

JAERI-M
8 5 2 7

多孔質隔膜法によるアルゴン同位体の
分離 (その3)

—Hertz型カスケードの全還流操作による分離特性—

1979年11月

吉田 浩・藤根 幸雄・齊藤恵一郎
大内 操・成瀬 雄二

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.

多孔質隔膜法によるアルゴン同位体の分離(その3)
(Hertz型カスケードの全還流操作による分離特性)

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

吉田 浩・藤根 幸雄・斉藤恵一朗

大内 操⁺・成瀬 雄二

(1979年10月4日受理)

本報告は、アルミナ隔膜を用いた5段のカスケード実験装置によるアルゴン同位体分離研究のうち、拡散筒を2分割してHertz型カスケードに組んだ場合の全還流条件で行った分離特性と流動特性に関する実験について述べたものである。

本研究により、まず、2分割型拡散筒を用いたHertz型カスケードは、カットの効果を最大限に活用できる濃縮方式であり、段分離係数を大幅に向上できる特徴を有していることを明らかにした。さらに、このカスケード方式の流動特性は安定しており、運転操作も容易であること、ならびに平衡達成期間は、各段にリサイクル流を設けているため方形カスケードより長くなることが判明した。

Separation of Argon Isotopes by Porous Membrane Method (Part III)
Separation Characteristics of Hertz Cascade
under Total Reflux

Hiroshi YOSHIDA, Sachio FUJINE, Keiichiro SAITO,
Misao OUCHI^{*} and Yuji NARUSE

Separation Engineering Laboratory, Division of Nuclear Fuel Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 4, 1979)

Separation experiments of argon isotopes were carried out under total reflux condition to study cascade characteristics of the Hertz-type cascade composed of two-compartment diffusers.

The results are as follows.

- (1) The cascade is excellent in ease of operation and controllability.
- (2) The stage separation factor is improved by increasing the recycle flow rate in two-compartment diffuser. Contribution of the cut effect to the separation factor in each compartment thus becomes large.
- (3) The marked reduction of the required number of the stages can be expected by adopting the two-compartment diffusers.

Keywords : Isotope Separation, Porous Membrane, Hertz Cascade, Two-Compartment Diffuser, Stage Separation Factor, Cut Effect, Stage Numbers, Total Reflux, Equilibrium Time

* Division of Chemistry Laboratory, Tokai Research Establishment,
JAERI

目 次

1. はじめに	1
2. Hertz 型カスケードの特徴	2
2.1 カスケード構成	2
2.2 分離係数	2
2.3 カット	3
3. 実 験	10
3.1 実験装置	10
3.2 実験方法	10
4. 実験結果および考察	16
4.1 カスケード内濃度の経時変化	16
4.2 カスケード段方向の濃度分布	17
4.3 分割比と段分離特性との関係	18
4.4 操作圧力と段分離特性との関係	20
4.5 分離係数に影響する因子	21
5. ま と め	41
謝 辞	42
参考文献	42
附表 1 カスケードの運転条件	43
附表 2 カスケード内における ^{36}Ar の濃度分布	48

List of Contents

1. Introduction	1
2. Feature of Hertz Cascade	2
2.1 Cascade flowsheet	2
2.2 Separation factor	2
2.3 Cut	3
3. Experimental	10
3.1 Experimental apparatus	10
3.2 Experimental procedure	10
4. Result and Discussion	16
4.1 Start-up characteristics of cascade	16
4.2 Concentration profile in cascade	17
4.3 Effect of recycle flow ratio on stage separation characterisitcs	18
4.4 Effect of operating pressure on stage separation characteristics	20
4.5 Parameters affecting separation factor	21
5. Conclusion	41
Acknowledgement	42
References	42
Appendix ;	
Table 1 : Operating conditions of cascade	43
Table 2 : Concentration profile of ^{36}Ar in cascade	48

1. は じ め に

多孔質隔膜法における理論的な分離係数 α_0 は、ガス分子の分子量の比の平方根で表わされるため、同位体混合ガスの分離を行う場合には一般に小さな値となる。特に、ウラン同位体分離 ($^{238}\text{U}_6 / ^{235}\text{UF}_6$) の場合の分離係数 α_0 は 1.00429 と非常に小さく、低濃縮ウラン (約 3%) 生産用のガス拡散プラントでも所要段数は約 1000 段程度となり、プラントの規模および所要動力は膨大となる。

多孔質隔膜法におけるこの欠点を改善するために、隔膜の高性能化 (分離効率および透過係数の向上) をはかるとともに拡散筒の最適な設計法の検討がなされている。本報告書にとり上げた Hertz 型カスケードは、2つの分離器からなる2分割型拡散筒を用いることによって、1段あたりの見掛けの分離係数を高めプラントの所要段数を大幅に削減しようとするものであり、その静特性については JAERI-M 6501¹⁾ において既に報告した通りである。

本報告書は、ガス拡散プラントの設計、操作上の問題点を把握することを目的として製作した5段のカスケード実験装置による一連のアルゴン同位体分離研究のうち、Hertz 型カスケードの全還流操作による分離実験結果をまとめたものである。すなわち、Hertz 型カスケードの分離特性および流動特性と2分割型拡散筒の分割比との相関関係を中心に整理し、あわせて前報 JAERI-M 8374²⁾ に報告した通常型方形カスケードの全還条件における分離特性との比較を行っている。

2. Hertz 型カスケードの特徴

2.1 カスケード構成

図 2.1 は、濃縮部および回収部をそれぞれ 3 段および 2 段とする 5 段の Hertz 型カスケードの基本構成を通常の方形カスケードと対比して示したものである。図において、原料流は第 3 段供給流にフィードされ、製品流は第 5 段第 1 拡散流（方形カスケードでは拡散流）から、廃棄流は第 1 段未拡散流から抽出される。ただし本実験では、カスケードの全還流条件における分離特性および運転特性を調べるために、上記の供給・抽出し操作は行っていない（ $F=0$ 、 $P=0$ 、 $W=0$ ）。

ここで、Hertz 型カスケードの 1 段は第 1 分離器 A および第 2 分離器 B よりなる 2 分割型拡散筒で構成されており、拡散筒の全長および拡散筒内の隔膜面積は方形カスケードにおける拡散筒と等しくなっている。図に示した 2 分割型拡散筒は、分割比（三第 2 拡散流量 / 第 1 拡散流量）が 3 の場合であるが、後述するように拡散筒構造および第 2 拡散流配管を組み変えることにより分割比を 1 および $1/3$ とすることも可能である。

2.2 分離係数

いま、第 3 段拡散筒まわりの流れに着目すると、供給流（ L_3, X_3 ）は第 1 分離器 A_3 の隔膜管内側に導入され、軽成分の濃くなった第 1 拡散流（ l'_3, x'_3 ）と軽成分の薄くなった第 1 未拡散流（ $L_3 - l'_3, x_3$ ）とに分離される。第 1 未拡散流はさらに第 2 分離器 B_3 に入り、第 2 拡散流（ l''_3, x''_3 ）と第 2 未拡散流（ L''_3, X''_3 ）とに分けられる。隔膜より流出する拡散流は、拡散筒の長さ方向に濃度分布が生じており、軽成分濃度は第 1 分離器入口部分 > 第 2 分離器入口部分 > 第 2 未拡散流出口部分の順序となる。濃度の最も高い第 1 拡散流は上段（第 4 段）の供給流へ送ってさらに濃縮し、中間濃度の第 2 拡散流は自己段の供給流にリサイクルする。濃度の最も低い第 2 未拡散流（以後これを未拡散流と呼ぶ）は下段（第 2 段）の供給流に送り、軽成分の回収をはかる。これに対し、通常の方形カスケードの場合には、供給流（ L_3, x_3 ）を拡散流（ L'_3, x'_3 ）と未拡散流（ L''_3, x''_3 ）とに分離しそれぞれを上段および下段に送るので、拡散流濃度は拡散筒長さ方向の濃度分布の平均値となる。

以上の説明から明らかなように、拡散流を濃度の高い第 1 拡散流と濃度の低い第 2 拡散流とに 2 分割して、前者を上段へ送り後者を自己の段の供給流として再利用する Hertz 型カスケードでは、1 段あたりの見掛けの分離係数を方形カスケードの段分離係数より大幅に高めることが可能であり、その増加の度合は分割比を増すほど大きくなるものと期待される。

2 分割型拡散筒の分離係数は以下の各式によって定義される。

段分離係数 α_s ;

$$\alpha_s = \frac{x'(1-X'')}{(1-x')X''} \dots\dots\dots (2.1)$$

第1分離器の分離係数 α_1 , 頭分離係数 β_1 ;

$$\alpha_1 = \frac{x'(1-x)}{(1-x')x} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\beta_1 = \frac{x'(1-X)}{(1-x')X} \dots\dots\dots (2.3)$$

第2分離器の分離係数 α_2 , 頭分離係数 β_2 ;

$$\alpha_2 = \frac{x''(1-X'')}{(1-x'')X''} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\beta_2 = \frac{x''(1-x)}{(1-x'')x} \dots\dots\dots (2.5)$$

なお、段分離係数と第1, 第2分離器における分離係数との間に次の関係が成り立っている。

$$\alpha_s = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\beta_2} \dots\dots\dots (2.6)$$

2.3 カット

拡散筒の分離係数は、拡散筒の操作条件（圧力、圧力比、流量など）および形状、隔膜特性（細孔直径、空隙率、厚み、迷路度など）、ガスの物理・化学的性質などに基づく種々の因子の影響を受けて変化する。これらの影響は、通常、逆拡散の効果 Z_1 , Present-de Bethune の効果（粘性流の影響） Z_2 , 境界層の効果 Z_3 , 表面拡散流の効果 Z_4 , 流れ様式の効果 Z_5 として整理されている。このうち、流れ様式の効果は拡散筒の分離係数を高めることが期待される因子であり、拡散筒の設計においては、この効果が最も大きくなる向流型の流れ様式が採用される。本実験に用いた拡散筒（交流型）では、隔膜近傍の流れは隔膜の構造上（管状焼結体の内面に隔膜を圧着したもの）むしろ十字流型になっていると考えられ、流れ様式の効果は次式で表わされるようにカットの大きさによって変化する。

$$Z_5 = \frac{1}{\theta} \ln \frac{1}{1-\theta} \dots\dots\dots (2.7)$$

ここで、 θ は、カットと呼ばれるもので、拡散流量／供給流量なる流量比である。

本拡散筒を通常の方形カスケードに組込んだ場合の Z_5 の値は、カットが一定値 0.50 (全還流条件のとき) であることから、1.386 に固定される。

図 2.2 は、2分割型拡散筒における分割比 r と第 1 分離器および第 2 分離器におけるカット θ_1 、 θ_2 との関係を示したものである。ここで、 θ_1 、 θ_2 は、各分離器の供給流量に対する第 1、第 2 拡散流量の比、即ち l'/L 、 $l''/L-l'$ で定義されるものであり、拡散筒まわりの流量収支より次式で表わされる。

$$r = \frac{l''}{l'} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

$$\theta_1 = \frac{l'}{L} = \frac{l'}{l' + l'' + L''} = \frac{1}{r + 2} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\theta_2 = \frac{l''}{L - l'} = \frac{l''}{l'' + L''} = \frac{r}{r + 1} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

ただし、 $l' = L''$ (全還流条件)

図より分かるように、Hertz 型カスケードでは、2分割型拡散筒の分割比を変えることにより各分離器におけるカットを任意に選ぶことが可能であり、方形カスケードの場合のカットが一定値に固定されることと大きな違いとなっている。

表 2.1 は、通常型および 2分割型拡散筒における流動条件(全還流条件)を示したものである。2分割型拡散筒については、今回の実験に用いた分割比 1 および 3 の場合を示している。ここで、1 段あたりの隔膜面積および拡散筒の操作圧力(供給流圧力、隔膜前後の差圧)は両形式について等しいものとする。

いま、通常型拡散筒の流量を基準にして 2分割型拡散筒の処理流量を比較してみる。通常型拡散筒の拡散流量 L' を 1 (未拡散流量 L'' および供給流量 L はそれぞれ 1 および 2 となる) とすると、2分割型拡散筒では、第 1 拡散流量 l' および未拡散流量 L'' は上記分割比に応じてそれぞれ $1/2$ 、 $1/4$ となり、第 2 拡散流量 l'' は $1/2$ 、 $3/4$ となる。この結果、供給流量 L はそれぞれ $3/2$ 、 $5/4$ となり、分割比を増すほど 1 段あたりの循環流量が減少することが分かる。各分割比におけるカット θ_1 、 θ_2 はそれぞれ ($1/3$ 、 $1/2$) および ($1/5$ 、 $3/4$) となる。

表 2.1 拡散筒形式と流動条件の関係*

拡散筒形式	通常型	2分割型	
		1	3
分割比 r	—	1	3
拡散流量 L' 第1拡散流量 l'	1	1/2	1/4
第2拡散流量 l''	—	1/2	3/4
未拡散流量 L''	1	1/2	1/4
供給流量 L	2	3/2	5/4
拡散筒のカット θ	1/2	—	—
第1分離器のカット θ_1	—	1/3	1/5
第2分離器のカット θ_2	—	1/2	3/4

- * [
- 1段あたりの隔膜面積，拡散筒の操作圧力（供給流圧力，隔膜前後の差圧）は一定。
 - 全還流条件の場合。
-]

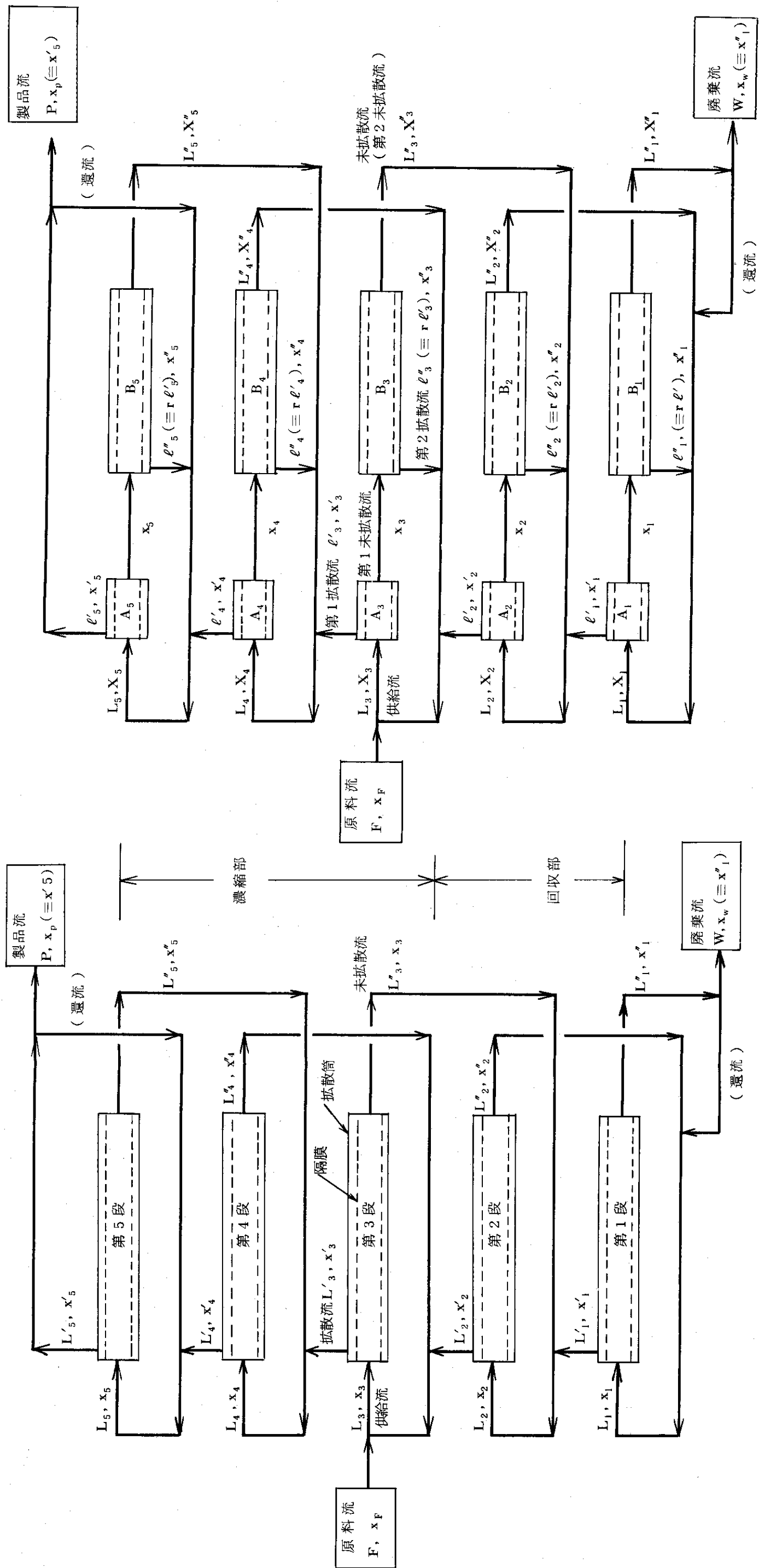


図 2.1 方形カスケードおよび Hertz 型カスケードの全体構成
 [本研究では全還流条件で実験を行っているため, 原料の供給および
 [製品・廃棄流の抽出は行っていない ($F=0, P=0, W=0$)).]

