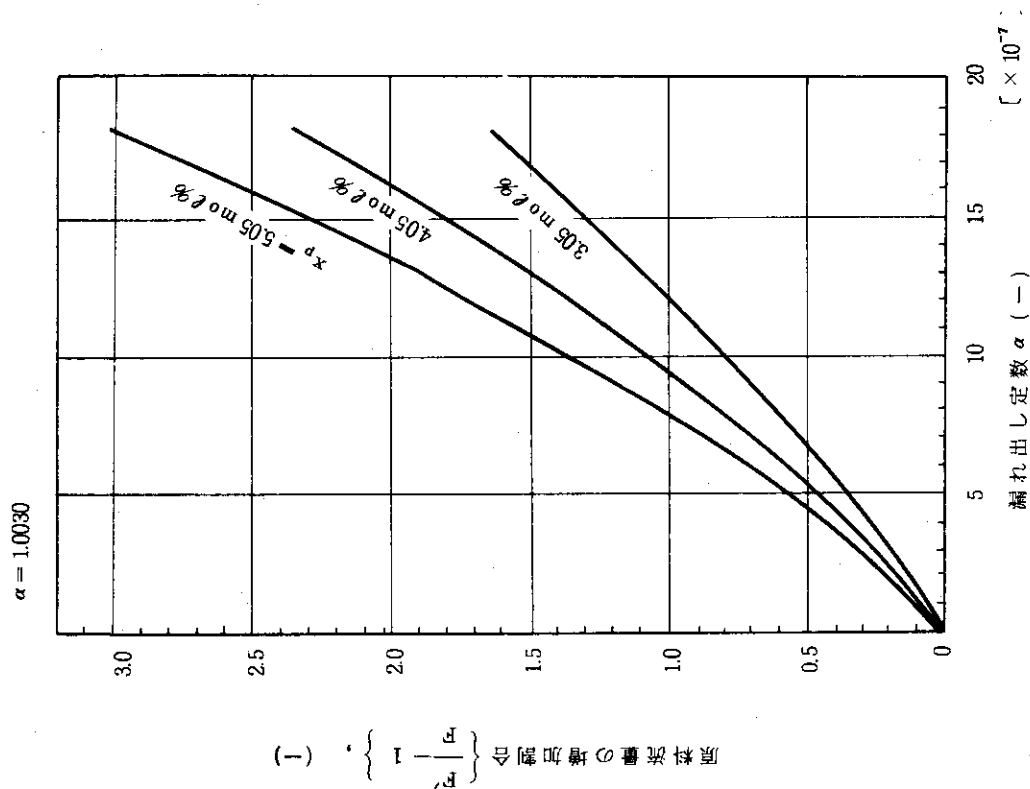


図 5-17 (a) 漏れ出し量と原料流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

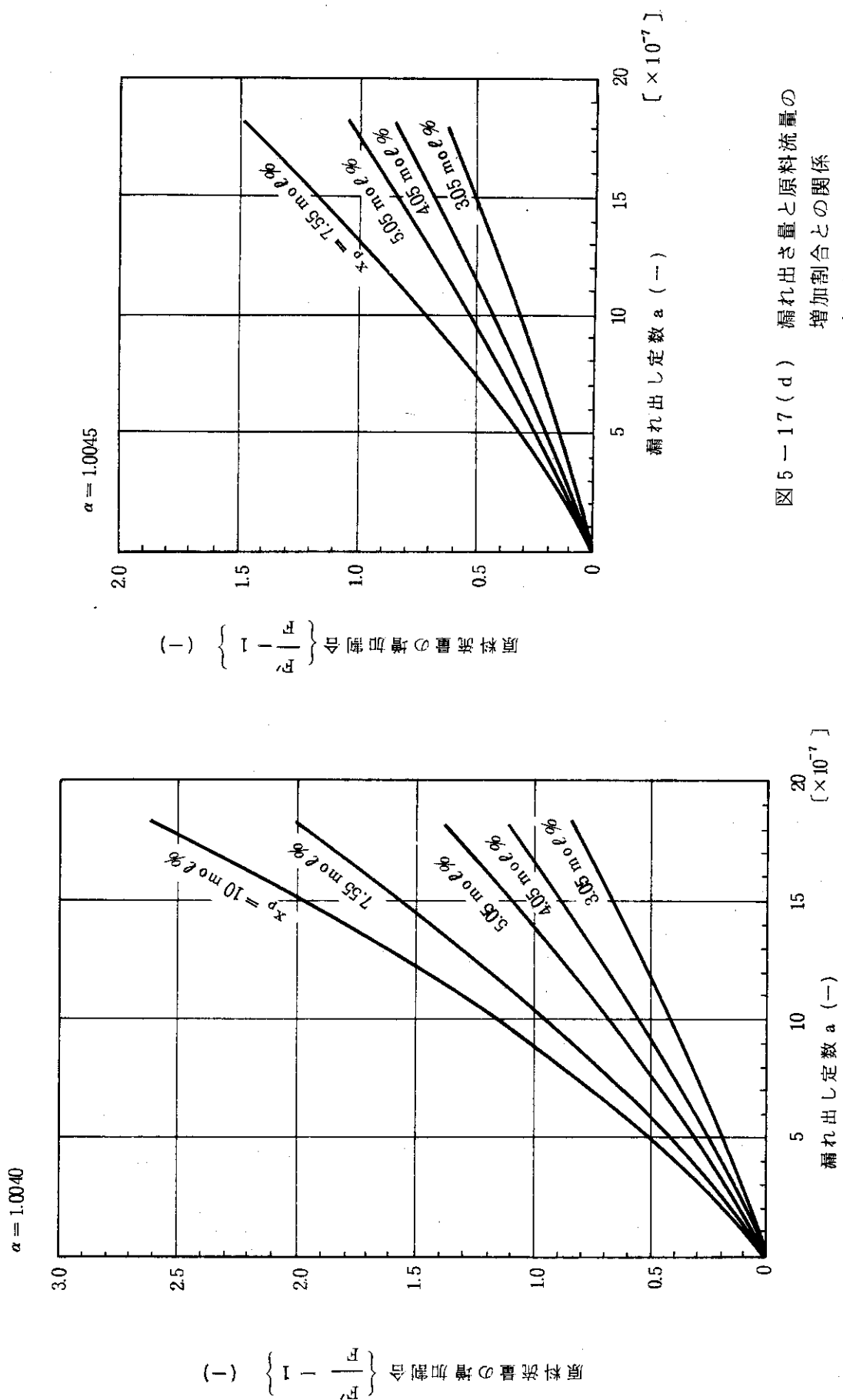


図5-17(c) 漏れ出し量と原料流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

