

JAERI-M

8 3 7 4

多孔質隔膜法によるアルゴン同位体の分離(その2)
—通常型方形カスケードの全還流操作による分離特性—

1979年8月

吉田 浩・藤根幸雄・斉藤恵一朗・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.

多孔質隔膜法によるアルゴン同位体の分離(その2)
—通常型方形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 恵一郎

大内 操⁺・成瀬 雄二

(1979年7月16日受理)

本報告は、多孔質隔膜を装着した5段からなる工学的規模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の分離特性に関する研究のうち、通常型方形カスケードの全還流操作による分離実験の結果について述べたものである。

実験で以下のことが明らかになった。

- (1) 実験に用いたアルミナ隔膜の細孔直径，迷宮度はそれぞれ約 400 \AA および13~15(一)と推定された。
- (2) 隔膜の透過係数は，広い圧力範囲において一定であり，アルゴン同位体の分離過程がほぼ理想的なKnudsen流の条件に従うものと推定された。
- (3) カスケードの平衡達成時間は，約30~40分であり，各段のガスインベントリーにより変化した。
- (4) 段分離係数に及ぼす圧力の影響は，Knudsen およびPresent-de Bethuneの理論により推定できることが確かめられた。
- (5) 段分離係数は，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，在来の推算式で予測できることが分った。
- (6) 分離係数に影響する因子のうち，隔膜近傍の流れの効果を推定するために，ガスの流速，物性値および隔膜の表面摩擦係数を考慮に入れた実験式を得た。

JAERI-M 8374

Separation of Argon Isotopes by Porous Membrane Method (Part II)
Separation Characteristics of Square 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 July 16, 1979)

Separation characteristics of an engineering-scale cascade equipment, which is composed of five stages using Al_2O_3 barriers, were examined under different operating conditions.

This report describes the results of the separation experiment of argon isotopes by the square cascade operated under total reflux.

The results are as follows:

- (1) Mean pore diameter and tortuosity of the barriers were estimated to be 400Å and 13-15, respectively.
- (2) Flow mechanism through the barriers was proved to be ideal Knudsen flow by measurement of the permeability.
- (3) The cascade was equilibrated in 30-40 minutes, depending on stage gas inventory.
- (4) The effect of an operating pressure on the separation factor could be estimated by Knudsen's and Present-deBethune's theories.
- (5) The stage separation factor could be estimated by the conventional theoretical equations by introducing a correction factor as a function of Reynolds number of the permeating flow through the barriers.
- (6) An experimental equation to estimate the flow effect on the separation factor was obtained considering velocity and physical properties of the gas in the vicinity of the barrier surface.

Keywords : Isotope Separation, Square Cascade, Porous Membrane,
Permeability, Knudsen Flow, Separation Factor,
Total Reflux, Equilibrium Time

+) Analytical Chemistry Laboratory , Tokai, JAERI

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置	2
2.1 カスケードの構成	2
2.2 主要機器	3
2.3 配管系統	4
2.4 計装・制御系統	4
3. 実験方法	15
3.1 カスケードの起動	15
3.2 測定方法	16
4. 解析方法	18
4.1 透過係数	18
4.2 分離係数	18
4.3 分離係数に影響を及ぼす諸因子	19
4.4 隔膜の表面摩擦係数	21
4.5 平衡達成時間	22
5. 結果および考察	23
5.1 透過係数	23
5.2 起動時におけるカスケード特性	23
5.3 平衡時におけるカスケード特性	24
5.3.1 濃度分布	24
5.3.2 段分離特性	25
5.3.3 分離係数影響因子	26
6. 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 起動時における濃度の経時的变化	47
附表3 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. Experimental apparatus	2
2.1 Cascade flowsheet	2
2.2 Stage components	3
2.3 Piping system	4
2.4 Instrumentation and Control system.....	4
3. Experimental procedure	15
3.1 Startup procedure of cascade	15
3.2 Measuring procedure	16
4. Calculation method.....	18
4.1 Permeability of barrier	18
4.2 Separation factor of diffuser	18
4.3 Parameters affecting separation factor	19
4.4 Friction factor of barrier tube	21
4.5 Equilibrium time of cascade	22
5. Result and Discussion	23
5.1 Permeability of Al_2O_3 barrier.....	23
5.2 Startup characteristics of cascade.....	23
5.3 Static characteristics of cascade.....	24
5.3.1 Concentration profile	25
5.3.2 Stage separation characteristics	26
5.3.3 Parameters affecting separation factor	41
6. Conclusion	42
References	42
Appendix ;	
Table-1 : Operating conditions of cascade	43
Table-2 : Transient behavior of ^{36}Ar concentration in cascade startup	47
Table-3 : Concentration profile of ^{36}Ar in equilibrium state	48