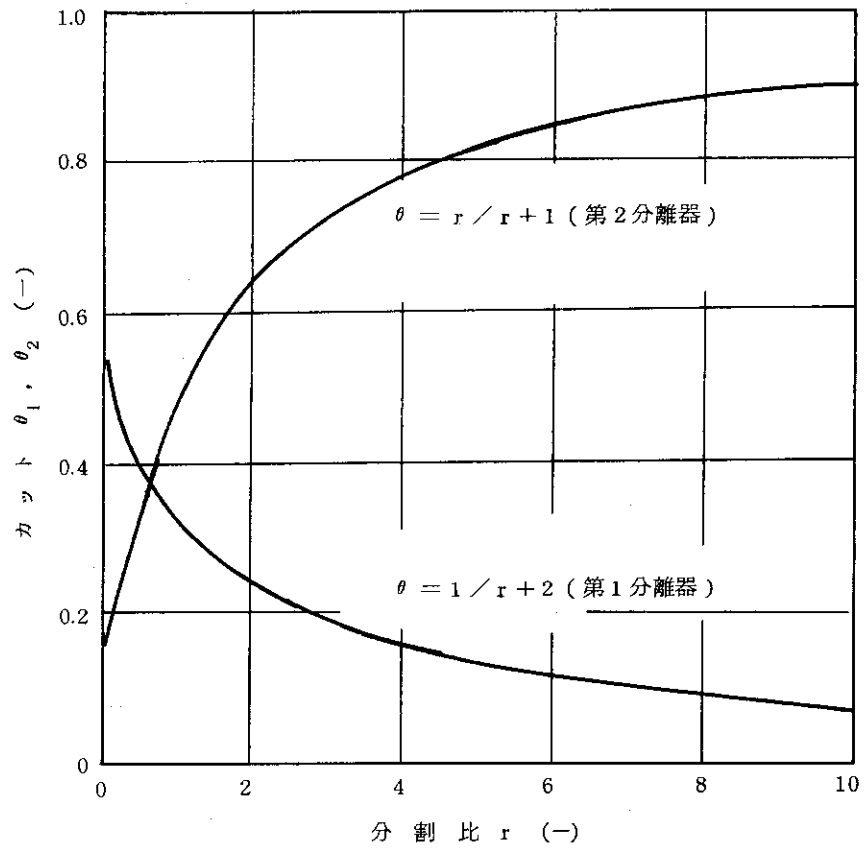


図 2.2 2分割型拡散筒における分割比とカットの関係

$$\left[\begin{array}{l} r = \frac{\text{第2拡散流量}}{\text{第1拡散流量}} \\ \theta_1 = \frac{\text{第1拡散流量}}{\text{供給流量}} \\ \theta_2 = \frac{\text{第2拡散流量}}{\text{第1未拡散流量}} \end{array} \right.$$

3. 実 験

3.1 実験装置

本研究に使用した実験装置はアルミナ製の管状隔膜を内蔵した寸法の等しい拡散筒5基から構成されており、そのカスケード部は見掛け上方形カスケードとなっている。本装置は、図3・1に示したように、原料ガス供給部、製品流拔出し部、廃棄流拔出し部を備えており、全還流または定常供給・拔出し操作による分離実験を行うことができる。また、原料ガスの供給段を任意に変更することが可能であり、カスケードの濃縮部または回収部のみを対象とすることができる。本装置の大きな特徴は、通常の方形カスケード以外に、拡散流を拡散筒内の流れの方向に2分割することのできる2分割型拡散筒を基本とする Hertz 型カスケードの実験ができることである。

表3.1は、実験装置の概略の仕様を示したものである。本カスケードシステムを構成するプロセス配管系、真空排気およびサンプリング系、機器・計器類および制御機構の詳細仕様、運転特性については、JAERI-M 782²⁾ およびJAERI-M 837⁴⁾ に報告した通りである。

図3.2は、2分割型拡散筒の構造および取付け方法を示したものである。拡散筒は、中心部分に管状の隔膜(有効単位長さ1m、直径19mm O.D.)を装着した円筒状の拡散器(単位長さ約1m、直径57.2mm I.D.)4本をフランジにより連結したものであり、供給流ノズル、第1および第2拡散流ノズル、未拡散流ノズルが設けられている。拡散筒の分割は、各拡散器の接続部分に拡散流分割用の仕切り板を挿入することにより行い、仕切り板の挿入位置により分割比を3通りに変えることが可能となっている。各拡散器の接続部分には、隔膜管の内側(供給流路; 高圧側)と外側(拡散流路; 低圧側)との間の内部リークの遮断ならびに拡散筒外部(大気側)と拡散筒内部(拡散流路; 低圧側)との間の外部リークの防止のために、それぞれOリングG₁、G₂ およびG₃、G₄ (ネオプレン製)を設け、気密性を確保している。なお、供給流および未拡散流ノズルに取付けられた圧力損失検出ノズルは、隔膜管内における圧力損失を測定するためのものである。

一方、隔膜管は、ニッケル焼結管(厚み約1.1mm)を補強体とし、その内側にアルミナ(厚み約150 μ)を圧着したものである。表3.2は、分割比を1または3とした場合の各段における第1、第2分離器の隔膜特性値を示したものであり、透過係数は $0.72\sim 0.75\times 10^{-5}$ mol-Ar/cm²·cmHg·min、分離効率は約92%となっている。

3.2 実験方法

(1) カスケードの起動方法

カスケードの起動は、通常型方形カスケードの全還流操作の場合とほぼ同様の方法で行うこ

とができる。先ず、カスケード内を十分に真空排気するとともに、装置全体の気密性が保持されていることを確認する。次いで、目標とする操作圧力（拡散筒供給圧力、圧力比）に相当する原料ガス（アルゴンガス）を各段均一に充填し、各段をそれぞれのバイパスラインを用いて単独に運転する。各段における圧力および流量が全還流操作時の定常状態に接近した時点で、全段の連結運転に入る。このときの流路の切換えは、遠隔操作弁により全段同時に行うことができる。

各段の圧力制御は供給流圧力（高圧側圧力）が一定となるように未拡散流量を調整することにより行いが、時間の経過とともに、設定値に応じて定まる各段のガスインベントリと充填ガスとの不整合が最下段にしわ寄せられるので、第1段目においてガスインベントリの調整を行う必要がある。

(2) 分析方法

実験ガスの分析には、Varian Mat 社製の質量分析計CH-7（ダブルインレット・ダブルコレクター式）およびCH-4（シングルコレクター式）を併用した。即ち、カスケード内における ^{36}Ar の濃度分布を求めるために、前者によりサンプルガスおよび原料ガス（標準ガス）の同位体比の比を測定し、後者により原料ガスの真の同位体比を測定した（これらの分析値より、 ^{36}Ar 濃度を計算する方法については前報参照²⁾）。なお、原料ガスとしては、市販のアルゴンガス（純度99.99%）を用いた。

(3) 流量の測定

カスケード各部の流量は、すべてアルゴンガス用に較正した質量流量計で測定した。しかし、本実験段階では、第2拡散流量を測定するための流量計が取付けられていなかったため、これを次式により算定した。

$$l'' = r \cdot l' \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} \right) \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、 l' , l'' ; 第1, 第2拡散流量 (Std l/min)

Δp_1 , Δp_2 ; 第1, 第2分離器における隔膜前後の差圧 (cmHg)

Q_1 , Q_2 ; 第1, 第2分離器における隔膜の透過係数
(mol-Ar/cm²·cmHg·min)

表 3.1 カスケード実験装置の概略仕様

構成機器	概 略 仕 様
カスケード	形 式 ; Hertz 型 段 数 ; 5 段 制御方式 ; 圧力制御 (拡散筒供給流圧力を未拡散流量自動調整弁により設定値に保持する) 気 密 性 ; ヘリウムリーク量 $8.2 \times 10^{-6} \text{ atm} \cdot \text{cc} / \text{sec}$
隔 膜	材 質 ; アルミナ製 (補強体 ; ニッケル焼結管) 形 状 ; 管 状 寸 法 ; $19 \text{ mm O.D.} \times 1000 \text{ mm L} \times 4$ 本 (拡散筒のフランジ部分で連結) 透過係数 ; $0.72 \sim 0.75 \times 10^{-5} \text{ mol-Ar} / \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg} \cdot \text{min}$ 分離効率 ; 92% (高圧側 500 mmHg, 低圧側 0 mmHg のときのアルゴン同位体 $^{36}\text{Ar} / ^{40}\text{Ar}$ に対する値)
拡 散 筒	形 式 ; 2 分割型 分 割 比 ; 可変 (3, 1, 1/3 の 3 通り) 全 長 ; 4.6 m 有効寸法 ; $57.2 \text{ mm I.D.} \times 1072 \text{ mm L} \times 4$ 本 (フランジで連結)
圧 縮 機	形 式 ; 2 気筒往復動型 (無給油式) 回 転 数 ; 150 ~ 600 rpm (無段変速) 圧 縮 比 ; 10 流 量 ; $19 \text{ Nm}^3 \text{-Ar} / \text{hr}$ (最大) 軸 封 ; 磁性流体軸受 ($10^{-11} \text{ atm} \cdot \text{cc} \text{-He} / \text{sec}$ 以下)

表 3.2 隔膜の特性値 *1

分割比	1			3		
段番号	透過係数 $\left(\frac{\text{mol-Ar}}{\text{cm}^2 \cdot \text{cmHg} \cdot \text{min}}\right)$	分離効率*2 (%)	孔直径 (Å)	透過係数 $\left(\frac{\text{mol-Ar}}{\text{cm}^2 \cdot \text{cmHg} \cdot \text{min}}\right)$	分離効率*2 (%)	孔直径*3 (Å)
1	0.715×10^{-5}	89.5 (91.6)	465 (372)	0.770×10^{-5}	89.0 (91.1)	490 (392)
	0.755	88.5 (90.6)	510 (408)	0.723	89.0 (91.1)	487 (312)
2	0.720	89.5 (91.6)	465 (372)	0.760	91.0 (93.1)	390 (312)
	0.750	90.0 (92.1)	440 (352)	0.727	89.3 (91.4)	473 (378)
3	0.720	91.0 (93.1)	390 (312)	0.760	90.0 (92.0)	440 (352)
	0.750	91.5 (93.6)	370 (296)	0.727	91.7 (93.8)	360 (288)
4	0.725	90.5 (92.6)	415 (332)	0.810	91.0 (93.1)	390 (312)
	0.745	91.0 (93.1)	390 (312)	0.730	90.7 (92.8)	407 (326)
5	0.730	91.0 (93.1)	395 (316)	0.740	89.0 (91.1)	490 (392)
	0.740	90.0 (92.1)	440 (352)	0.733	91.0 (93.1)	393 (314)

* 1 各段の上欄の値は第1分離器，下欄は第2分離器に対応。

* 2 カッコ内の値は $\theta = 0.000$ に外挿したときの値。

* 3 Present-deBethune の式により計算した値。

カッコ内の値は $\theta = 0.000$ のときの分離効率に対応する値。

フローシート記号表

記号	名称
⊕	パネル計器
○	現場計器
#/#	計装用空気配管
---	計装用電気配線
PI	圧力指示計
PR	圧力記録計
PRC	圧力制御記録計
TI	温度指示計
TR	温度記録計
TRA	温度記録警報計
FI	流量指示計
FR	流量記録計
FRC	流量制御記録計
⊗	手動弁
⊙	空動作弁
⊚	圧力調整弁

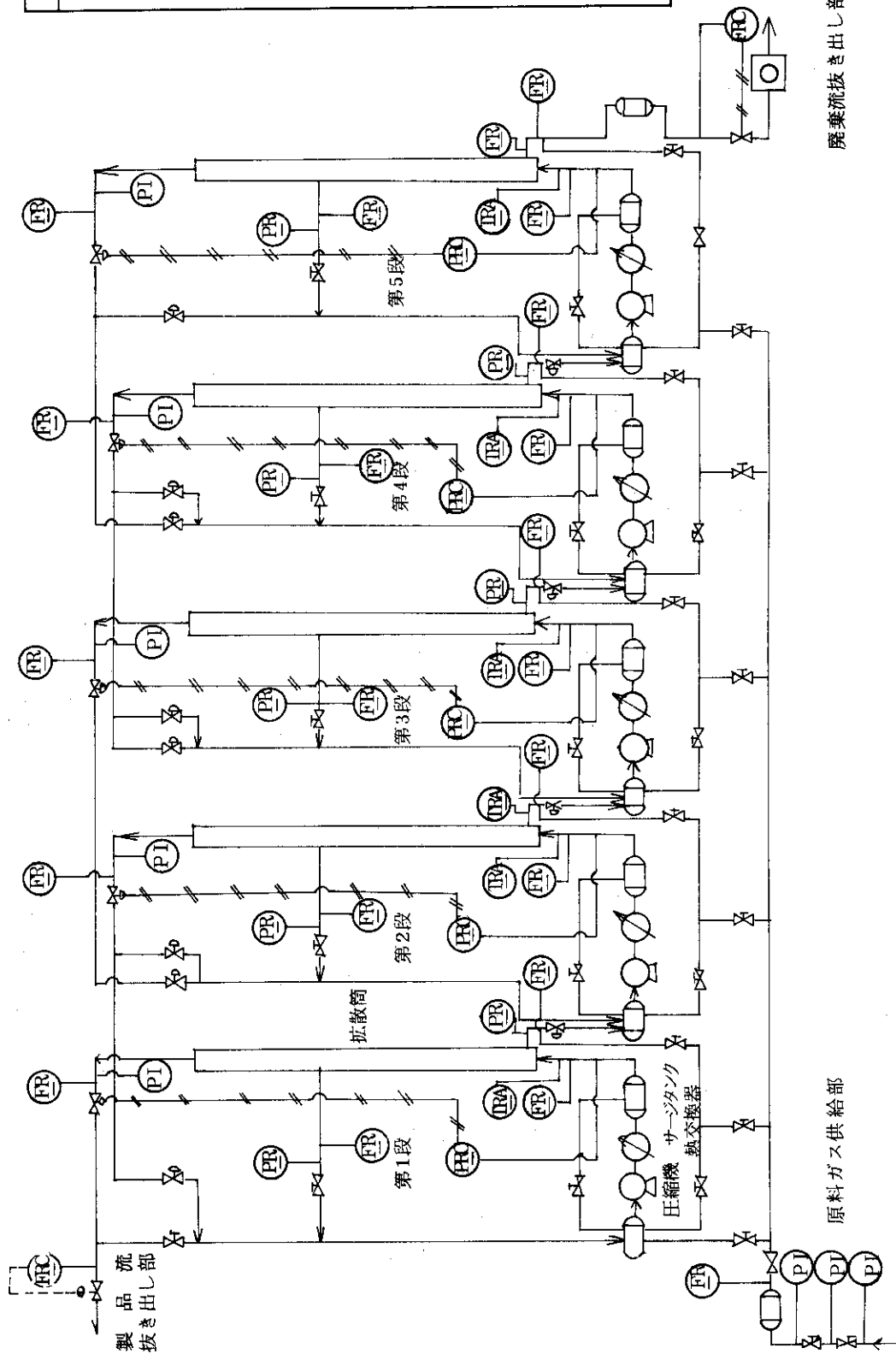


図 3.1 カスケード実験装置の概略フローシート

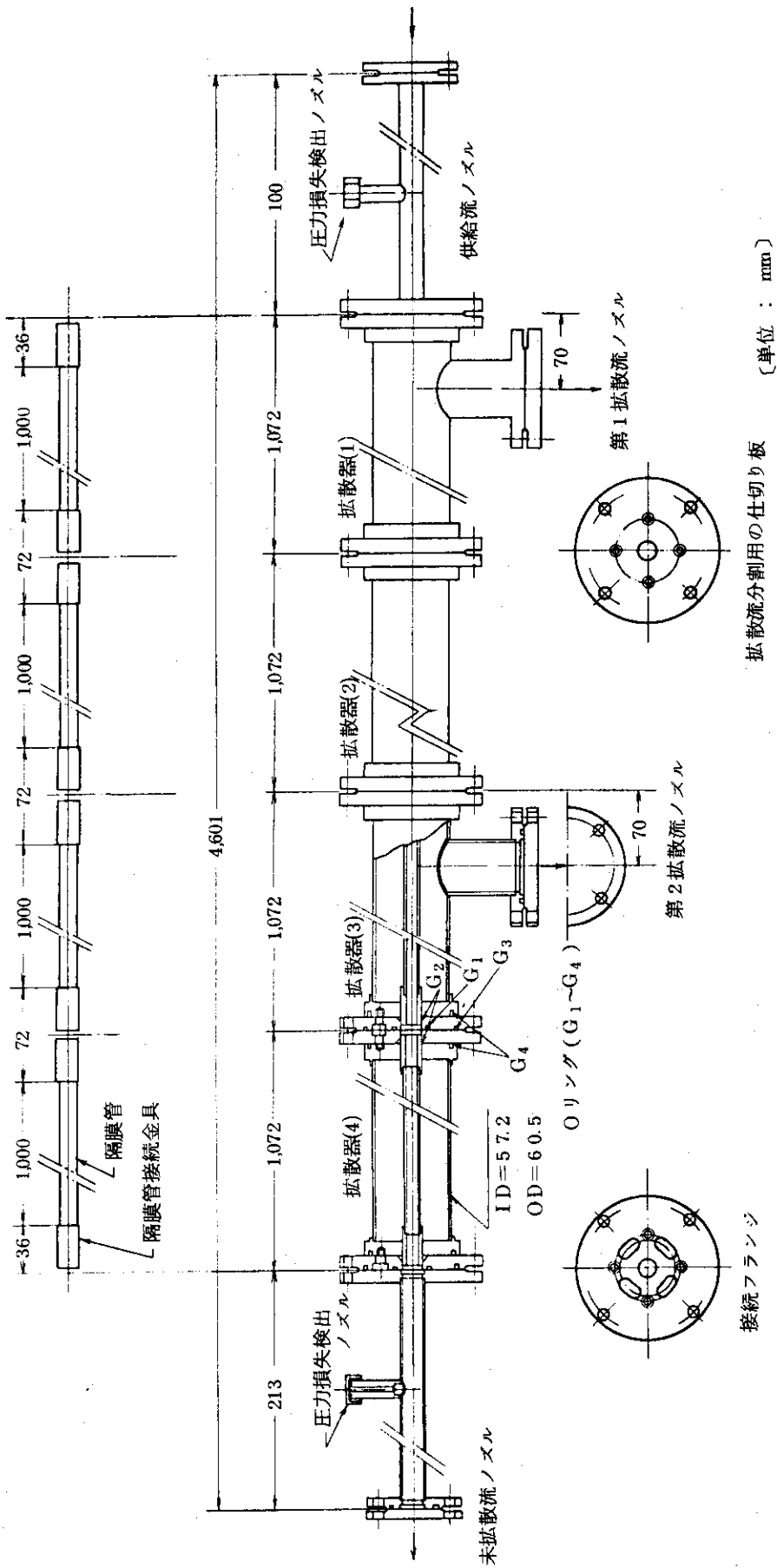


図 3.2 拡散筒の構造

4. 実験結果および考察

表 4.1, 4.2 は, 分割比 1 および 3 の 2 分割型拡散筒から構成される Hertz 型カスケードについて, 第 3 段目の拡散筒の分離特性および流動特性をまとめたものである。カスケード全体の運転条件, 濃度分布などについては, 附表 1, 2 に整理してある。

ここでは, これらの実験結果に基づいて, Hertz 型カスケードの分離特性および運転特性の考察を行う。

4.1 カスケード内濃度の経時変化

図 4.1 は, カスケードを全還流で起動した場合の上端濃度 x'_5 (第 5 段第 1 拡散流) および下端濃度 X'_1 (第 1 段未拡散流) の経時変化を 3 種類の拡散筒形式について示したものである (通常型拡散筒については, 第 5 段拡散流濃度 x'_5 および第 1 段未拡散流濃度 x'_1 を示している)。ここで, 比較の基準として, 拡散筒供給流圧力がほぼ等しい場合の実験例を取り上げている。通常型拡散筒に関するデータは前報²⁾に報告したものである。