図5-17(d) 漏れ出し量と原料流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

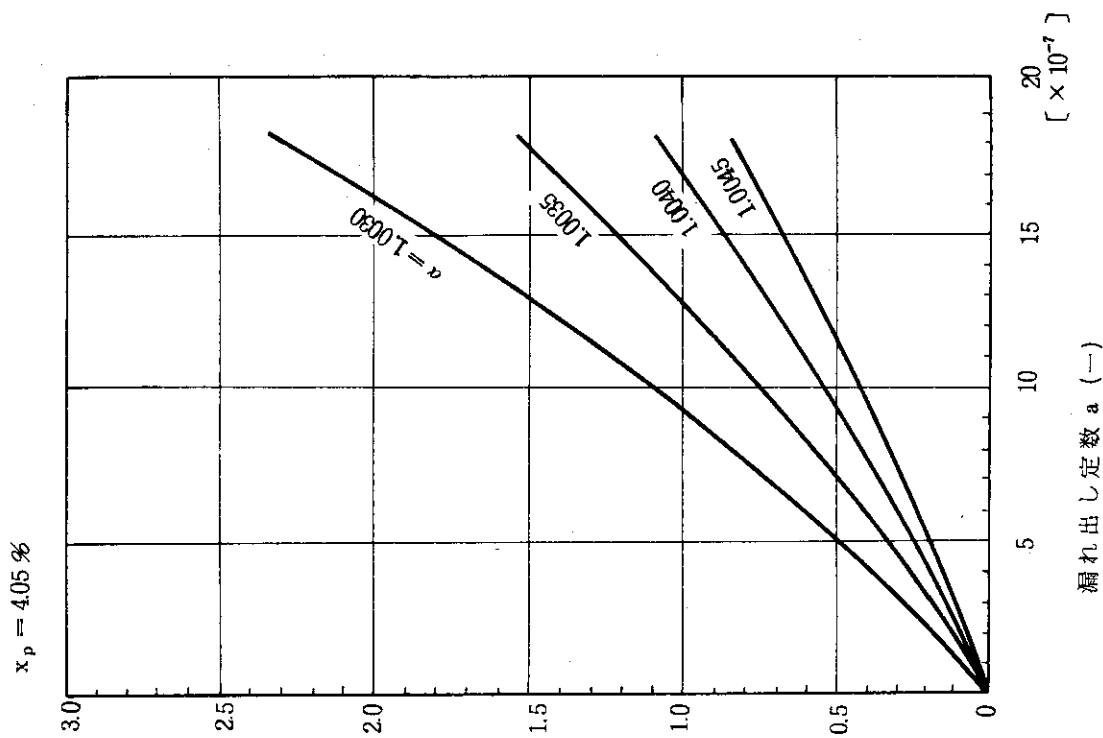


図5-18 (b) 漏れ出し量と原料流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