1. はじめに

多孔質隔膜法による同位体分離の試みは工業的規模ではウラン濃縮用のガス拡散プラントとして実現されており、カスケードの最適化および動特性に関する研究は数多く見出すことができる^{1~4)}。また、隔膜による分離過程についてもJAERI-M7858⁵⁾に報告したように多くの研究がなされている。しかしながら、これらの研究は理論的解析あるいはごく限られた条件での実験が中心であり、工学的規模のカスケード装置による研究は極めて少ない。ガス拡散プラントの設計、運転を行うためには、カスケードならびに隔膜、拡散筒、圧縮機などの構成機器の特性と操作条件との相関を明らかにすることが不可欠である。また、カスケードの起動特性、外乱の影響、制御方法なども把握しておかねばならない。

そこで、カスケードに関する工学的諸特性を明らかにすることを目的として、種々のカスケード形式について広範囲の操作条件におけるアルゴン同位体分離研究を行った。このための実験装置は、その詳細についてはすでに報告しているが⁶⁾、5段からなるカスケードシステムであり、隔膜には管状の Al_2O_3 隔膜を使用している。

この装置は、全還流操作ならびに原料ガス、製品流、廃棄流の供給もしくは抽出しが行なえる方式となっている。さらに、拡散筒は；拡散流路を拡散筒の長さ方向に仕切って2分割し、カスケードをHertz型に組みかえることのできる構造となっている。

本カスケード実験装置による一連のアルゴン同位体分離実験は、カスケードの運転条件により次の3つに大別される。

- (i) 通常型方形カスケードの全還流操作による分離実験
- (ii) Hertz型カスケードの全還流操作による分離実験
- (iii) 上記2形式のカスケードの定常供給・抽出し操作による分離実験

このうち、(i)、(ii)は、カスケードの起動特性および平衡時における分離特性（濃度分布、分離係数、平衡達成時間など）と操作条件との相関を調べるためのものである。(iii)は、カスケード起動時における供給・抽出し操作ならびに平衡達成後の還流比操作の分離特性への影響を調べるためのものである。

本報告は、これらの実験のうち(i)についての実験結果を整理し、まとめたものである。

2. 実験装置

本研究で使用したカスケード実験装置は、ガス拡散法による実際のカスケードにおいて想定される種々の操作条件下の分離特性および流動特性を調べ、プラントの設計、操作に必要な工学的基礎データを得ることを目的として製作したものである。本装置の設計上の考え方ならびに詳細仕様については前報⁶⁾に述べているので、こゝでは装置の構成および機能の概要を示しておく。

2.1 カスケードの構成

図2.1は、5段からなる通常の方形カスケードの全体的な概念を示したものである。各段の主要構成機器は、多孔質隔膜を内蔵した拡散筒、ガスを昇圧して拡散筒に供給するための圧縮機および圧縮熱を除去してガス温度を所定値に保つための熱交換器である。図では、実際のプラント概念を示すために、第3段目を供給段とする濃縮部3段、回収部2段のカスケードを示しており、定常運転時には、所定濃度の製品流および廃棄流がそれぞれの還流条件で抽出されるとともにそれに見合う流量の原料が供給される。本報告の対象とする全還流操作の場合には、製品流および廃棄流はすべて還流としてそれぞれの抽出し段（第5段および第1段）に戻される（ $P=0$ 、 $W=0$ 、 $F=0$ ）。