これより, いずれの拡散筒を用いた場合でも, カスケード両端における着目成分 (^{36}Ar) の濃度が, 時間の経過とともに, 初期濃度 (^{36}Ar ; 約 0.332%) に対してほぼ対称的に変化していく様子が分かる。しかも, 両端濃度 x'_5 および X'_1 の平衡値に達するまでの変化の過程は極めて滑らかであり, 通常の方型カスケードと変わらない安定な運転特性を示している。即ち, 第 2 拡散流を自己の段の供給流にリサイクルさせ, 段の配管構成が複雑になっている本 Hertz 型カスケードが, 方型カスケードと同様の圧力制御機構 (拡散筒供給流圧力を未拡散流量自動調整弁により設定値に保持する方式) により, 円滑に運転され得ることを示している。

一方, x'_5 および X'_1 の平衡達成時間に着目すると, 通常型拡散筒の場合には 30 分程度で定常状態になるのに対し, 2 分割型拡散筒では分割比 1 の場合に約 70 分, 分割比 3 の場合に約 120 分となっている。これより, 自己の段の供給流へのリサイクル流 (第 2 拡散流) を有する Hertz 型カスケードでは, リサイクル流のない方型カスケードに比べて平衡達成時間が長くなり, しかも拡散筒の分割比即ちリサイクル流を大きくするほど平衡達成時間が増加する傾向にあることが分かる。これは, 表 2.1 から分かるように, 拡散筒の分割比を大きくすると, カスケードの流量収支から拡散筒への供給流量が減少し, 単位時間当りの拡散筒内のガスの置換回数が少なくなるためと考えられる。

段分離係数 α_s については, 図に示したように, 通常型拡散筒では 1.052, 2 分割型拡散筒では分割比 1 の場合に 1.0691, 分割比 3 の場合に 1.0849 なる値が得られている。これを次式で求められる段分離効率で表わすと, それぞれ 96.1%, 127.7%, 156.9% となる。

$$\text{段分離効率} = \frac{\alpha_s - 1}{\alpha_0 - 1} \quad (4.1)$$

ここで、 α_0 ; 隔膜の理論的分離係数 (アルゴンについては 1.0541)
 即ち、この実験では各拡散筒における圧力比および流量が若干異なるため厳密には比較できないが、Hertz 型カスケードの段分離効率 は 方形カスケードに比して分割比 1 のとき 1.33 倍、分割比 3 のとき 1.63 倍にも向上することが確められた。

いま、上端および下端濃度がそれぞれ x_p および x_w なるカスケードを全還流操作で運転した場合の所要段数 N は次式 (Fenske の式) で与えられる。

$$N = \frac{\ell_n \frac{x_p(1-x_w)}{x_w(1-x_p)}}{\ell_n \alpha_s} \quad (4.2)$$

このカスケードを通常型拡散筒 ($\alpha_s = 1.052$) および分割比 3 の 2 分割型拡散筒 ($\alpha_s = 1.0849$) で構成した場合、後者の所要段数は前者のその約 62% である。これより、2 分割型拡散筒による Hertz 型カスケードが段数を削減する上でいかに優れたものであるかが理解できる。

4.2 カスケード段方向の濃度分布

図 4.2 は、前図に示した各実験例について、段方向の平衡濃度分布を示したものである。Hertz 型カスケードにおける各段の供給流濃度 X 、第 1 および第 2 拡散流濃度 x' 、 x'' ならびに未拡散流濃度 X'' は、上段に向かって滑らかに増加し、しかも各段を結ぶ濃度勾配が各流れについてほぼ等しくなっている。これらは、前図において予想されたように、カスケード全体が安定に運転されていることを裏付けるとともに、各段の分離性能がほぼ一定となっていることを示している。

各拡散筒形式について濃度分布を比較すると、Hertz 型カスケードにおける濃度勾配は通常の方型カスケードにおけるそれよりも大きくなっており、しかも分割比を増すほど急勾配となっていく傾向がみられる。即ち、分割比の大きい 2 分割型拡散筒ほど 1 段当りの濃度変化が増加する。

いま、任意段 i の拡散筒まわりの濃度に着目すると、通常の方型カスケードでは $x'_i > x_i > X''_i$ 、Hertz 型カスケードでは $x_i > x'_i > X_i > X''_i$ なる関係が成り立っている。 i 段目の物質収支より、方形カスケードにおける拡散筒への供給流濃度 x_i は、全還流操作の場合次式で与えられる。

$$x_i = \frac{x'_{i-1} + x''_{i+1}}{2} \quad (4.3)$$

図より、 x'_{i-1} 、 x_i 、 x''_{i+1} は一直線上にあり、この関係が成立していることは明らかである。

一方、Hertz 型カスケードでは、全還流操作における拡散筒への供給流濃度 X_i は、次式で与えられる。

$$X_i = \frac{x'_{i-1} + X''_{i+1}}{2} + \frac{r}{2} \Delta \quad (4.4)$$

$$\text{ここで, } x'_i = X_i + \Delta \quad (4.5)$$

即ち, Hertz 型カスケードでは, 第2拡散流を自己の段にリサイクルするために, 供給流濃度はその分だけ高められることになる。この濃度の増分は分割比に比例しており, 図からもこの関係が確認される。

なお, i 段目および $i+1$ 段目の濃度関係を着目すると, 第1拡散流濃度 x'_i と未拡散流濃度 X'_{i+1} はほぼ等しくなっており, 全還流で運転する場合の条件 $\ell''_i = L'_{i+1}$ を満足していることが分かる(濃度分布に認められる若干のずれは, 後述するように, 圧力および流量が各段において幾分異なるためである)。

4.3 分割比と段分離特性との関係

図4.3および図4.4は, 分割比が1のHertz型カスケードについて, 各段の流動条件および分離係数をまとめたものである。ここでは, 表4.1に示した一連の実験のうち, カスケードの循環流量が最も大きい実験例(拡散筒供給流量 L ; $3.85 \text{ mol-Ar/min} \cdot \text{段}$, 拡散筒供給圧力 P_h ; $2.30 \text{ kg/cm}^2 \text{ A}$)を取り上げている。

図4.3において各段の圧力条件に着目すると, 供給流圧力 P_h は約 $2.3 \text{ kg/cm}^2 \text{ A}$, 第1および第2分離器における圧力比 r_1 および r_2 はともに約 0.076 であり, 各段がほぼ同一圧力条件で運転されていることが分かる。各段の流量については, 供給流量 L が約 3.9 mol/min , 第1および第2拡散流量 ℓ'_1, ℓ'_2 がいずれも約 1.3 mol/min となっている。従って, 両分離器におけるカット θ_1, θ_2 はそれぞれ約 0.33 および約 0.51 と求められ, 分割比1の2分割型拡散筒の全還流条件を非常によく満足している。これらの圧力および流量関係と隔膜面積 ($2010 \text{ cm}^2/\text{段}$) から計算した各分離器の透過係数は, 全段にわたって一定値 (約 $0.83 \times 10^{-5} \text{ mol-Ar/cm}^2 \cdot \text{cm Hg} \cdot \text{min}$) を示している。なお, 本実測値は表2.1に示した透過係数(隔膜製造メーカーにおける測定値)に比べて約 10% 高い値となっているが, これは測定に使用した計器(流量計, 圧力計, 温度計)の違いによるものと考えられる。以上のことから, Hertz型カスケードの各段は, 極めて円滑かつ安定に運転されていることが分かる。

図4.4には, 前図の流動条件に対応する各段の段分離係数 α_s , 第1, 第2分離器の分離係数 α_1, α_2 および頭分離係数 β_1, β_2 が示されている。ここで, 各分離係数は(2.1)~(2.5)式で定義されたものであり, 各式における濃度 X_i, x'_i, x''_i, X'_i には実測値を用いた。しかし, 本実験装置では第1未拡散流(≡第2分離器への供給流)の濃度 x_i を測定することができないため, ここでは拡散筒まわりの物質収支から導出した次式で計算した。

$$x_i = \frac{1}{2} \left(\frac{L_i \cdot X_i - x'_i \cdot \ell'_i}{L_i - \ell'_i} + \frac{\ell''_i \cdot x''_i + L'_i \cdot X'_i}{L_i - \ell'_i} \right) \quad (4.6)$$

図において, 段分離係数 α_s は, $1.066 \sim 1.070$ の範囲に入っており, カスケード全体についてほぼ一定値になっているとみなすことができる。第1および第2分離器の分離係数 α_1, β_1 および α_2, β_2 についても, ほぼ同様の傾向が認められる。

ここで, 各分離係数の大きさに着目すると, 段分離係数 α_s は約 1.068 (段分離効率 126

%)、分離係数 α_1 および α_2 はそれぞれ約 1.043 (段分離効率 79%) および約 1.046 (段分離効率 85%) であり、各分離器の分離係数が理論的分離係数 $\alpha_0 (= 1.0541)$ よりも小さいにもかかわらず、1 段当りの分離係数 α_s が理論値よりもかなり大きくなっていることが注目される。これは、段分離係数 α_s が (2.6) 式で表わされ、第 2 分離器における頭分離係数 β_2 が約 1.022 と小さいことに起因している。

図 4.5 は、中根らが報告した拡散筒の分離係数 α 、 β とカット θ との関係を引用したものである。これより、頭分離係数 β はカットの増加につれて単調に減少し、 $\theta \rightarrow 1$ で $\beta \rightarrow 1$ に漸近していく様子がみられる。分離係数 α は、カットが 0.5 以上の範囲では、流れ様式が十字流であるとした場合の分離効果の大きさを表わす Weller & Steiner の式 $Z_5 = (1/\theta) \ln(1/1-\theta)$ に従った変化と類似の傾向を示している。一方、カットが 0.5 以下の範囲では、相対的に隔膜高圧側の流量が大きくなるため、境界層の影響が次第に減少し、分離係数 α は増加傾向となる。分離係数 α 、頭分離係数 β およびカット θ の間には次式が成立し、 $\theta \rightarrow 0$ において $\alpha = \beta$ となる。

$$\left. \begin{aligned} \beta &= 1 + \frac{(\alpha-1)(1-\theta)}{1+\theta(\alpha-1)(1-x')} \\ &\cong 1 + (\alpha-1)(1-\theta) \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

以上に述べた関係を本実験結果に適用してみると、図 4.3 より $\theta_2 (\cong 0.51) > \theta_1 (\cong 0.33)$ であることから、 $\alpha_2 \geq \alpha_1 > \beta_1 > \beta_2$ なる関係が求められ、図 4.4 の傾向とよく一致していることが分かる。

以上、分割比 1 の Hertz 型カスケードにおける分離特性について述べたが、次に、分割比 3 の場合の特性を明らかにし、あわせて分離係数と分割比との相関について考察する。

まず、カスケード内の流動条件は、図 4.6 から分かるように、いずれのパラメータも段方向にほぼ一定となっており、各段が安定に運転されていることを示している。ここで、拡散筒まわりの各流量は、 $\ell' \cong L'' \cong 0.7 \text{ mol/min}$ 、 $\ell'' \cong 2.2 \text{ mol/min}$ 、 $L = 3.6 \text{ mol/min}$ 、各分離器のカットは、 $\theta_1 \cong 0.2$ 、 $\theta_2 \cong 0.75$ となっており、本カスケードにおける全還流の流動条件を満足している。さらに、各段における各分離係数も、図 4.7 から分かるように、段方向にほぼ一定となっている。以上より、リサイクル流 (第 2 拡散流) の流量が第 1 拡散流のその 3 倍にもなる 2 分割型拡散筒を用いても、本カスケードの分離特性が安定していることが確かめられた。

この実験で得られた段分離係数 α_s は、拡散筒供給流圧力 P_h が約 $2.56 \text{ kg/cm}^2 \text{ A}$ と高いにもかかわらず、分割比 1 の場合よりもさらに大きい値 (約 1.080, 段分離効率 148%) になっている。いま、第 1 および第 2 分離器のカット θ_1 および θ_2 を分割比 1 の場合と比較すると、 θ_1 は $0.33 \rightarrow 0.20$ へと減少し、 θ_2 は $0.51 \rightarrow 0.75$ へと増加している。即ち、分割比 1 および 3 における第 1 および第 2 分離器の操作条件 (圧力, 圧力比, 流量) がそれぞれ等

* 昭和 49 年度日本原子力研究所委託調査

「ウラン濃縮用隔膜の特性に関する試験研究」研究成果報告書 (理化学研究所)

しいときは、図 4.5 に示した分離係数 α 、 β とカット θ との関係より、カット θ_1 、 θ_2 の上記変化に対応して、分離係数 α_1 、 β_1 および α_2 は増加し、 β_2 は減少する。実験では、分割比を変更したことにより各分離器の操作条件は異なるが（図 4.3、4.6 参照）、第 2 分離器の α_2 、 β_2 については上記関係が成り立っており、しかもその変化割合はかなり大きくなっている。これより、 $\alpha_s = \alpha_1 \cdot \alpha_2 / \beta_2$ [(2.6) 式] なる関係が成り立つ 2 分割型拡散筒の段分離係数が分割比を増すほど、即ち第 2 分離器のカットを大きくするほど大きな値となることが理解できる。

図 4.8 は、表 4.1 に示した一連の実験における各分離器の分離係数 α_1 、 β_1 および α_2 、 β_2 とカット θ_1 および θ_2 との関係をまとめたものである。図に点綴した各点は圧力および流量条件は異なっているが、分離係数 α および頭分離係数 β は、カットの増大につれて、それぞれ単調な増加および減少傾向を示している。いま、2 分割型拡散筒をそれぞれ一つの拡散筒とみなせば、図 4.5 に示した通常の拡散筒における分離係数とカットの関係 [$Z_5 = (1/\theta) \ln(1/1-\theta)$] および $\beta \cong 1 + (\alpha - 1)(1 - \theta)$] が定性的に成り立っていることが分かる。

これより、通常の拡散筒の運転条件はカット 0.5（全還流時）に限定されるのに対し、2 分割型拡散筒は、分割比を変えることによりカットを任意に選定することが可能であり、分離係数影響因子のうち段分離係数を高める上で最も重要なカットの効果 Z_5 を巧みに応用した極めて有用な拡散筒といえることができる。

4.4 操作圧力と段分離特性との関係

図 4.9 は、拡散筒供給流圧力 P_h を基準として、通常型拡散筒ならびに分割比 1 および 3 の 2 分割型拡散筒からなるカスケードの流動条件を比較したものである。これより、往復動型圧縮機を用いた本実験装置では、圧力比 γ は供給流圧力 P_h の増加につれて各拡散筒形式における個々の一定値に向かって減少する傾向のあることが分かる。いま、供給流圧力 $2.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ A}$ における圧力比は、通常型拡散筒において約 0.97 であるのに対し、2 分割型拡散筒では分割比 1 の場合約 0.078、分割比 3 の場合約 0.069 である。即ち、分割比を大きくするほど γ が小さな値となり、逆拡散の効果 $Z_1 (= 1 - \gamma)$ が向上することになる。一方、各段の高圧側、低圧側における容積（それぞれ 81ℓ 、 135ℓ ）と圧力 (P_h 、 P_l) から算出した 1 段あたりのガスインベントリ G_i は、供給流圧力 P_h に比例して増加しており、しかも供給流圧力 P_h の一定値におけるガスインベントリ G_i の拡散筒形式による違いがほとんど認められない。これは、拡散流圧力が供給流圧力の $1/10 \sim 1/15$ と小さいためである。即ち、拡散流圧力の拡散筒形式による僅かな違いは圧力比 γ には敏感に反映されるが、ガスインベントリ G_i にはほとんど表われないことが分かる。次に、拡散筒の入口、出口部分において求めたレイノルズ数に着目すると、供給流および未拡散流レイノルズ数 $(R_e)_F$ 、 $(R_e)_W$ は供給流圧力 P_h に対してほぼ比例的に増加している。また、 P_h が一定値のとき、拡散筒を分割することによって 1 段あたりの循環流量が減少する 2 分割型拡散筒のレイノルズ数は通常型拡散筒のそれより小さく、しかも分割比を増すほど減少することが分かる。例えば、分割比 3 の場合を見ると、供給流レイノルズ数 $(R_e)_F$ は $5500 \sim 8500$ 、未拡散流レイノルズ数 $(R_e)_W$ は

1100~1700 となっており、隔膜管内側の流れが拡散筒の長さ方向に乱流から層流へと変化することを示している。

図 4.10~4.12 は、供給流圧力 P_h を基準として、前図に対応する各カスケードの分離係数を示したものである。

先ず、図 4.10 より、段分離係数 α_s は、本実験装置に使用した各拡散筒形式に固有の供給流圧力 P_h において最大値をとることが分かる（ただし、分割比 3 の場合には、実験範囲が狭いため最大値が表われていない）。このような段分離係数 α_s と供給流圧力 P_h との相関関係は通常型拡散筒については既に報告しているが²⁾、拡散筒内の種々の分離係数影響因子⁴⁾、特に圧力比 γ に関連した逆拡散の効果 Z_1 、供給流圧力 P_h に対してほぼ直線的に変化する Present-de Bethune の効果 Z_2 および流量に関係した境界層の効果 Z_3 が相互に関連しあうためと考えられる。これについては次節において検討する。

図 4.11, 4.12 は、それぞれ分割比が 1 および 3 の場合について、段分離係数 α_s ならびに第 1, 第 2 分離器の分離係数 α_1, α_2 および頭分離係数 β_1, β_2 を供給流圧力 P_h に対して示したものである。両図において、これらの分離係数は段分離係数 α_s と供給流圧力 P_h との関係にほぼ類似した変化を示している。また、4.3 に述べた分離係数とカットとの関係により定まる $\alpha_2 > \alpha_1 > \beta_1 > \beta_2$ なる分離係数相互の関係が広い圧力範囲で成り立っていることが分かる。

4.5 分離係数に影響する因子

前報²⁾において、通常の方形カスケードの分離係数に影響する因子として隔膜透過レイノルズ数をパラメータとする補正因子を導入することにより、在来の推算式を用いて段分離係数をほぼ正確に予測できることを明らかにした。また、隔膜近傍における境界層の効果 Z_3 の簡便な評価法として、隔膜管の高圧側平均レイノルズ数と圧力損失をパラメータとする実験式を見出した。

2 分割型拡散筒においてこれらの因子を求めるためには、個々の分離器まわりの流量を測定しなければならない。また、1 段あたりの循環流量が拡散筒の分割比を大きくするほど減少し、分離器内のレイノルズ数が乱流から層流へと変化するので、隔膜近傍における流れの状態を正確に把握する必要がある。しかし、本実験装置に使用した 2 分割型拡散筒では、構造上第 1 未拡散流（第 2 分離器供給流）の流量および圧力を実測できないため、さらに第 2 拡散流量測定用の流量計を設けていないため、現時点ではこのような解析を行うことは不可能である。