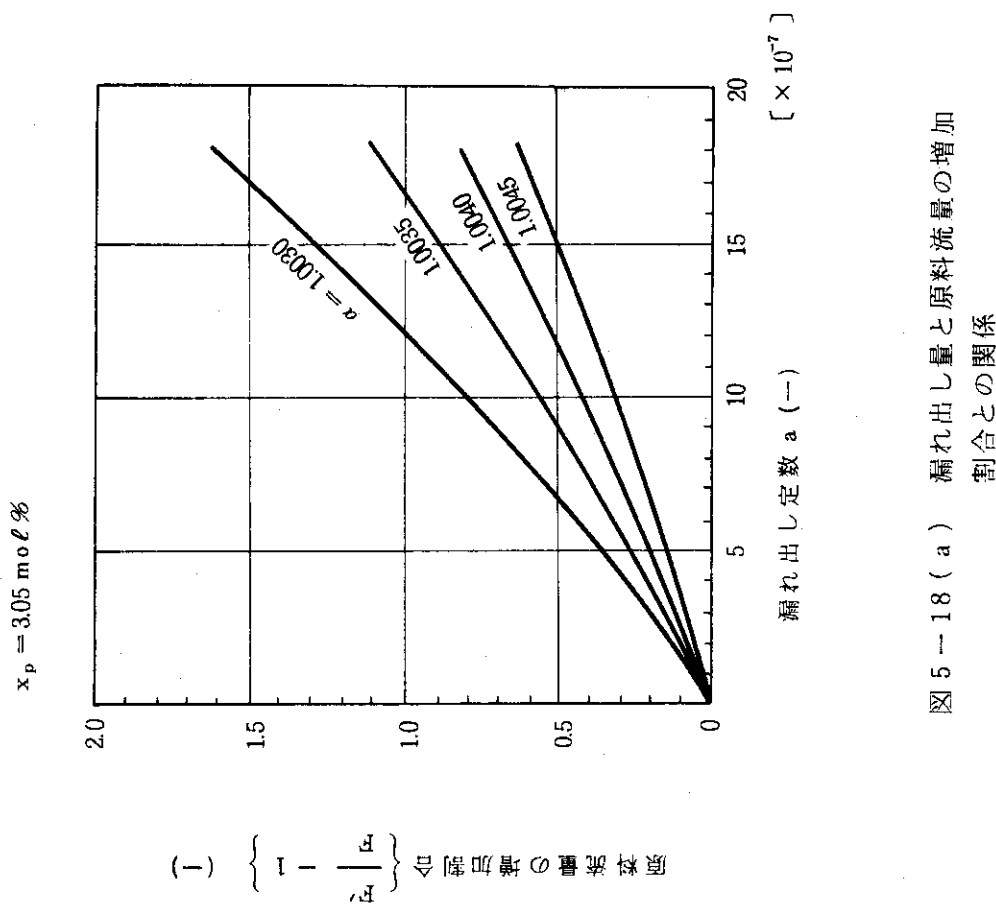


図5-18 (a) 漏れ出し量と原料流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

$$(1) \left\{ 1 - \frac{F_1}{F_2} \right\} \text{ 原料流量の増加割合}$$

$$(1) \left\{ 1 - \frac{F_1}{F_2} \right\} \text{ 原料流量の増加割合}$$