図2.2は、カスケード実験装置のフローシートを概念的に示したものである。各段は、隔膜を内蔵した拡散筒、往復動型圧縮機、熱交換器、サージタンク（圧縮機による脈動を減衰させるために設置した）、自動圧力調整弁（拡散筒供給流圧力を設定値に保持する）および流量、圧力、温度を測定するための計装・計器類により構成されている。各段を連結する配管は、圧縮機を経て拡散筒に至る供給流配管、拡散筒より上段のサージタンク（圧縮機吸入側）に至る拡散流配管（第1拡散流配管）、拡散筒を素通りし（図では拡散筒上端からの流れ）、自動圧力調整弁を経て下段のサージタンク（圧縮機吸入側）に至る末拡散流配管および第2拡散流配管（図では、各拡散筒の中央部から左に引出され自己の段の圧縮機吸入側サージタンクに至る配管で、拡散流の1部をリサイクルするためのもの）である。第2拡散流配管は、後述するHertz型カスケードにおいて使用するものでありこゝで取上げる通常の方形カスケードには使用しない（バルブを閉じておく）ので、拡散筒まわりのガスの流れは図2.1の場合と同一になる。

原料ガスは、任意の段の供給流路にフィードすることが可能であり、製品流および廃棄流はそれぞれ第5段、第1段より真空ポンプを介して所定の流量で抽出される。このような供給部、抽出し部を設けたことにより、本実験装置は全還流あるいは種々の還流比における運転が可能となっている。また、カスケードの操作圧力（高圧側）としては、 $500\text{mmHg} \sim 3\text{kg/cm}^2\text{A}$ の広範囲な操作条件を満足することができる。

2.2 主要機器

(1) 拡散筒

拡散筒は、図 2.3 に示すように、中心部分に管状の隔膜（有効単位長さ 1 m、直径 19 mm I.D.）を装着した円筒状の拡散器（単位長さ約 1 m、直径 57.2 mm I.D.）4 本を連結したものであり、ガスの供給・抽出用ノズル、隔膜管内の圧力損失測定用ノズルが取り付けられている。供給流ノズルより隔膜管内側に導入された供給流（アルゴン同位体混合ガス ^{36}Ar — ^{40}Ar ）は、軽い成分 ^{36}Ar の濃くなった拡散流と重い成分 ^{40}Ar の濃くなった未拡散流とに分離され、それぞれの抽出用ノズルより流出する。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、軽成分濃度は供給流入口部分で最も高く未拡散流出口部分で最も低くなる。本拡散筒を通常の方形カスケードに組込む場合には、拡散流を第 1 拡散流ノズルより抽出するので、その濃度は平均値となる。一方、これを Hertz 型カスケードに使用する場合には、拡散流路に仕切板を挿入して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、前者を上段へ送り後者を自己の段の供給流にリサイクルする。Hertz 型カスケードの分離特性については別に報告するが、その特長は、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られる（増加の度合いはリサイクル流量に依存する）ことである。

(2) 隔膜

隔膜は、ニッケル焼結管内面にアルミナを圧着したもので、カスケード各段に装着した隔膜の特性値*は表 2.1 に示す通りである。ここで、透過係数、分離効率、それぞれ専用の特性試験装置で実測された値に基づくものである。すなわち、透過係数は、高圧側 960 mmHg、低圧側大気圧の条件でアルゴンガスを用いて測定した値である。分離効率は、高圧側 760 mmHg、低圧側 30 mmHg、隔膜の高圧側供給流量 100 Nℓ/min、透過流量約 1 Nℓ/min でカットが零に近い値となり、さらに境界層および流れ様式の効果のほとんど無視できる条件で測定した値を高圧側圧力 500 mmHg、低圧側圧力 0 mmHg に換算した値である。また、表中の隔膜孔直径は、Present-de Bethune の式を用いて逆算した値である。また、分離効率 Z_{Ar} と孔直径 d の関係を計算し図示したものが図 2.4 である。

(3) 圧縮機

表 2.2 は、本実験装置に用いた圧縮機の概略仕様を示したものである。圧縮機は同位体分離用の装置として以下の特徴を備えている。

(i) 潤滑方式

隔膜の目詰りを防止するために、完全無給油方式を採用するとともに軸受などの回転部分にはベアリング用の高真空グリースを用いた。

(ii) 気密性

カスケード分離性能への影響をできるだけ少なくするために圧縮機 1 台当りの許容リーク

* 隔膜製造会社（住友電気工業 K K）の検査成績表による値

量を $1 \times 10^{-6} \text{ atm} \cdot \text{cm}^3 (\text{He}) / \text{sec}$ 以下とした。このため、圧縮機ケーシングの内・外表面にニッケルメッキ(厚さ約 30μ)を施すとともに軸封機構として磁性流体軸受を採用した。