ここでは、在来の推算式を用いて各影響因子の大きさを計算し、これらが操作圧力および分割比によりどのように変化するかを定性的に示してみた。即ち、逆拡散の効果 Z_1 、Marten-sson の近似式による Present-de Bethune の効果 Z_2 、Bilous の式による境界層の効果 Z_3 および Weller & Steiner の式によるカットの効果 Z_5 を計算した。なお、表面拡散流の効果 Z_4 は、アルゴンガスをほぼ理想気体の法則に従う非吸着性の気体と考えると、 $Z_4 = 1.0$ とする。

表 4.3 は、表 4.1 に示した各実験について計算した結果を、第 1 および第 2 分離器に分けて

整理したものである。以下、本表に基づいて考察を進める。

図 4.13 は、分割比 1 の 2 分割型拡散筒の各分離器における分離係数影響因子を供給流圧力 P_h に対して示したものである。図において、逆拡散の効果 Z_1 は、供給流圧力 P_h とともに増加するがその変化割合は小さく、図の範囲では圧力の上昇につれて 0.93 前後に漸近する傾向が見られる。これは、図 4.9 に示した供給流圧力 P_h と圧力比 γ との関係から分かるように、 γ の値が 1 に比べて非常に小さくしかも圧縮機の圧縮性能に依存してほぼ一定値に漸近することによるものである。両分離器における Z_1 の値に差異が認められるが、これは、それぞれの拡散流配管の長さや配管抵抗に違いがあり拡散流圧力 P_{l1} , P_{l2} が僅かに異なるためである。Present-de Bethune の効果 Z_2 は、各分離器における圧力比 γ_1 , γ_2 の違いによって幾分異なるが、いずれも供給流圧力 P_h の増加につれてほぼ直線的に減少しておりそれぞれにおける遷移流の影響を表わしている。境界層の効果 Z_3 の供給流圧力 P_h に対する変化は比較的大きく、しかも第 1 分離器における値が第 2 分離器のそれよりもかなり高目となっている。これは、前者における供給流量が後者の 1.5 倍となっているため（表 2.1 参照）、隔膜管内側のレイノルズ数が後者におけるそれより大きくなっていることによるものである。カットの効果 Z_5 は計算式から分かるように供給流圧力 P_h に無関係の因子であり、拡散筒の分割比を 1 と定めると各分離器における Z_5 の値はカット ($\theta_1 \cong 0.33$, $\theta_2 \cong 0.51$) に応じてそれぞれ 1.22 および 1.38 となる。

図 4.14 は、分割比 3 の場合の計算結果を示したものである。各因子の供給流圧力 P_h に対する傾向は、分割比 1 の場合とほぼ同様であるが、逆拡散の効果 Z_1 以外の因子の分離器相互における大きさの違いが顕著になっている。即ち、Present-de Bethune の効果 Z_2 については、第 2 分離器における値が大きくなっている。これは、流量の多い第 2 拡散流 ($\ell''=3\ell'$) の圧力 P_{l2} が第 1 拡散流圧力 P_{l1} より高くなる（圧力比は $\gamma_1 > \gamma_2$ となる）ためである。一方、境界層の効果 Z_3 においては、図 4.9 から分かるように未拡散流量 L'' のレイノルズ数 (R_w) が 1000~2000 程度の小さな値となっているため、第 2 分離器では境界層の厚みの影響が顕著に表われている。

カットの効果 Z_5 については、第 2 分離器における値が約 1.95 にも達することが注目される。

以上より、Hertz 型カスケードの段分離係数 α_s は 2 分割型拡散筒の分割比を増すなど向上すること、ならびにこれは第 2 分離器におけるカットの効果の寄与によるものであることが判明した。また、本カスケードにおける分離係数影響因子の拡散筒供給流圧力に対する傾向は、通常の方形カスケードにおいて確認された傾向と定性的に類似していることが明らかになった。

表 4.1 2 分割型拡散筒の流動条件

(第3段目における値)

実験番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
分割比 r	1						3				
初期充填圧力 P_0 (kg/cm ² A)	0.37	0.50	0.58	0.66	0.81	0.95	0.70	0.80	0.95	1.05	
供給流圧力 P_h (kg/cm ² A)	0.89	1.155	1.39	1.55	1.96	2.30	1.70	1.89	2.30	2.56	
第1拡散流圧力 $P_{\ell 1}$ (mm Hg)	64.5	76.5	86.0	94.5	110.0	125.0	87.5	94.0	109.0	119.0	
第2拡散流圧力 $P_{\ell 2}$ (mm Hg)	69.0	84.0	89.0	101.0	115.0	133.5	96.0	100.0	119.0	130.0	
圧力比 r_s^{*1} (-)	0.1019	0.0944	0.0856	0.0858	0.0780	0.0764	0.0734	0.0725	0.0674	0.0661	
供給流量 ^{*2} L (mol/min)	1.410	1.882	2.289	2.564	3.26	3.85	2.411	2.554	3.136	3.608	
第1拡散流量 ℓ' (mol/min)	0.474	0.636	0.772	0.865	1.10	1.29	0.491	0.512	0.632	0.739	
第2拡散流量 ℓ'' (mol/min)	0.470	0.629	0.770	0.860	1.10	1.28	1.462	1.530	1.885	2.203	
未拡散流量 L'' (mol/min)	0.466	0.617	0.747	0.839	1.06	1.28	0.458	0.512	0.619	0.666	
透過係数 ^{*3} Q_s (mol-Ar/cm ² ·cmHg·min)	0.784×10^{-5}	0.802×10^{-5}	0.804×10^{-5}	0.807×10^{-5}	0.807×10^{-5}	0.800×10^{-5}	0.811×10^{-5}	0.792×10^{-5}	0.768×10^{-5}	0.805×10^{-5}	
ガスインベントリ G_i^{*4} (mol/段)	3.50	4.50	5.27	5.93	7.39	8.69	6.73	7.13	8.47	9.51	
供給流ガス流速 V_F (cm/sec)	312	321	329	327	331	332	278	277	270	276	
供給流ガス密度 ρ_F (g/cm ³)	0.148×10^{-2}	0.192×10^{-2}	0.228×10^{-2}	0.256×10^{-2}	0.322×10^{-2}	0.379×10^{-2}	0.280×10^{-2}	0.297×10^{-2}	0.375×10^{-2}	0.422×10^{-2}	
供給流拡散係数 $(D_{12})_F$ (cm ² /sec)	0.2186	0.1691	0.1439	0.1268	0.1017	0.0861	0.1166	0.1104	0.0876	0.0772	
供給流シュミット数 $(S_c)_F$ (-)	0.673	0.673	0.673	0.673	0.673	0.673	0.673	0.673	0.673	0.673	
供給流レイノルズ数 $(R_e)_F$ (-)	3389	4514	5431	6130	7749	9166	5667	5973	7321	8491	
未拡散流レイノルズ数 $(R_e)_W$ (-)	1134	1501	1797	2033	2555	3096	1105	1230	1484	1670	
高圧側平均レイノルズ数 (\bar{R}_e) (-)	2262	3008	3614	4082	5152	6131	3386	3602	4403	5051	
透過レイノルズ数 $(R_e)_b$ (-)	3.77	5.03	6.07	6.83	8.67	10.13	7.70	8.00	9.87	11.63	
第一分離器	カット θ_1 (-)	0.341	0.342	0.342	0.342	0.343	0.339	0.209	0.206	0.207	0.210
	圧力比 r_1 (-)	0.0985	0.0900	0.0841	0.0829	0.0763	0.0739	0.0700	0.0702	0.0644	0.0632
	高圧側平均レイノルズ数 $(\bar{R}_e)_1$ (-)	2.812	3.742	4.502	5.082	6.422	7.613	5.074	5.358	6.563	7.598
	隔膜透過流量 q_1 (g/cm ² sec)	0.315×10^{-3}	0.422×10^{-3}	0.512×10^{-3}	0.574×10^{-3}	0.731×10^{-3}	0.853×10^{-3}	0.651×10^{-3}	0.680×10^{-3}	0.839×10^{-3}	0.980×10^{-3}
第二分離器	カット θ_2 (-)	0.492	0.495	0.497	0.496	0.498	0.489	0.753	0.741	0.744	0.76
	圧力比 r_2 (-)	0.1054	0.0989	0.0870	0.0886	0.0797	0.0789	0.0767	0.0747	0.0703	0.0691
	高圧側平均レイノルズ数 $(\bar{R}_e)_2$ (-)	1.684	2.235	2.685	3.033	3.825	4.578	2.793	2.987	3.645	4.157
	隔膜透過流量 q_2 (g/cm ² sec)	0.300×10^{-3}	0.401×10^{-3}	0.490×10^{-3}	0.547×10^{-3}	0.699×10^{-3}	0.814×10^{-3}	0.618×10^{-3}	0.647×10^{-3}	0.797×10^{-3}	0.932×10^{-3}

*1. 第1, 第2分離器の平均値

*2. 第1, 第2拡散流量および未拡散流量の和

*3. 1段当りの平均値

*4. 高圧側容積 81ℓ, 低圧側容積 135ℓ

表 4.2 2分割型散筒の分離特性

(第3段目における値)

実験番号	分割比 r									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
初期充填圧力 P_0 (kg/cm ² A)	0.37	0.50	0.58	0.66	0.81	0.95	0.70	0.80	0.95	1.05
供給流圧力 P_H (kg/cm ² A)	0.89	1.155	1.39	1.55	1.96	2.30	1.70	1.89	2.30	2.56
供給流濃度 X (mol%)	0.3303	0.3312	0.3178	0.3788	0.3151	0.3302	0.3300	0.3305	0.3295	0.3288
第1拡散流濃度 x' (mol%)	0.3397	0.3412	0.3271	0.3903	0.3244	0.3397	0.3405	0.3410	0.3395	0.3388
第2拡散流濃度 x'' (mol%)	0.3183	0.3184	0.3054	0.3640	0.3035	0.3179	0.3137	0.3144	0.3132	0.3129
未拡散流濃度 X'' (mol%)	0.3330	0.3332	0.3198	0.3817	0.3176	0.3326	0.3317	0.3318	0.3301	0.3299
仕切点濃度 x^* (mol%)	0.3255	0.3259	0.3128	0.3728	0.3104	0.3252	0.3272	0.3275	0.3263	0.3260
段分離効率 Z_s (%)	124.7	132.8	131.8	134.1	127.7	127.2	158.5	156.9	155.8	153.6
段分離係数 α_s (-)	1.0675	1.0719	1.0713	1.0725	1.0691	1.0688	1.0857	1.0849	1.0843	1.0831
第一分離器										
分 離 係 数 α_1 (-)	1.0438	1.0472	1.0460	1.0471	1.0453	1.0447	1.0407	1.0413	1.0405	1.0395
” 効 率 Z_1 (%)	81.0	87.3	85.0	87.1	83.7	82.6	75.2	76.3	74.8	73.0
頭分離係数 β_1 (-)	1.0286	1.0303	1.0294	1.0305	1.0296	1.0289	1.0319	1.0319	1.0305	1.0305
第二分離器										
分 離 係 数 α_2 (-)	1.0463	1.0466	1.0473	1.0488	1.0466	1.0464	1.0576	1.0555	1.0541	1.0545
” 効 率 Z_2 (%)	85.7	86.2	87.4	90.2	86.2	85.8	106.4	102.7	100.1	100.8
頭分離係数 β_2 (-)	1.0231	1.0225	1.0225	1.0240	1.0233	1.0228	1.0138	1.0132	1.0117	1.0120

表 4.3 分離係数に影響を及ぼす諸因子の大きさ

(第3段目における値)

実験番号	分割比 r									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
供給流圧力 (kg/cm ² A)	0.89	1.155	1.39	1.55	1.96	2.30	1.70	1.89	2.30	2.56
第一分離器										
逆拡散の効果 Z ₁	0.901	0.910	0.916	0.917	0.924	0.926	0.930	0.930	0.936	0.937
Present-de Bethune の効果 Z ₂	0.913	0.888	0.868	0.852	0.817	0.787	0.810	0.800	0.753	0.726
境界層の効果 Z ₃	0.805	0.883	0.874	0.911	0.906	0.928	0.889	0.916	0.948	0.956
カットの効果 Z ₅	1.223	1.224	1.224	1.224	1.224	1.221	1.122	1.120	1.120	1.123
第二分離器										
逆拡散の効果 Z ₁	0.895	0.901	0.913	0.911	0.920	0.921	0.923	0.925	0.930	0.931
Present-de Bethune の効果 Z ₂	0.909	0.883	0.861	0.845	0.809	0.778	0.842	0.833	0.794	0.770
境界層の効果 Z ₃	0.765	0.785	0.804	0.848	0.836	0.871	0.736	0.730	0.740	0.748
カットの効果 Z ₅	1.377	1.380	1.383	1.381	1.384	1.373	1.858	1.822	1.833	1.878

。表面拡散流の効果 Z₄ は、アルゴンガスが理想気体として
 取扱いことができると考え、Z₄ = 1.0 とした。

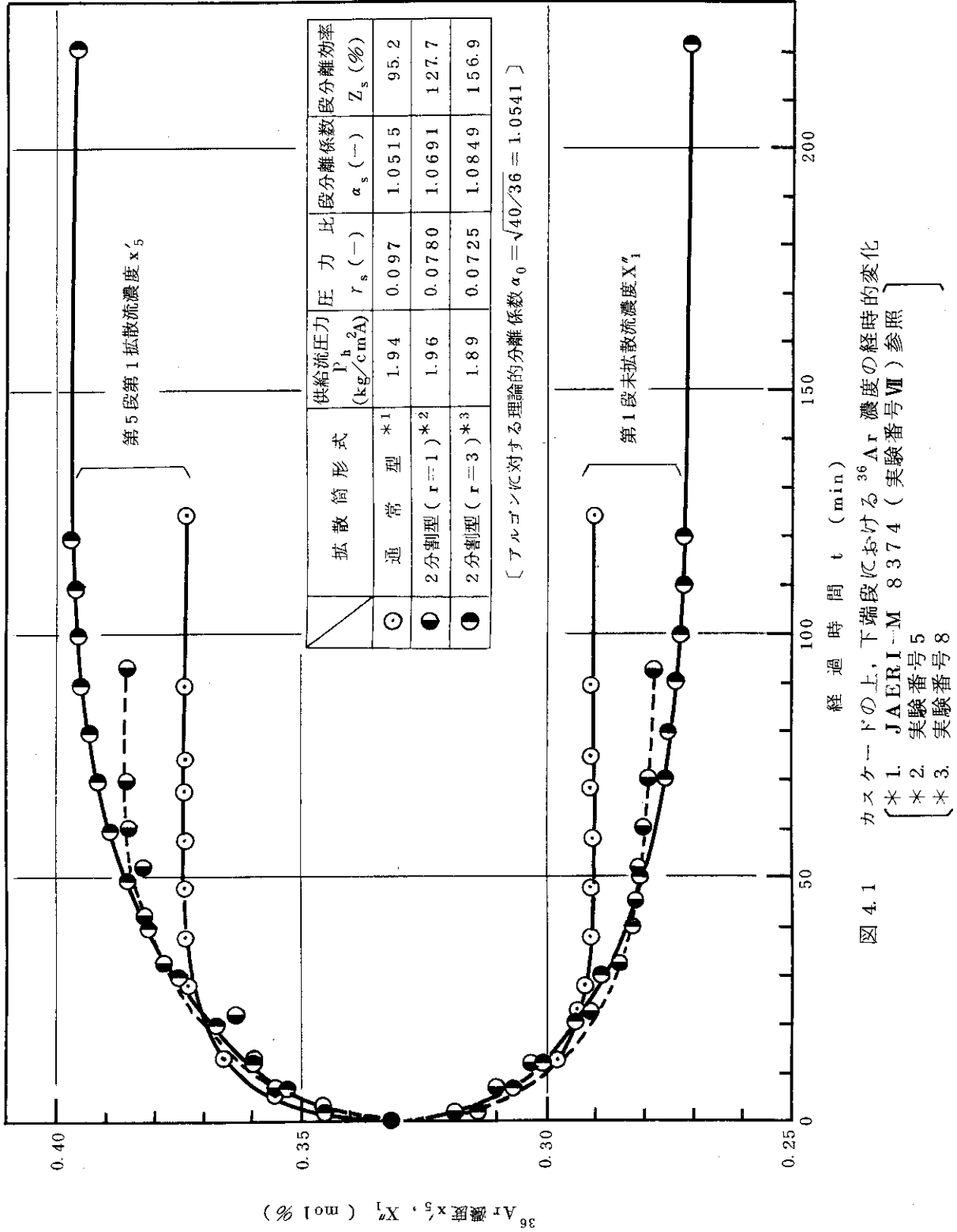


図 4.1 カスケードの上, 下端段における ³⁶Ar 濃度の経時の変化
 [*1. JAERI-M 8374 (実験番号 VII) 参照]
 [*2. 実験番号 5]
 [*3. 実験番号 8]