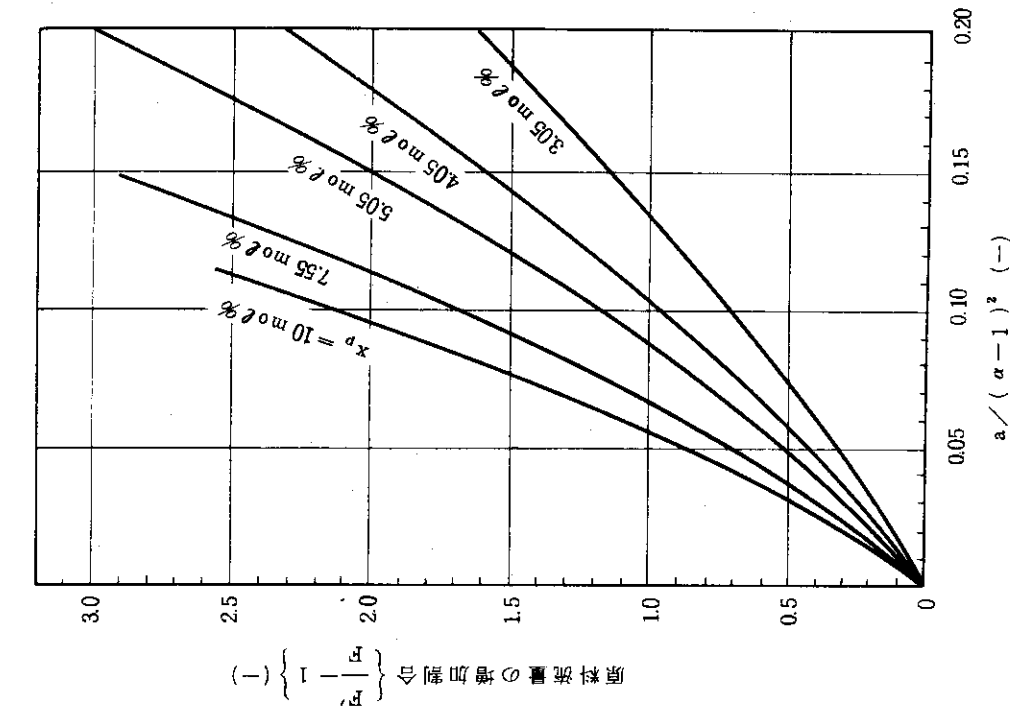


図5-19 全漏れ出し流量と原料流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

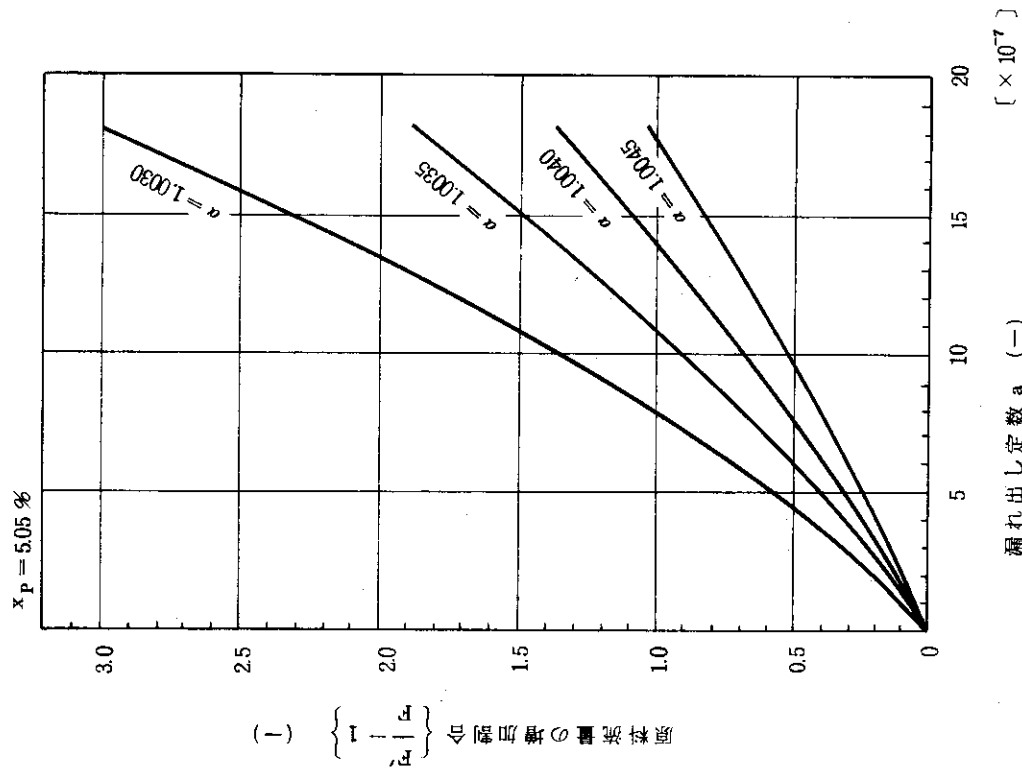


図5-18(c) 漏れ出し量と原料流量の増加割合との関係 (理想カスケード)