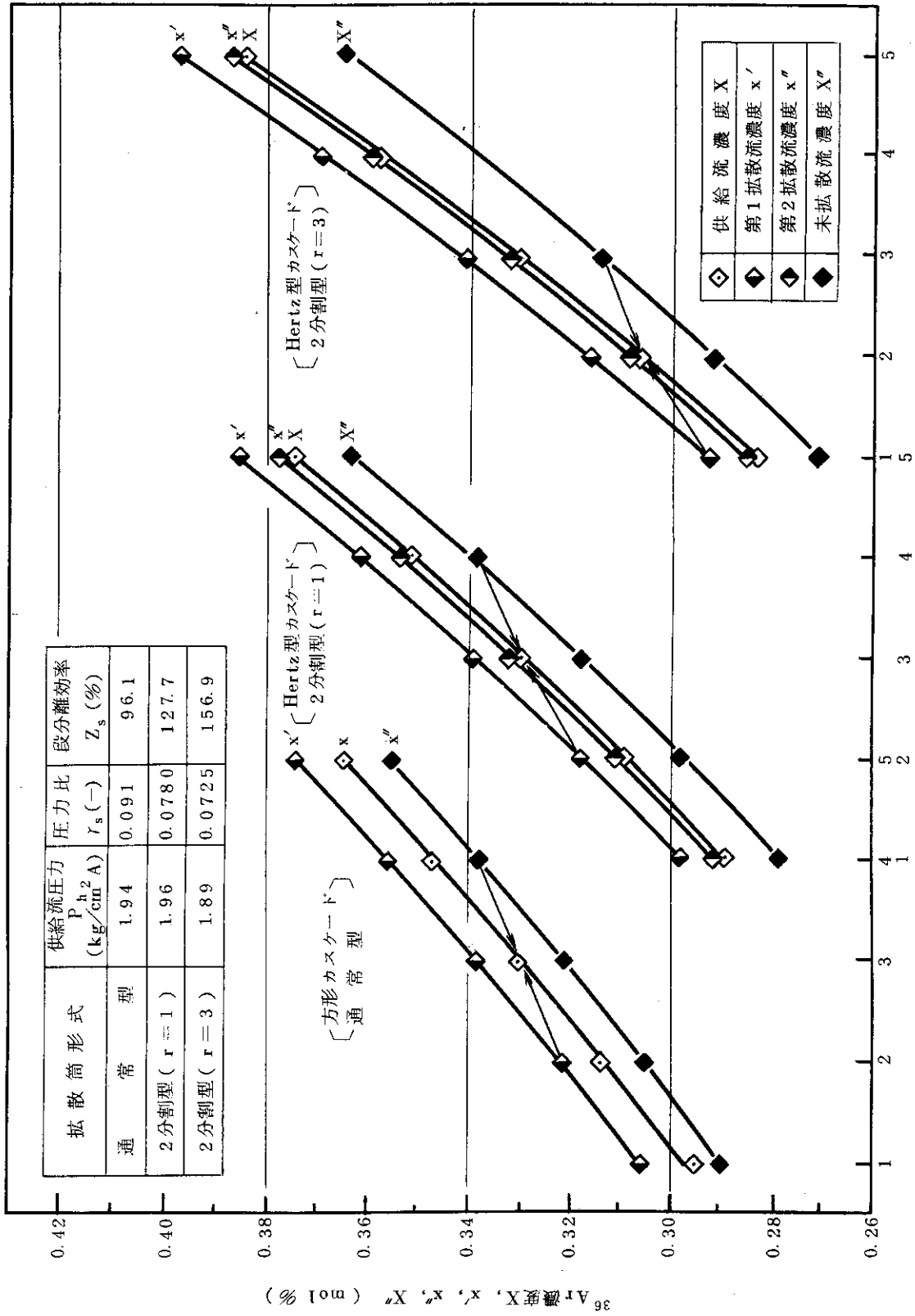


図 4.2 カスケード内の平衡濃度分布

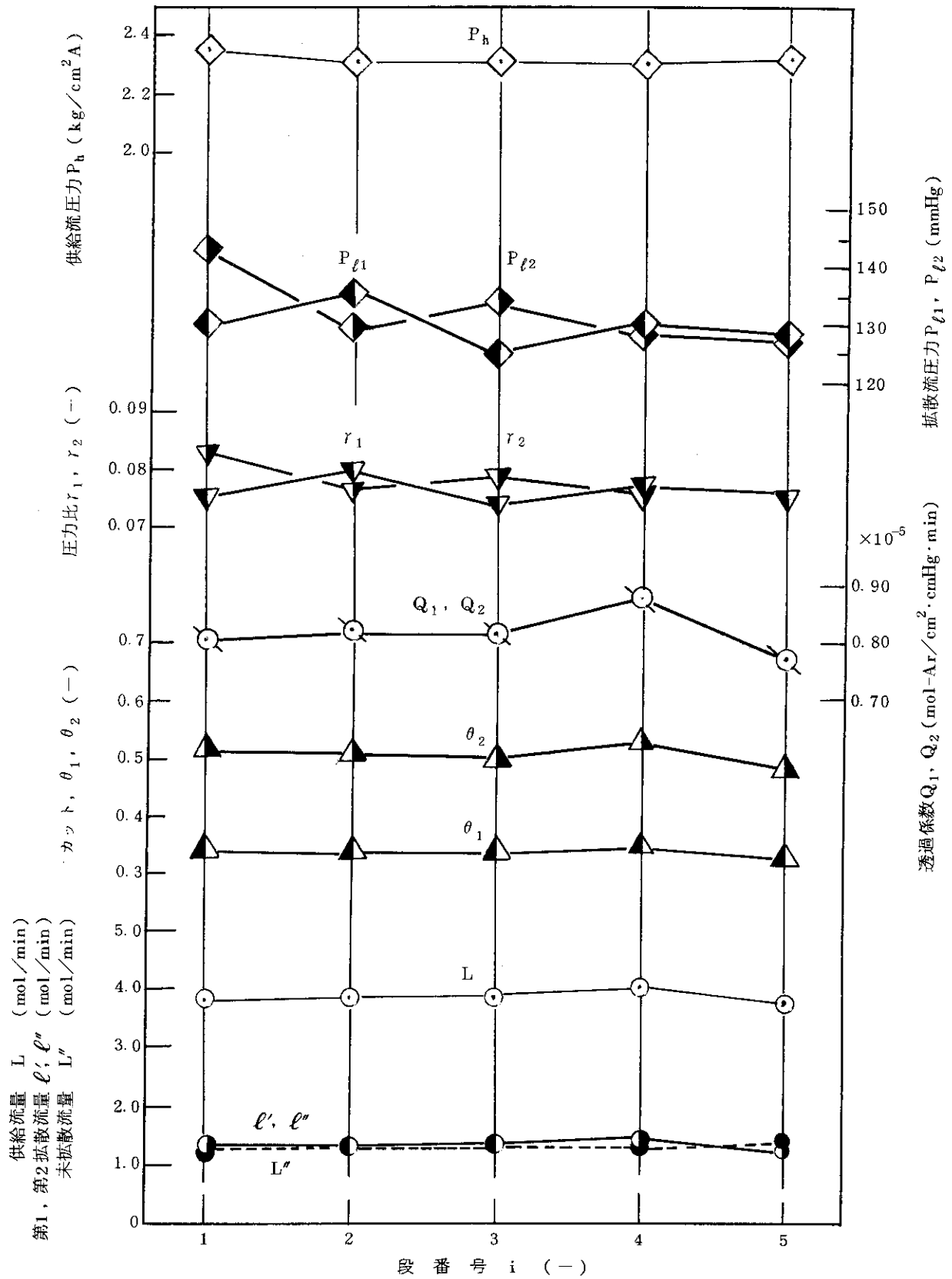


図 4.3 カスケード各段における流動条件 (分割比 1) [実験番号 6]

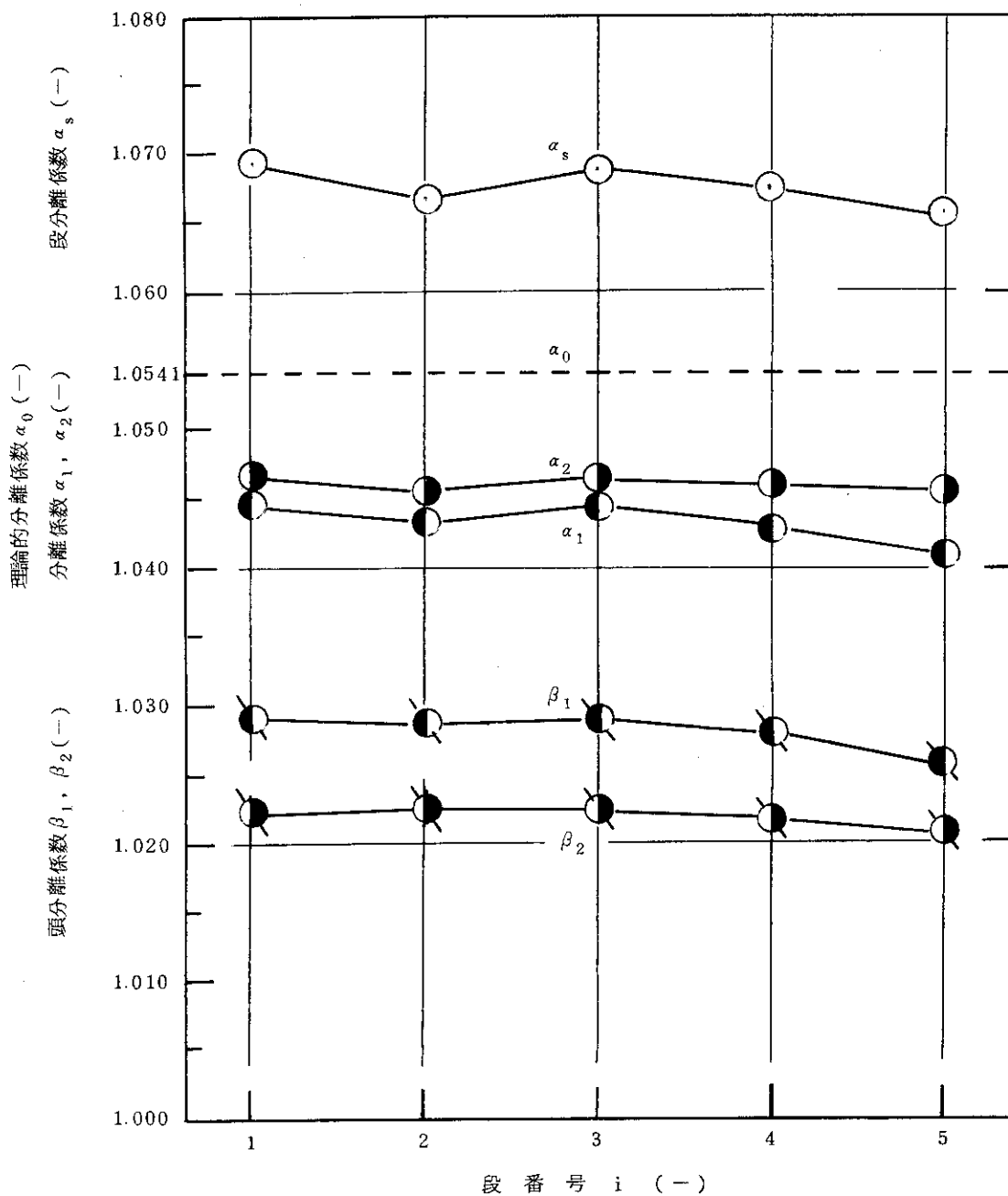


図 4.4 カスケード各段における分離係数 (分割比 1) (実験番号 6)

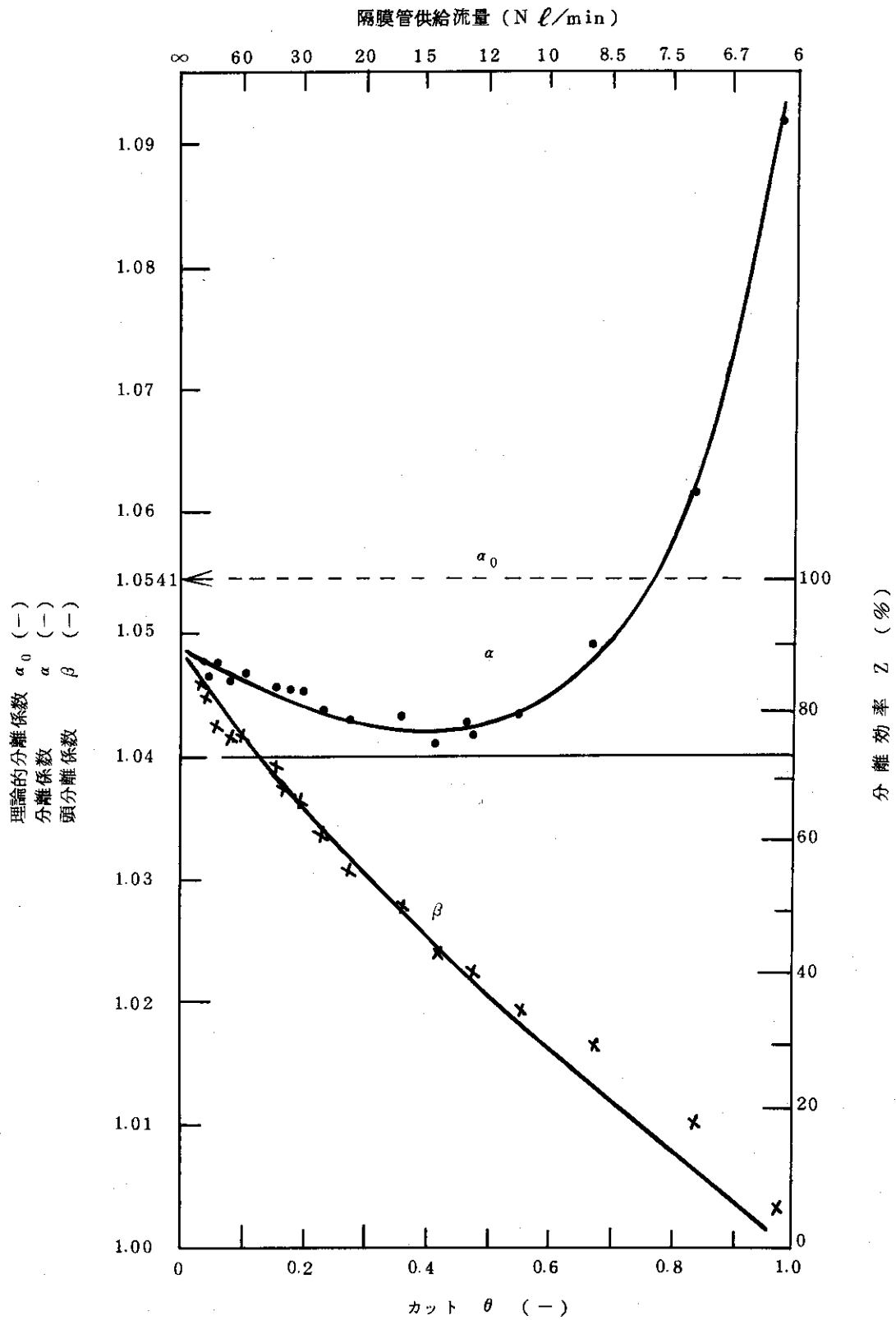


図 4.5 管状隔膜の分離効率測定装置による隔膜管の分離効率とカットおよび供給流量との関係

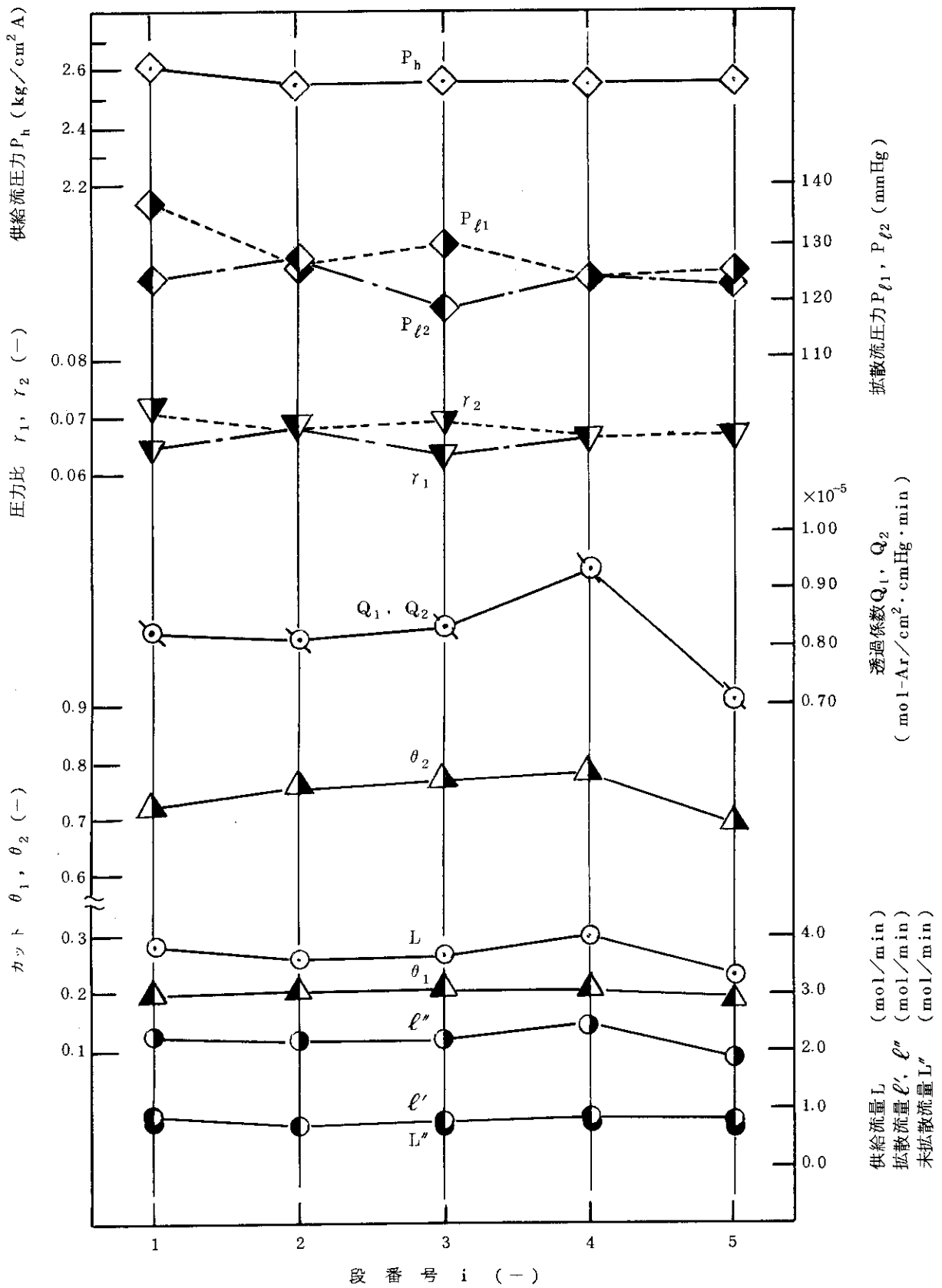


図 4.6 カスケード各段における流動条件 (分割比 3) [実験番号 10]