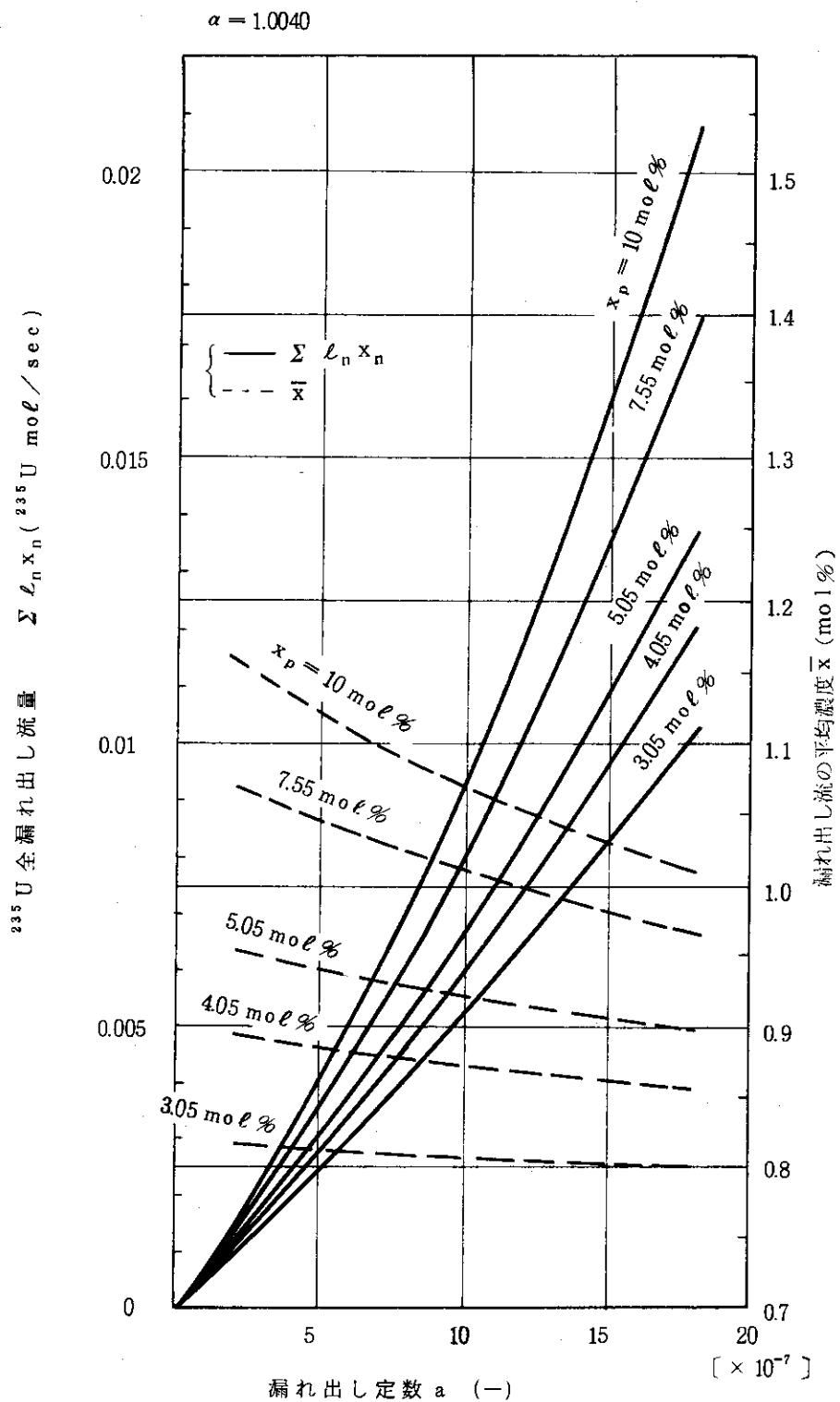


図 5 - 20 漏れ出し定数とカスケード全体から漏れ出す²³⁵U流量との関係 (理想カスケード)

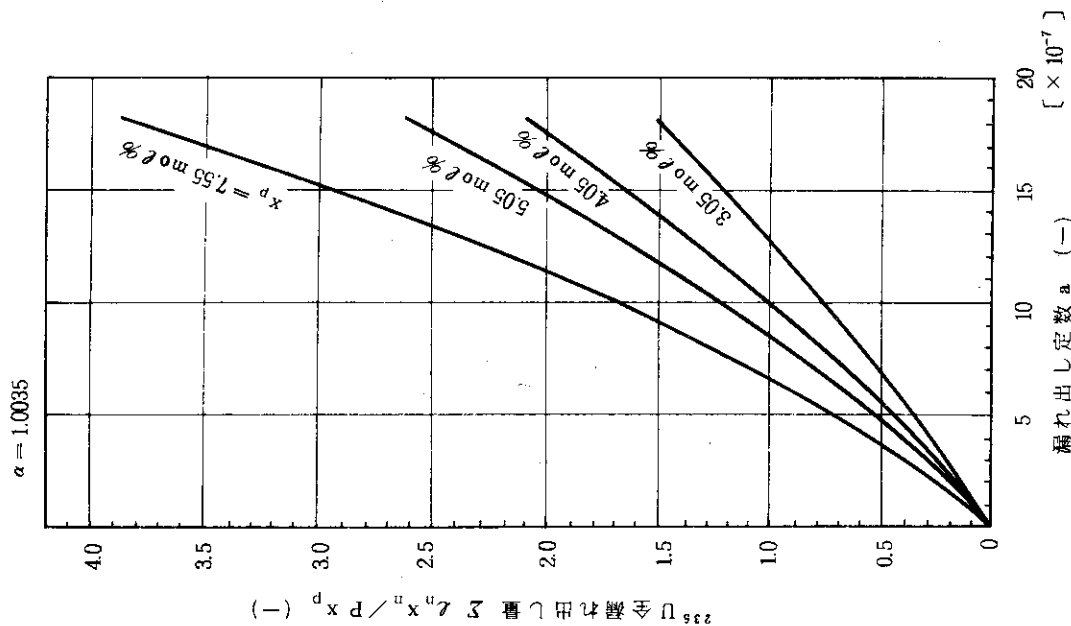


図 5-21 (a) 漏れ出し定数とカスケード全体から漏れ出す²³⁵Uとの関係 (理想カスケード)

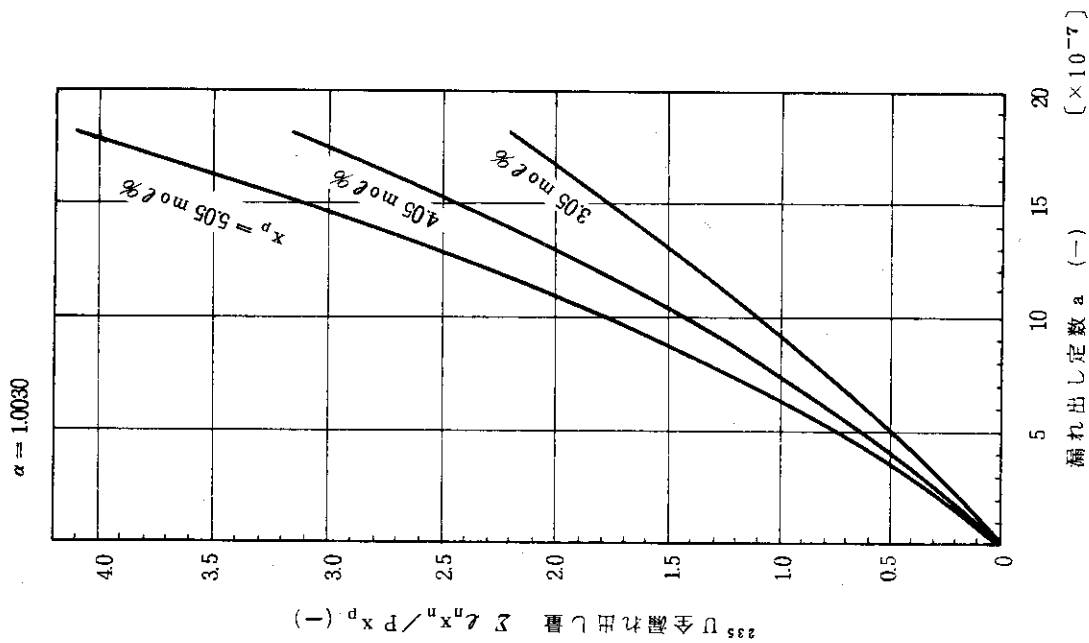


図 5-21 (b) 漏れ出し定数とカスケード全体から漏れ出す²³⁵Uとの関係 (理想カスケード)

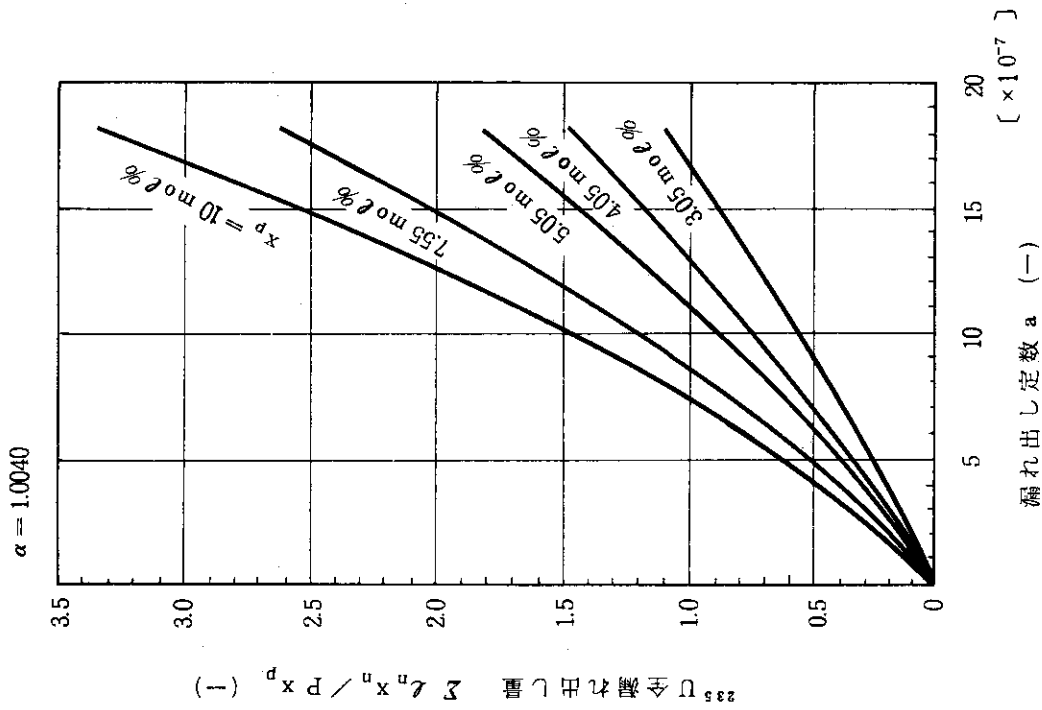


図5-21(c) 漏れ出し定数とカスケード全体から漏れ出す²³⁵Uとの関係 (理想カスケード)