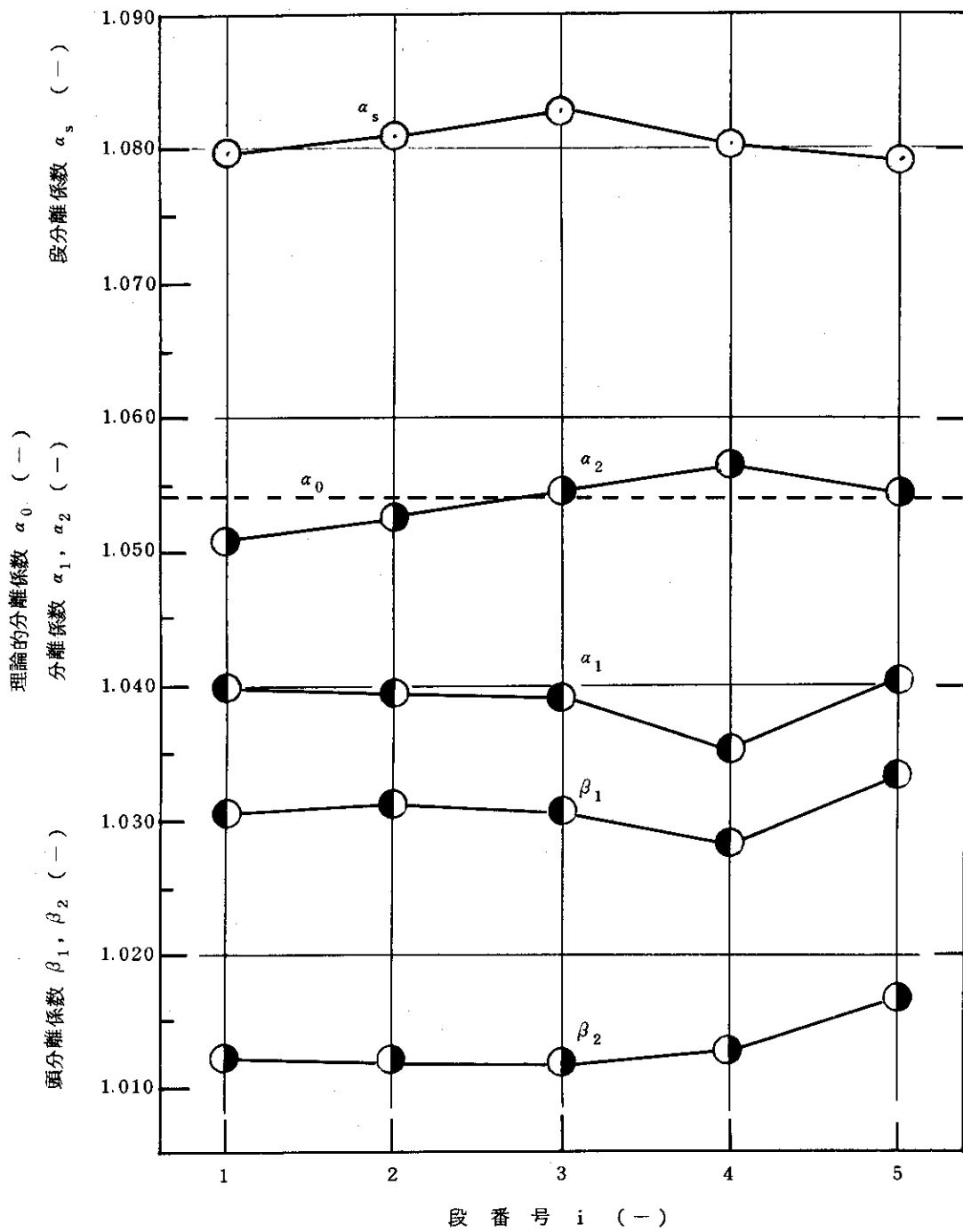


図 4.7 カスケード各段における分離係数 (分割比 3) [実験番号 10]

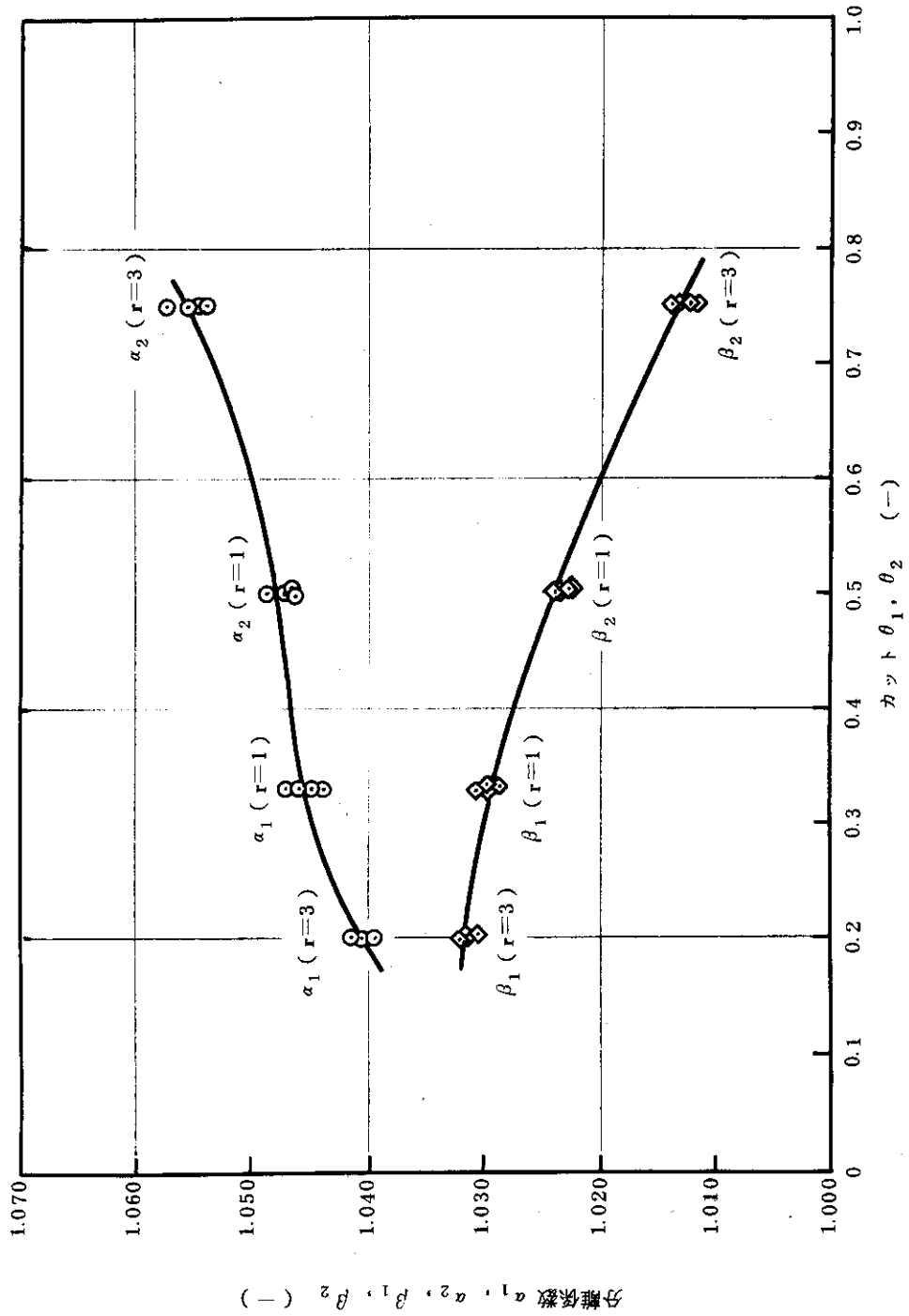


図 4.8 2分割型拡散筒における分離係数とカットとの関係 (第3段目における値)

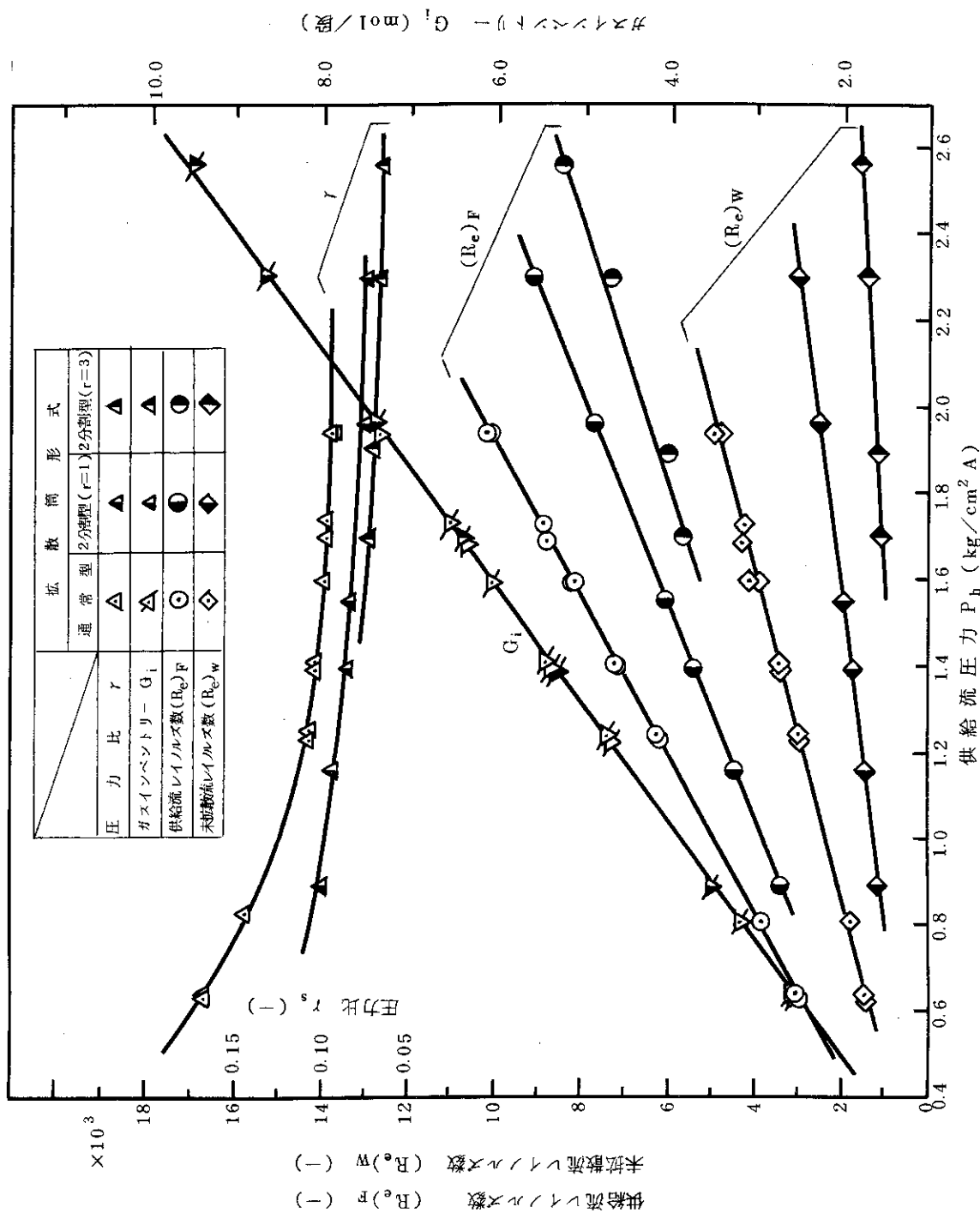


図 4.9 2分割型拡散筒における流動条件と供給流圧力との関係 (第3段目における値)

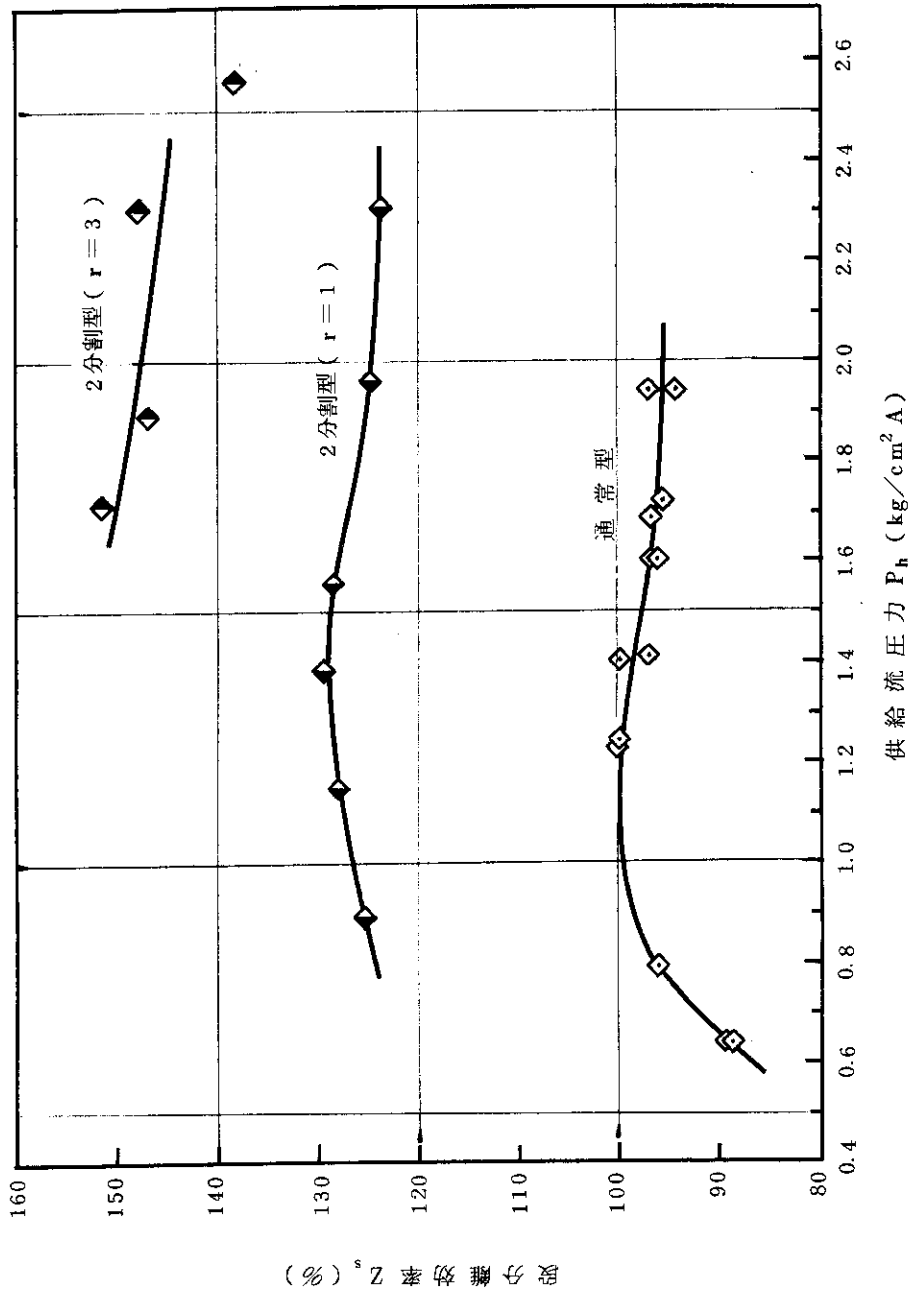


図 4.10 2分割型拡散管における段分離効率と供給流圧力の関係 (第3段目における値)

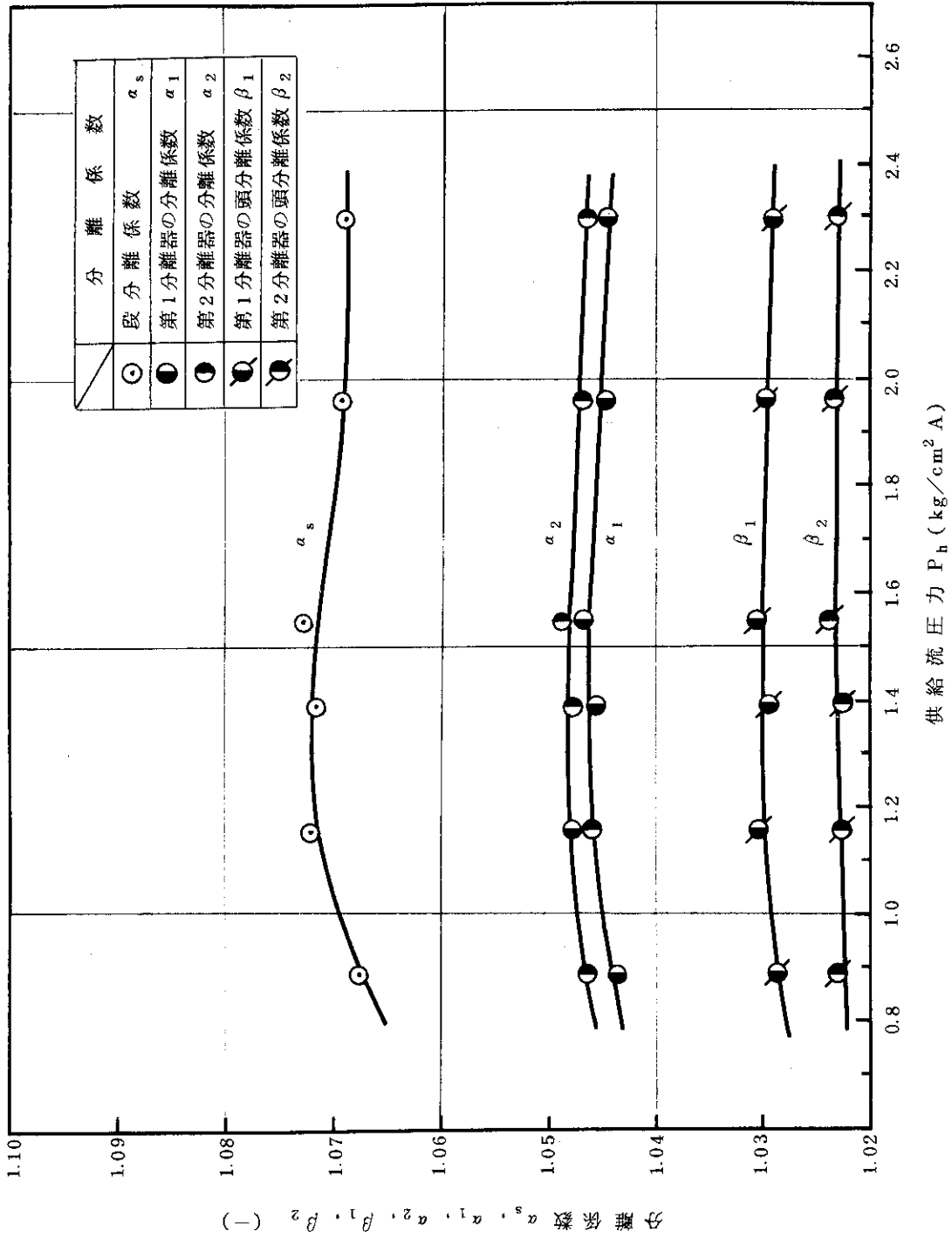


図 4.11 2分割型拡散筒における分離係数と供給流圧力との関係 (分割比1) (第3段目における値)