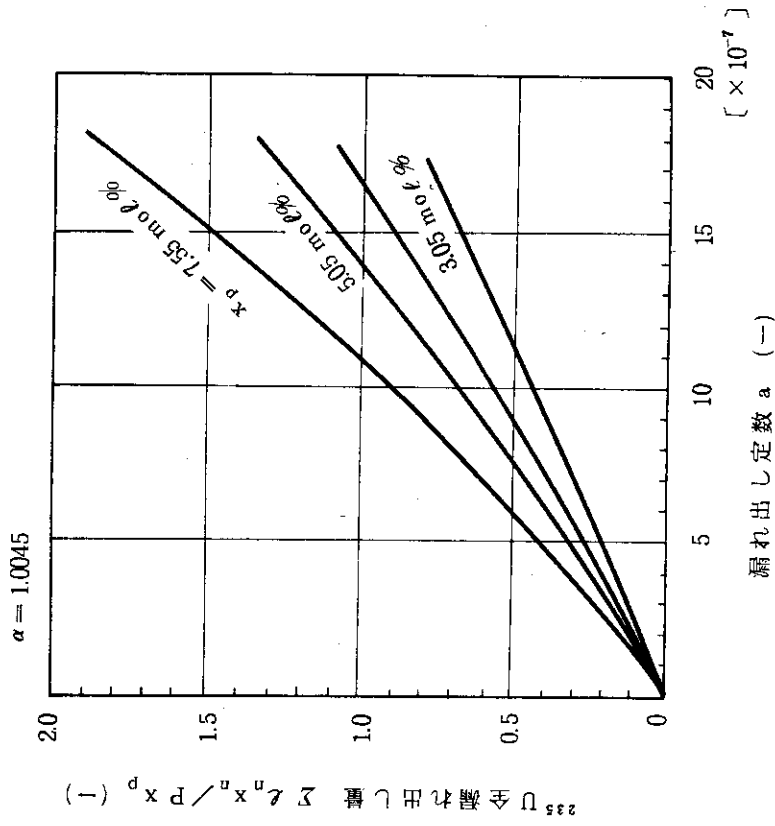


図5-21(d) 漏れ出し定数とカスケード全体から漏れ出す²³⁵Uとの関係 (理想カスケード)

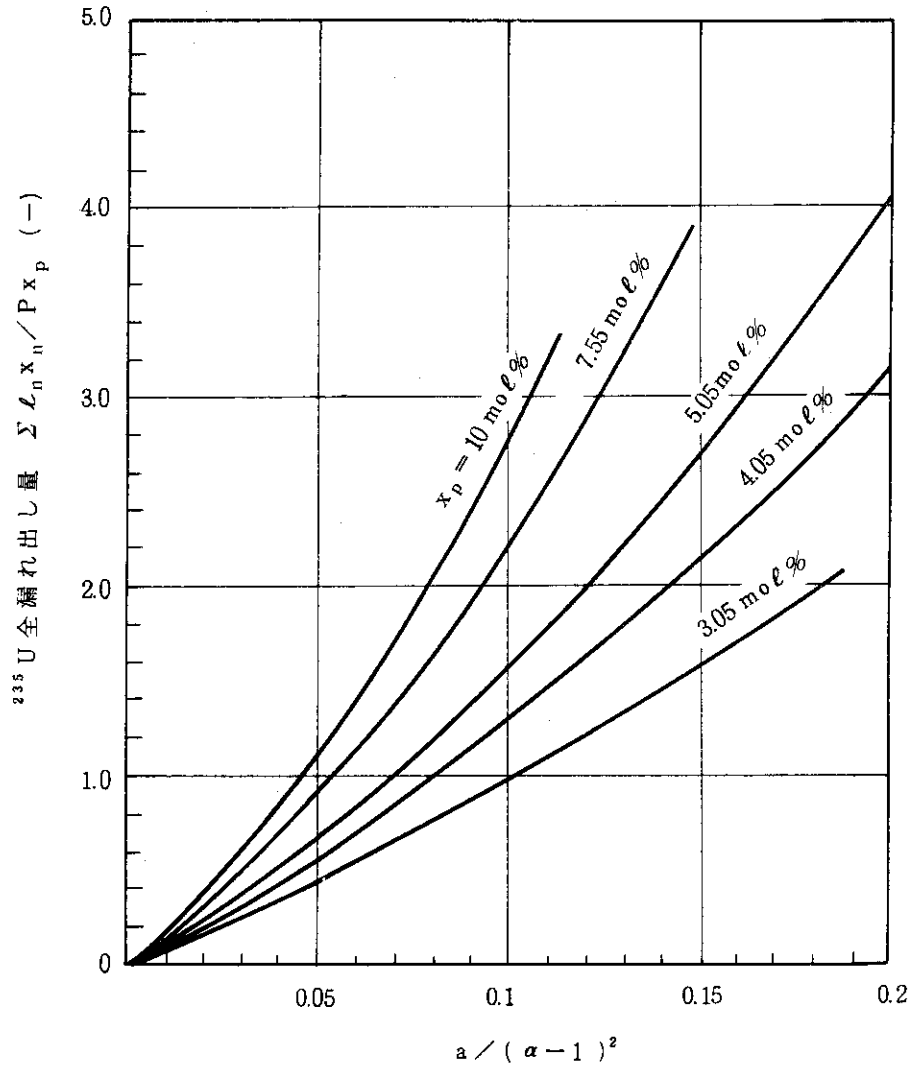


図 5 - 22 全漏れ出し流量とカスケード全体から
漏れ出す ^{235}U との関係
(理想カスケード)