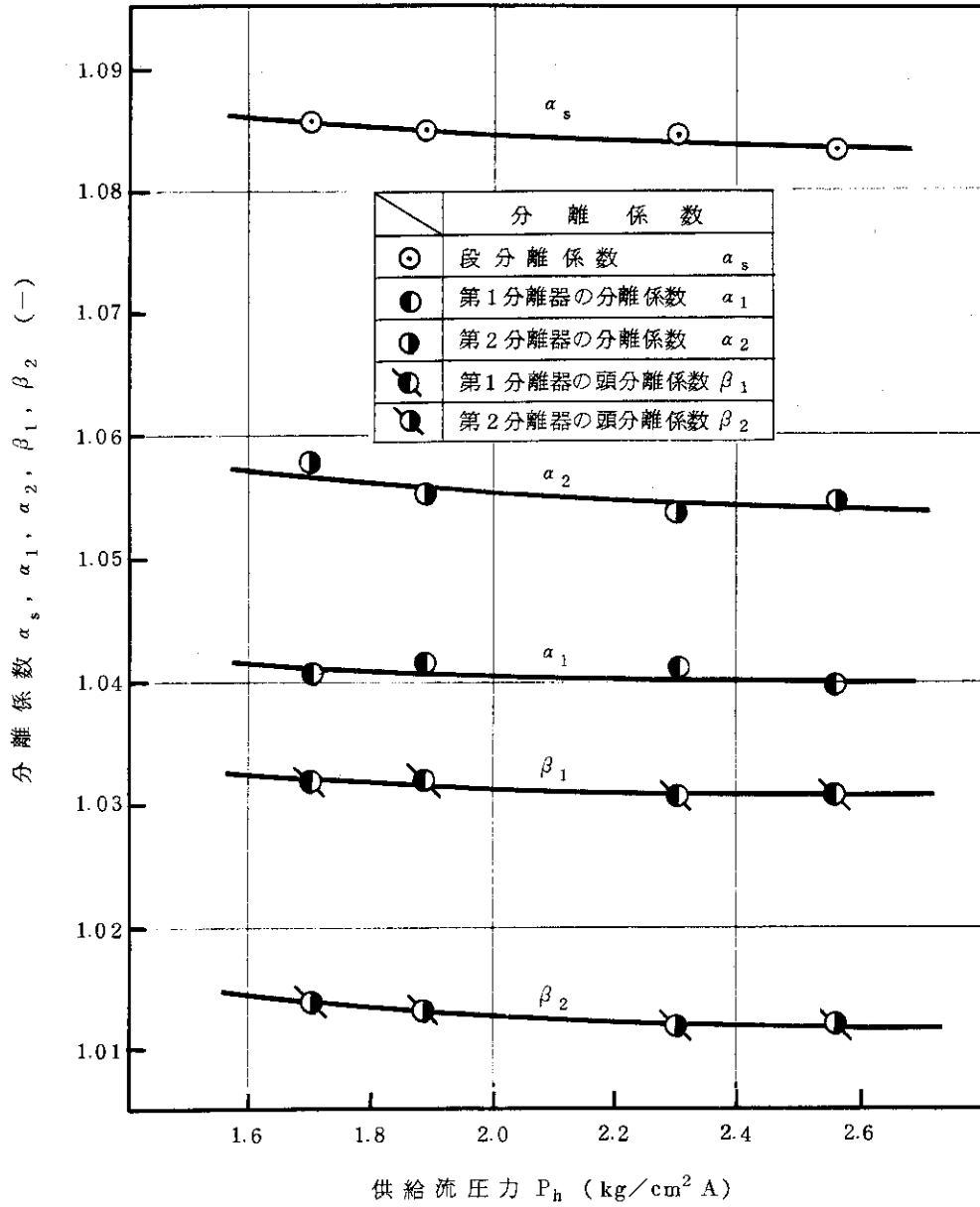


図 4.12 2分割型拡散筒における分離係数と供給流圧力の関係 (分割比3) (第3段目における値)

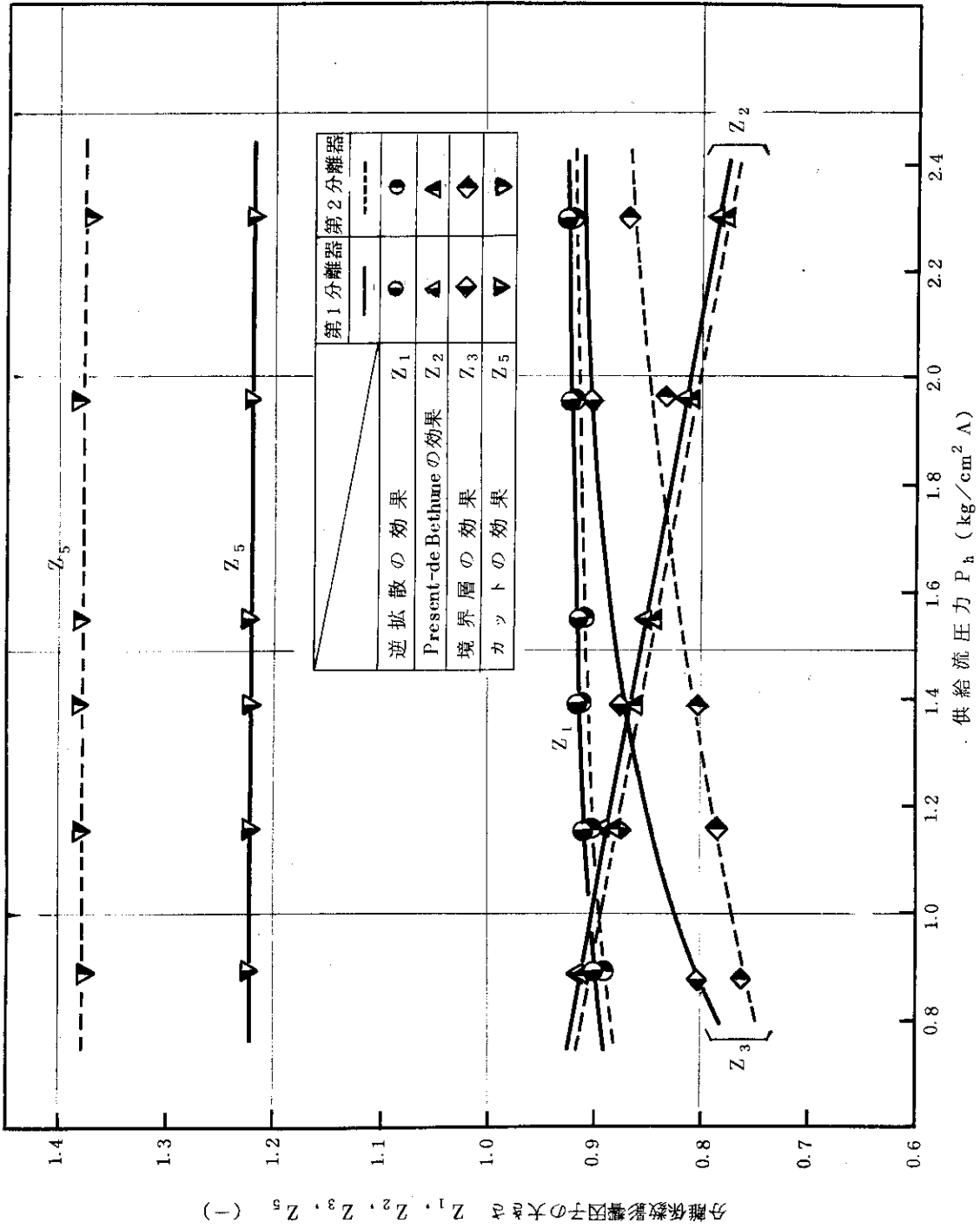


図 4.13 2分割型拡散筒における分離係数影響因子の大きさと供給流圧力の関係 (分割比3) (第3段目における値)

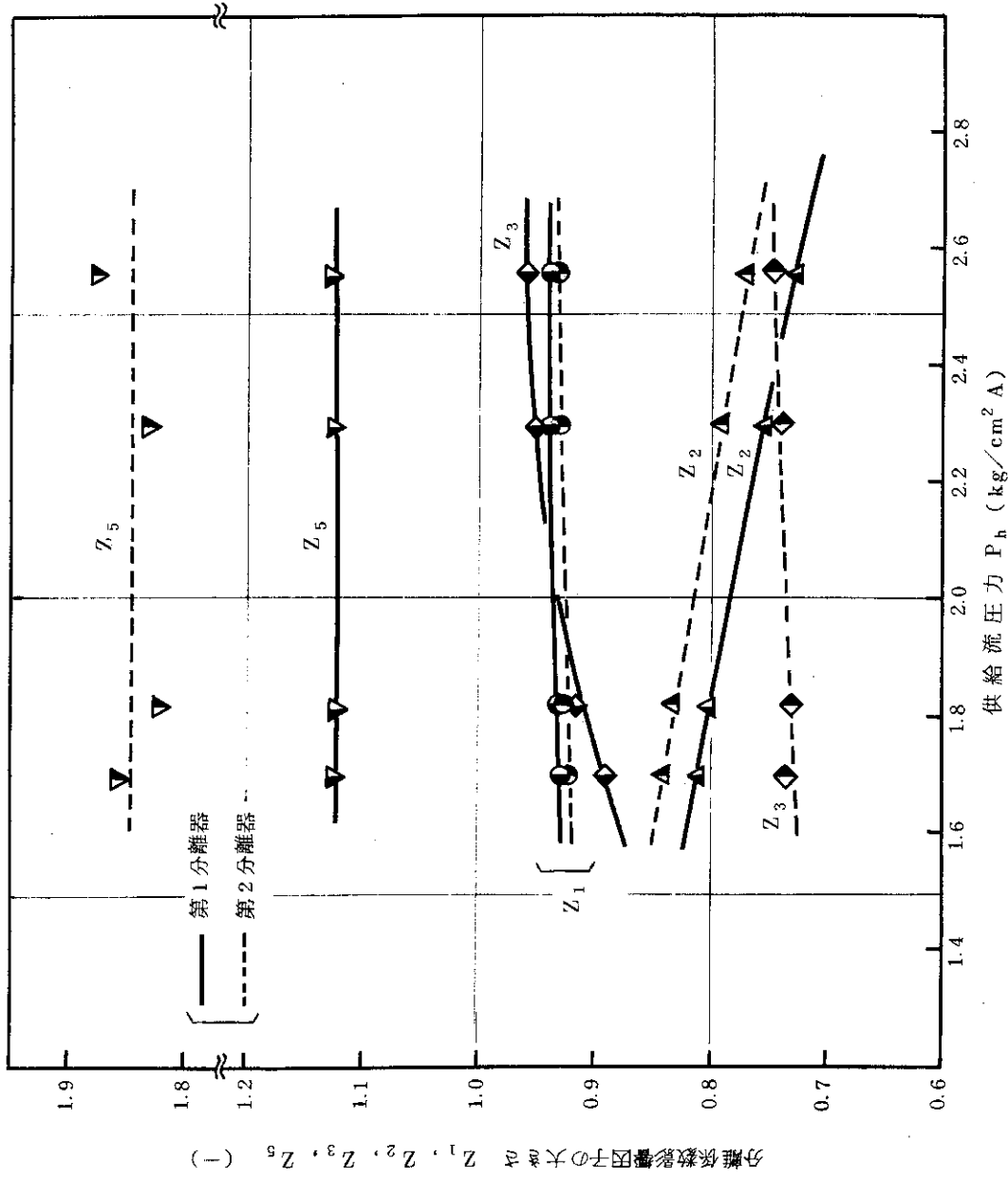


図 4.14 2 分割型拡散筒における分離係数影響因子の大きさ と 供給流圧力の関係 (分割比 3) (第 3 段目における値)
〔 Z_1, Z_2, Z_3, Z_5 は前図の記号と同じ〕

5. ま と め

本研究は、アルミナ隔膜を装着した5段のカスケード実験装置を用いて実施したアルゴン同位体分離実験のうち、分割比が1あるいは3の2分割型拡散筒からなるHertz型カスケードの全還流条件における分離特性および流動特性を調べたものである。

本実験により得られた結果を要約すると、以下の通りである。

(1) 起動時および定常時におけるカスケード各段の分離特性と流動特性が非常に安定していることから、Hertz型カスケードが通常の方形カスケードと同様に円滑に運転できることを確かめた。

(2) 2分割型拡散筒ではリサイクル流を設けたことにより1段当りの循環流量が減少するため、カスケードの平衡達成時間は長くなる傾向にある。

(3) 2分割型拡散筒は、2個の分離器における分離係数 α 、 β とカット θ との関係を利用し、見掛けの段分離係数 α_s の向上をはかろうとするものである。通常の方形カスケードではカットはほぼ0.5に固定されるが、Hertz型カスケードでは分割比を変えることによりカットを任意に選定することができる。供給流圧力が約 $1.92 \text{ kg/cm}^2 \text{ A}$ 、圧力比が約0.075の実験例では、Hertz型カスケードの段分離効率 α_s は、方形カスケードに比して、分割比1のときは1.33倍、分割比3のときは1.63倍にも向上することが明らかになった。即ち、2分割型拡散筒は、段分離係数に影響する諸因子のうちカットの効果を最大限に活用した拡散筒といえる。

(4) 段分離係数に影響するその他の因子と操作条件との関係については、通常の方法カスケードの場合とほぼ同様の結果が得られた。

以上から、2分割型拡散筒は、カスケードの所要段数を削減するのに極めて有効であることが判明した。しかし、所定量の製品を得ようとする場合には、1段あたりの循環流量を分割比に応じて増加させる必要があり、各段の拡散筒(隔膜面積)および圧縮機を大きくしなければならない。即ち、この拡散筒の採用は、段数の削減と段構成機器の大型化という長短相反する結果をもたらすので、建設費および操業費を含むプラント全体の経済性を考慮して総合的に判断する必要がある。なお、筆者らの検討では、分割比を適切に選定することにより、Hertz型カスケードの所要動力を通常の方形カスケードそれ以下にするが可能であり、建設費も段数の削減にともないある程度まで低減できる見通しが得られている。

謝 辞

本研究を実施するにあたっては、青地哲男氏（高温工学室長）、野村末雄氏（企画室長）および下川純一氏（燃料工学部長）の御指導をいただいた。また、本報告書のまとめにあたっては、岩本多実氏（燃料工学部次長）から有益な助言をいただいた。さらに、多数の試料の分析については、小森卓二氏（分析センター室長）はじめ同室質量分析グループの方々の協力を得た。

本報告書を作成するにあたり、これらの諸氏に深い謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Naruse Y., Matsuda Y., Maruyama Y. and Aochi T. : JAERI-M 6501, " Static Characteristics of Two-Compartment Diffusers " [in Japanese] (1976)
- 2) Yoshida H., Fujine S., Saito K., Ouchi M. and Naruse Y. : JAERI-M 8374, " Separation of Argon Isotopes by Porous Membrane Method (Part II) - Separation Characteristics of Square Cascade under Total Reflux " [in Japanese] (1979)
- 3) Naruse Y., Yoshida H., Fujine S., Matsuda Y., Maruyama Y., Tanaka T. and Aochi T. : JAERI-M 7822, " Separation of Argon Isotopes by Porous Membrane Method (Part I) - Design of Engineering Cascade Facility " [in Japanese] (1978)
- 4) Naruse Y., Yoshida H. : JAERI-M 7858, " Separation of Gases by Porous Membrane Method [in Japanese] (1978)

謝 辞

本研究を実施するにあたっては、青地哲男氏（高温工学室長）、野村末雄氏（企画室長）および下川純一氏（燃料工学部長）の御指導をいただいた。また、本報告書のまとめにあたっては、岩本多実氏（燃料工学部次長）から有益な助言をいただいた。さらに、多数の試料の分析については、小森卓二氏（分析センター室長）はじめ同室質量分析グループの方々の協力を得た。

本報告書を作成するにあたり、これらの諸氏に深い謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Naruse Y., Matsuda Y., Maruyama Y. and Aochi T. : JAERI-M 6501, " Static Characteristics of Two-Compartment Diffusers " [in Japanese] (1976)
- 2) Yoshida H., Fujine S., Saito K., Ouchi M. and Naruse Y. : JAERI-M 8374, " Separation of Argon Isotopes by Porous Membrane Method (Part II) - Separation Characteristics of Square Cascade under Total Reflux " [in Japanese] (1979)
- 3) Naruse Y., Yoshida H., Fujine S., Matsuda Y., Maruyama Y., Tanaka T. and Aochi T. : JAERI-M 7822, " Separation of Argon Isotopes by Porous Membrane Method (Part I) - Design of Engineering Cascade Facility " [in Japanese] (1978)
- 4) Naruse Y., Yoshida H. : JAERI-M 7858, " Separation of Gases by Porous Membrane Method [in Japanese] (1978)

附表1 カスケードの運転条件

実験番号	-(760120T1450)					5(760120T1515)					3(760120T1645)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
原料ガス初期充填圧力 (kg/cm ² A)	0.81														
製品流量 (s.cc/min)	0.0														
原料流量 (s.cc/min)	0.0														
廃棄流量 (s.cc/min)	0.0														
製品拔出し段位置	---														
原料供給し段位置	---														
廃棄流拔出し段位置	---														
カスケード内流動条件															
供給流圧力 (PRC-F) (kg/cm ² A)	1.99	1.96	1.96	1.96	1.97	1.98	1.96	1.96	1.96	1.96	1.97	1.38	1.39	1.38	1.39
" (信号圧)	0.86	0.88	0.89	0.79	0.86	0.86	0.86	0.88	0.79	0.86	0.86	0.85	0.86	0.87	0.78
第1拡散流圧力 (PR-P) (mmHg)	113	116	110	115	113	114.0	116.0	110.0	114.5	113.0	89.0	92.5	86.0	90.5	88.5
第2拡散流圧力 (PR-E) (mmHg)	125	114	115	112	115.5	126.0	114.0	115.0	112.0	115.0	97.0	87.0	89.0	86.0	88.0
拡散筒圧力損失 (mmH ₂ O)	6.50														
供給流量 (F) 記録計 (SL/min)	81.9	82.5	84.6	86.7	84.0	82.2	81.6	84.0	85.5	84.0	56.64	59.04	59.04	60.00	58.08
指示計 (SL/min)	84.0	78.0	79.0	84.0	84.0	84.0	79.0	80.0	84.0	84.0	57.0	54.0	56.0	59.0	57.5
第1拡散流量 (P) 記録計 (SL/min)	26.2	25.6	26.6	27.9	25.1	26.5	25.8	26.5	27.9	25.0	17.40	18.08	18.56	19.04	17.00
指示計 (SL/min)	26.0	25.8	26.0	26.4	24.4	26.0	26.0	26.0	26.4	24.4	18.0	18.0	18.0	18.2	16.4
拡散流量 (W) 記録計 (SL/min)	26.5	26.4	26.6	26.5	27.0	27.2	25.3	25.5	25.6	27.0	18.96	17.60	17.96	17.96	18.20
指示計 (SL/min)	26.0	25.8	25.5	24.4	26.2	26.4	26.0	26.0	24.6	26.0	17.20	17.50	17.80	17.80	18.00
第2拡散流量 (E) 記録計 (SL/min)	25.97	25.64	26.50	27.96	25.05	26.26	25.84	26.40	27.95	24.96	17.25	18.19	18.50	19.13	17.01
指示計 (SL/min)															
供給流温度 (TR-A-F) (°C)	1.33	1.36	1.37	1.37	1.33	1.38	1.42	1.42	1.42	1.38	1.42	1.42	1.47	1.46	1.40
第1拡散流温度 (TR-P) (°C)	1.23	1.29	1.29	1.28	1.35	1.29	1.34	1.33	1.32	1.33	1.33	1.37	1.34	1.37	1.31
圧縮機運転条件															
回転数 (rpm)	450.1	449.5	445.7	451.4	451.8										
消費電流 (A)	14.5	15.0	16.0	14.2	14.3	14.3	15.1	15.5	14.2	14.3	14.3	14.2	14.1	14.5	13.8
吸入圧力 (mmHg)	630	640	650	660	650										
吐出圧力 (kg/cm ² G)	0.94	0.95	0.92	0.92	0.97										
全段の連結運転開始時刻															
14:00															
カスケード条件の変更時刻															
16:00															

附表 1 (続き)

実 験 番 号	-(760123T1510)					1(760123T1602)					2(760123T1724)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
原料ガス初期充填圧力 (kg/cm ² A)	0.37					0.37					0.50				
製品流量 (s.cc/min)	0.0					0.0					0.0				
原料流量 (s.cc/min)	0.0					0.0					0.0				
廃棄流量 (s.cc/min)	0.0					0.0					0.0				
製品拔出し段位置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
原料流供給段位置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
廃棄流拔出し段位置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
カスケード内流動条件															
供給流圧力 (PRG-F) (kg/cm ² A)	0.85	0.89	0.89	0.89	0.90	0.82	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.90	0.90
〃 (信号圧) (kg/cm ² G)	0.84	0.88	0.86	0.775	0.83	0.85	0.86	0.85	0.78	0.84	0.83	0.83	0.85	0.79	0.86
第1拡散流圧力 (PR-P) (mmHg)	6.60	7.00	6.45	6.90	6.70	6.60	7.00	6.40	6.90	6.70	8.10	8.40	7.65	8.10	7.90
第2拡散流圧力 (PR-E) (mmHg)	7.20	6.70	6.90	6.60	6.80	7.00	6.70	6.90	6.70	6.80	9.10	8.30	8.40	8.10	8.25
拡散筒圧力損失 (mmH ₂ O)	-	-	-	2.20	-	-	-	-	2.0	-	-	-	-	3.60	-
供給流量 (F) 記録計 (Sl/min)	3.360	3.544	3.600	3.780	3.648	3.192	3.396	3.648	3.840	3.684	4.800	4.764	4.800	4.944	4.824
指示計 (Sl/min)	3.50	3.40	3.70	3.75	3.70	3.40	3.45	3.80	3.75	3.70	4.90	4.50	4.90	4.90	4.90
第1拡散流量 (P) 記録計 (Sl/min)	10.92	11.32	11.40	12.36	10.80	10.52	11.48	11.48	12.48	10.72	14.80	15.12	15.28	16.28	14.28
指示計 (Sl/min)	11.50	12.0	11.6	12.0	10.0	10.4	12.0	11.5	12.0	10.0	15.5	16.0	15.5	15.8	14.0
拡散流量 (W) 記録計 (Sl/min)	10.40	10.96	11.20	11.04	11.60	9.76	9.68	11.40	11.36	11.72	15.24	14.40	14.84	14.40	15.16
指示計 (Sl/min)	10.60	10.00	11.00	11.50	12.00	10.2	10.1	12.0	11.9	12.0	15.8	14.0	15.0	15.0	15.6
第2拡散流量 (E) 記録計 (Sl/min)	10.80	11.38	11.31	12.42	10.78	10.44	11.54	11.38	12.52	10.70	14.61	15.14	15.13	16.28	14.22
指示計 (Sl/min)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
供給流温度 (TRA-F) (°C)	10.1	10.6	10.4	10.3	10.1	10.5	11.2	10.9	11.0	10.6	10.7	11.1	11.0	11.1	10.6
第1拡散流温度 (TR-P) (°C)	9.60	10.2	10.0	10.0	10.0	10.0	10.5	10.4	10.5	10.3	10.1	10.4	10.4	10.5	10.1
圧縮機運転条件															
回転数 (rpm)	44.96	45.03	44.77	45.07	45.10	44.96	45.03	44.77	45.07	45.10	44.85	44.73	44.55	44.80	44.98
消費電圧 (A)	1.40	1.41	1.46	1.36	1.35	-	-	-	-	-	1.42	1.50	1.56	1.43	1.37
吸入圧力 (mmHg)	6.80	6.80	7.00	6.90	6.90	-	-	-	-	-	6.60	6.60	6.70	6.80	6.80
吐出圧力 (kg/cm ² G)	0.11	0.09	0.09	0.07	0.09	-	-	-	-	-	0.18	0.20	0.19	0.14	0.13
全段の連結運転開始時刻															
カスケード条件の変更時刻															
14:00															
16:41															

附表 1 (続き)

美 験 番 号	-(760127T1508)					6(760127T1550)					4(760203T1100)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
原料ガス初期充填圧力 (kg/cm ² A)	0.95					0.95					0.66				
製品流量 (s·cc/min)	0.0					0.0					0.0				
原料流量 (s·cc/min)	0.0					0.0					0.0				
廃棄流量 (s·cc/min)	0.0					0.0					0.0				
製品抜き出し段位置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
原料流供給段位置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
廃棄流抜き出し段位置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
カスケード内流動条件															
供給流圧力 (PRC-F) (kg/cm ² A)	2.34	2.30	2.30	2.30	2.30	2.35	2.30	2.30	2.30	2.31	1.55	1.55	1.55	1.55	1.56
" (信号圧) (kg/cm ² G)	0.86	0.86	0.88	0.79	0.84	0.86	0.86	0.88	0.79	0.84	0.85	0.86	0.87	0.79	0.84
第1拡散流圧力 (PR-P) (mmHg)	1.295	1.360	1.250	1.295	1.280	1.300	1.350	1.250	1.300	1.277	0.975	1.040	0.945	0.990	0.970
第2拡散流圧力 (PR-E) (mmHg)	1.440	1.290	1.330	1.270	1.265	1.430	1.290	1.335	1.280	1.270	1.015	0.970	1.010	0.955	0.960
拡散筒圧力損失 (mmHg)	-	-	-	7.70	-	-	-	-	7.50	-	-	-	-	-	-
供給流量 (F) 記録計 (Sl/min)	9.36	9.00	9.36	10.05	9.75	9.30	8.79	9.36	10.05	9.78	6.408	6.420	6.624	6.744	6.612
指示計 (Sl/min)	9.80	9.55	9.75	9.95	10.00	9.60	9.55	9.60	9.95	9.95	6.20	6.20	6.10	6.50	6.60
第1拡散流量 (P) 記録計 (Sl/min)	3.14	3.10	3.10	3.32	2.91	3.12	3.09	3.09	3.31	2.90	2.044	2.044	2.080	2.208	1.968
指示計 (Sl/min)	3.04	3.01	3.02	3.21	2.80	3.01	3.01	3.02	3.20	2.80	2.01	2.00	2.02	2.04	1.92
拡散流量 (W) 記録計 (Sl/min)	2.99	3.13	3.08	3.02	3.12	2.92	3.02	3.08	3.01	3.14	2.024	1.972	2.016	2.04	2.14
指示計 (Sl/min)	2.95	3.00	3.05	3.05	3.04	2.87	2.98	3.04	3.00	3.02	2.01	1.86	2.02	1.98	1.98
第2拡散流量 (E) 記録計 (Sl/min)	3.111	3.114	3.084	3.325	2.913	3.095	3.102	3.073	3.314	2.94	2.036	2.058	2.067	2.215	1.970
指示計 (Sl/min)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
供給流温度 (TRA-F) (°C)	1.21	1.25	1.28	1.24	1.22	1.26	1.31	1.31	1.30	1.28	1.14	1.21	1.20	1.25	1.23
第1拡散流温度 (TR-P) (°C)	1.14	1.19	1.20	1.18	1.17	1.19	1.23	1.26	1.22	1.20	1.10	1.19	1.16	1.23	1.22
圧縮機運転条件															
回転数 (rpm)	450.1	448.6	446.6	448.1	449.2	450.1	448.6	446.6	448.1	449.2	449.5	450.0	448.0	449.1	449.0
消費電流 (A)	15.7	16.3	16.3	16.1	15.2	15.1	16.0	16.2	16.2	15.6	14.0	14.4	14.5	15.3	14.8
吸込圧力 (mmHg)	6.20	6.20	6.30	6.30	6.30	-	-	-	-	-	6.50	6.40	6.60	6.80	6.60
吐出圧力 (kg/cm ² G)	1.36	1.37	1.32	1.25	1.29	-	-	-	-	-	0.55	0.60	0.61	0.53	0.59
全段の連結運転開始時刻	14:05														
カスケード条件の変更時刻	10:39														

附表 1 (続き)

実験番号	8(760217T1503)					9(760217T1655)					10(760223T1216)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
原料ガス初期充填圧力(kg/cm ² A)	0.80					0.95					1.05				
製品流量(s·cc/min)	0.0					0.0					0.0				
原料流量(s·cc/min)	0.0					0.0					0.0				
廃棄流量(s·cc/min)	0.0					0.0					0.0				
製品抜き出し段位置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
原料供給段位置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
廃棄流抜き出し段位置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
カスケード内流動条件															
供給流圧力(PRC-F)(kg/cm ² A)	2.14	1.895	1.89	1.90	1.895	2.32	2.29	2.30	2.30	2.31	2.61	2.55	2.56	2.55	2.555
“(信号圧)	0.96	0.99	0.97	0.89	0.96	0.98	0.98	0.98	0.89	0.79	0.99	0.98	0.98	0.89	0.97
第1拡散流圧力(PR-P)(mmHg)	10.10	10.10	9.40	10.00	9.70	11.50	11.90	10.90	11.45	11.20	12.40	12.75	11.90	12.40	12.25
第2拡散流圧力(PR-E)(mmHg)	11.90	10.00	10.00	9.65	9.80	12.60	11.60	11.90	11.25	11.45	13.70	12.60	13.00	12.40	12.50
拡散筒圧力損失 (mmH ₂ O)	-	-	-	3.20	-	-	-	-	4.00	-	-	-	-	4.30	-
供給流量(F)記録計(Sℓ/min)	7.440	6.804	6.420	6.948	6.720	7.920	8.040	81.36	83.64	81.84	88.56	92.40	92.40	94.80	94.08
指示計(Sℓ/min)	7.50	6.50	6.40	6.80	6.60	7.90	7.80	80.0	84.0	81.0	90.0	87.0	92.0	92.0	91.0
第1拡散流量(P)記録計(Sℓ/min)	14.28	12.30	12.32	14.62	11.64	16.28	14.79	15.20	18.60	14.40	17.92	17.20	17.76	19.76	14.92
指示計(Sℓ/min)	14.2	12.6	12.6	13.8	11.0	15.60	15.50	16.00	16.60	14.00	17.8	16.8	17.6	19.7	14.0
拡散流量(W)記録計(Sℓ/min)	16.46	14.22	12.32	13.44	13.76	16.80	15.00	14.88	15.00	17.00	20.56	16.40	16.00	17.00	19.44
指示計(Sℓ/min)	16.0	14.0	13.0	13.5	13.8	16.80	15.00	15.50	15.80	16.20	18.80	16.00	16.00	17.00	18.00
第2拡散流量(E)記録計(Sℓ/min)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
指示計(Sℓ/min)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
供給流温度(TR-A-F)(°C)	15.0	16.0	15.4	15.2	15.3	15.7	16.0	15.9	16.0	15.8	12.3	12.8	12.8	12.8	12.8
第1拡散流温度(TR-P)(°C)	14.3	14.8	15.0	14.9	15.1	15.0	15.2	15.3	15.2	15.2	11.9	12.1	12.1	12.1	12.1
圧縮機運転条件															
回転数 (rpm)	450.2	447.4	449.8	450.1	449.1	-	-	-	-	-	448.3	449.9	452.8	451.0	449.8
消費電力(A)	14.0	16.0	14.0	14.2	14.8	-	-	-	-	-	15.1	16.0	14.5	15.2	15.7
吸入圧力(mmHg)	6.50	6.50	6.70	6.70	6.70	-	-	-	-	-	6.20	6.10	6.20	6.30	6.20
吐出圧力(kg/cm ² G)	1.13	0.95	0.90	0.89	0.92	-	-	-	-	-	1.65	1.66	1.62	1.55	1.62
全段の連結運転開始時刻	13:35					16:08					11:06				
カスケード条件の変更時刻	-														

附表 1 (続き)

実験番号	-(760223T1233)					7(760223T1536)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
原料ガス初期充填圧力 (kg/cm ² A)	0.70									
製品流量 (s·cc/min)	0.0									
原料流量 (s·cc/min)	0.0									
廃棄流量 (s·cc/min)	0.0									
製品抜き出し段位置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
原料供給段位置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
廃棄流抜き出し段位置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
カスケード内流動条件										
供給流圧力 (PRG-F) (kg/cm ² A)	2.58	2.55	2.56	2.56	2.56	1.71	1.69	1.70	1.71	1.71
" (信号圧) (kg/cm ² G)	0.99	0.98	0.98	0.89	0.97	0.975	0.99	0.98	0.89	0.96
第1拡散流圧力 (PR-P) (mmHg)	124.0	129.0	118.0	124.0	122.5	92.0	96.0	87.5	94.0	91.0
第2拡散流圧力 (PR-E) (mmHg)	134.0	125.0	130.0	122.5	125.0	99.5	91.0	96.0	89.0	92.0
拡散筒圧力損失 (mm H ₂ O)				4.50					280	
供給流量 (F) 記録計 (Sl/min)	85.80	92.40	93.00	95.64	93.60	57.24	59.76	59.76	62.76	61.80
指示計 (Sl/min)	96.0	89.0	92.0	94.0	94.0	57.0	57.0	60.0	61.0	60.0
第1拡散流量 (P) 記録計 (Sl/min)	174.8	170.8	178.0	198.0	140.8	110.4	111.0	118.0	131.0	102.4
指示計 (Sl/min)	175.0	164.0	176.0	197.0	138.0	115.0	110.0	118.0	125.0	95.0
未拡散流量 (W) 記録計 (Sl/min)	199.2	168.0	168.0	174.8	194.0	124.0	114.0	110.0	111.6	128.0
指示計 (Sl/min)	182.0	160.0	175.0	178.0	182.0	124.0	110.0	110.0	115.0	125.0
第2拡散流量 (E) 記録計 (Sl/min)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
指示計 (Sl/min)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
供給流温度 (TRA-F) (°C)	12.7	13.0	13.0	13.0	13.0	13.1	13.6	13.3	13.6	13.3
第1拡散流温度 (TR-P) (°C)	12.7	12.3	12.5	12.4	12.5	12.6	12.9	12.8	13.1	13.1
圧縮機運転条件										
回転数 (rpm)	-	-	-	-	-	451.6	455.5	454.8	454.0	453.8
消費電流 (A)	-	-	-	-	-	14.4	14.2	14.2	14.0	14.2
吸入口圧力 (mmHg)	-	-	-	-	-	640	640	650	660	650
吐出圧力 (kg/cm ² G)	-	-	-	-	-	0.79	0.80	0.79	0.74	0.84
全段の連結運転開始時刻	11:06									
カスケード条件の変更時刻	14:40									

附表2. カスケード内における ^{36}Ar の濃度分布 (実測値)

[単位: mol%]

段番号	5 (760120T1533)				3 (760120T1700)			
	供給濃度	第1拡散濃度	未拡散濃度	第2拡散濃度	供給濃度	第1拡散濃度	未拡散濃度	第2拡散濃度
1	0.2764	0.2851	0.2786	0.2664	0.2773	0.2854	0.2794	0.2669
2	0.2954	0.3040	0.2974	0.2849	0.2969	0.3055	0.2991	0.2853
3	0.3151	0.3244	0.3176	0.3035	0.3178	0.3271	0.3198	0.3054
4	0.3363	0.3459	0.3387	0.3234	0.3401	0.3498	0.3426	0.3269
5	0.3583	0.3690	0.3615	0.3478	0.3628	0.3686	0.3668	0.3503

段番号	1 (760123T1550)				2 (760123T1743)			
	供給濃度	第1拡散濃度	未拡散濃度	第2拡散濃度	供給濃度	第1拡散濃度	未拡散濃度	第2拡散濃度
1	0.2901	-	0.2798	0.2926	0.2897	0.2983	0.2794	0.2921
2	0.3097	0.3184	0.2975	0.3116	0.3099	0.3193	0.2978	0.3116
3	0.3303	0.3397	0.3183	0.3330	0.3312	0.3412	0.3184	0.3332
4	0.3533	0.3634	-	0.3556	0.3545	0.3647	0.3405	0.3569
5	-	0.3882	0.3638	0.3800	0.3800	0.3900	0.3646	0.3818

段番号	6 (760127T1610)				4 (760203T1118)			
	供給濃度	第1拡散濃度	未拡散濃度	第2拡散濃度	供給濃度	第1拡散濃度	未拡散濃度	第2拡散濃度
1	0.2903	0.2987	0.2794	0.2924	0.3317	0.3417	0.3190	0.3570
2	0.3094	0.3182	0.2983	0.3118	0.3544	0.3649	0.3412	0.3570
3	0.3302	0.3397	0.3179	0.3326	0.3788	0.3903	0.3640	0.3817
4	0.3526	0.3624	0.3396	0.3551	0.4057	0.4170	0.3894	0.4079
5	-	0.3862	0.3625	0.3789	0.4322	0.4461	0.4171	0.4366

附表 2 (続き)

〔単位：mol%〕

段番号	8 (760217T1536)				9 (760217T1717)			
	供給濃度	第1拡散濃度	未拡散濃度	第2拡散濃度	供給濃度	第1拡散濃度	未拡散濃度	第2拡散濃度
1	0.2835	0.2927	0.2710	0.2852	0.2825	0.2914	0.2694	0.2833
2	0.3063	0.3161	0.2918	0.3082	0.3050	0.3148	0.2908	0.3041
3	0.3305	0.3410	0.3144	0.3318	0.3295	0.3395	0.3132	0.3301
4	0.3574	0.3695	0.3222	0.3588	0.3562	0.3664	0.3388	0.3577
5	0.3842	0.3971	(0.3650)	0.3869	0.3833	0.3955	0.3662	0.3858

段番号	10 (760223T1238)				7 (760223T1558)			
	供給濃度	第1拡散濃度	未拡散濃度	第2拡散濃度	供給濃度	第1拡散濃度	未拡散濃度	第2拡散濃度
1	0.2853	0.2940	0.2724	0.2862	0.2819	(0.2917)	0.2689	0.2833
2	0.3068	0.3163	0.2927	0.3080	0.3047	0.3148	0.2900	0.3071
3	0.3288	0.3388	0.3129	0.3299	0.3300	0.3405	0.3137	0.3317
4	0.3533	0.3632	0.3364	0.3553	0.3574	0.3685	0.3398	0.3596
5	0.3782	0.3907	0.3622	0.3818	0.3852	0.3982	0.3674	0.3874