6. おわりに

ガス拡散プラントにおける気密性保持の重要性を明らかにするために、気密保持の要ともいえる圧縮機軸封部からプロセスガス (UF_6) が漏れ出す場合をとり上げ、理想カスケードおよび準理想カスケードについて解析した。まず、回収部も含めたカスケード全体の静特性を定める基礎式を誘導し、次いで、漏れ出し定数、分離係数および製品濃度をパラメーターにとり、漏れ出しのカスケード循環流量、廃棄材流量、原料流量などに及ぼす影響について検討した。

その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 準理想カスケードの所要段数は、濃縮部では理想カスケードのそれより少なく、その差は分離係数および製品濃度が高くなると増大する。回収部の所要段数は両カスケードに大きな差はない。また、全循環流量については、準理想カスケードの方が理想カスケードよりも約1%程度大きく、これは分離係数および製品濃度にあまり関係しない。
- (2) 漏れ出しのカスケード静特性に及ぼす影響については、理想カスケードと準理想カスケードで大きな差は現われない。また、準理想カスケードに対して誘導した簡略式は、漏れ出しのカスケード静特性に与える影響を検討する際、大きな誤差なく使用できる。
- (3) 漏れ出しのカスケード循環流量、廃棄材流量、原料流量に及ぼす影響は、分離係数が小さいほど、また、製品濃度が高いほど顕著である。また、漏れ出しのカスケード静特性に与える影響は、漏れ出し定数とカスケード規模の積 $a/(\alpha-1)^2$ でまとめることができる。

以上のように、軸封部の漏洩量はプラントの諸特性に大きな影響を及ぼすので、カスケード設計上考慮すべき重要な因子である。

今後は、実用プラントで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解析を行うとともに、漏れ出したプロセスのカスケードでの再使用などについても検討する必要がある。

参考文献

- (1) Cohen, K ; " The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of ^{235}U ", McGraw-Hill, N. Y. (1951)
- (2) A. Apelblat & Y. Ilamed-Lehler ; IA-759, " The Theory of a Real Isotope Enriching Cascade " (1962)
- (3) 原研委託調査報告書 ; 「ウラン濃縮用圧縮機に関する検査報告書」 (1971年3月)
委託先 ; 三井造船 (株)
- (4) AEC ; " Data on New gaseous Diffusion Plants " , ORO-685 (1972)
- (5) KoRubu, H ; J. Nucl. Sci. Technol., 10[9], p. 554 (1973)

6. おわりに

ガス拡散プラントにおける気密性保持の重要性を明らかにするために、気密保持の要ともいえる圧縮機軸封部からプロセスガス (UF_6) が漏れ出す場合をとり上げ、理想カスケードおよび準理想カスケードについて解析した。まず、回収部も含めたカスケード全体の静特性を定める基礎式を誘導し、次いで、漏れ出し定数、分離係数および製品濃度をパラメーターにとり、漏れ出しのカスケード循環流量、廃棄材流量、原料流量などに及ぼす影響について検討した。

その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 準理想カスケードの所要段数は、濃縮部では理想カスケードのそれより少なく、その差は分離係数および製品濃度が高くなると増大する。回収部の所要段数は両カスケードに大きな差はない。また、全循環流量については、準理想カスケードの方が理想カスケードよりも約1%程度大きく、これは分離係数および製品濃度にあまり関係しない。
- (2) 漏れ出しのカスケード静特性に及ぼす影響については、理想カスケードと準理想カスケードで大きな差は現われない。また、準理想カスケードに対して誘導した簡略式は、漏れ出しのカスケード静特性に与える影響を検討する際、大きな誤差なく使用できる。
- (3) 漏れ出しのカスケード循環流量、廃棄材流量、原料流量に及ぼす影響は、分離係数が小さいほど、また、製品濃度が高いほど顕著である。また、漏れ出しのカスケード静特性に与える影響は、漏れ出し定数とカスケード規模の積 $a/(\alpha-1)^2$ でまとめることができる。

以上のように、軸封部の漏洩量はプラントの諸特性に大きな影響を及ぼすので、カスケード設計上考慮すべき重要な因子である。

今後は、実用プラントで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解析を行うとともに、漏れ出したプロセスのカスケードでの再使用などについても検討する必要がある。

参考文献

- (1) Cohen, K ; " The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of ^{235}U ", McGraw-Hill, N. Y. (1951)
- (2) A. Apelblat & Y. Ilamed-Lehler ; IA-759, " The Theory of a Real Isotope Enriching Cascade " (1962)
- (3) 原研委託調査報告書 ; 「ウラン濃縮用圧縮機に関する検査報告書」 (1971年3月)
委託先 ; 三井造船 (株)
- (4) AEC ; " Data on New gaseous Diffusion Plants " , ORO-685 (1972)
- (5) KoRubu, H ; J. Nucl. Sci. Technol., 10[9], p. 554 (1973)