(ii) 運転性能

カスケードの操作条件をできる限り広く変えられるように、圧縮機の最大流量および最大吐出圧力をそれぞれ $18 \text{ Nm}^3 / \text{hr}$ 、 $3 \text{ kg} / \text{cm}^2 \text{ A}$ とした。なお、圧縮比はピストンの行程から一定値(10)となっている。

(4) 真空排気ポンプ

カスケード全体の真空排気には、メカニカルブースタ(排気速度 $600 \text{ m}^3 / \text{hr}$ 、到達真空度 $4 \times 10^{-4} \text{ mmHg}$)が用いられ、大気圧にある全系を約30分で $1 \times 10^{-2} \text{ mmHg}$ に排気することができる。

製品流・廃棄流の抜出し部には、通常の油回転ポンプ(排気速度 $150 \text{ l} / \text{min}$ 、到達真空度 10^{-3} mmHg)を用いている。

サンプリング系には、油回転ポンプ(排気速度 $320 \text{ l} / \text{min}$)をバックアップとする油拡散ポンプ(排気速度 $1200 \text{ l} / \text{min}$)を用い、液体窒素コールドトラップを併用して $1 \times 10^{-7} \text{ mmHg}$ の真空度を得ることができる。これにより、各段に取付けられた試料ガス採取ビン(容積 $60 \text{ cm}^3 / \text{本}$)21本を数分以内で $1 \times 10^{-3} \text{ mmHg}$ 以下に排気し、残留ガスの分析精度への影響がほとんど無視できるようになる。

2.3 配管系統

表2.3は、プロセス配管の概略の設計条件をまとめたものであり、各流路におけるガス流速が広い操作圧力範囲で一定値となることが注目される。本系統の詳細な設計条件については既報⁶⁾の通りである。

表2.4は各段の容積を示したものである。多少のバラツキは認められるが、高圧側および低圧側の容積はそれぞれ約 80 l および約 130 l とほぼ一定になっており、カスケードの一般的な特性を調べることができると考えられる。

サンプリング用の排気配管は、各段における供給流、拡散流および未拡散流のガス組成の経時的变化を迅速に追跡するために各流路毎に設けられている。また、サンプリング箇所は、拡散筒の4つのノズル近傍にあり、拡散筒内組成との時間的ずれをできるだけ小さくするような考慮がなされている。

2.4 計装・制御系統

図2.5は、各段に設けられた計装・制御系統を第3段を例にして概念的に示している。拡散筒まわりの各流路における流量は、質量流量計(Hastings社製、検出器および指示計の各精度： $\pm 1\% \text{ FS}^*$ 、校正目盛：Ar表示)により測定し、多ペン型記録計(精度： $\pm 0.25\%$

* FS = Full Scale

FS)により記録する。供給流と第1拡散流ガス温度は、白金測温抵抗体(0℃で100オーム、精度:±0.3%)で測定する。供給流温度計には、ガス温度異常に対する警報計も組込まれている。

圧力計の主なものは、供給流圧力を一定に保つように未拡散流路の圧力調整弁を作動させる自動圧力調節計(検出器:電子式絶対圧力伝送器、精度:±0.5%FS、測定範囲:0~3kg/cm²A;制御記録計:PI制御、精度:±0.5%FS)と第1、第2拡散流路の圧力計(検出器:前出圧力計と同じもの、測定範囲:0~368mmHg)である。

圧縮機の運転状態を管理するためにその吸入、吐出側にブルドン管式圧力計(精度:0.5%FS)があり、吐出圧異常の生じた際に圧縮機の運転を停止させる保護機構を形成している。また、圧縮機は冷却水の水圧低下に対する起動防止あるいは停止機構を有している。

第4段の拡散筒には、供給流ノズルと未拡散流ノズルとの間の高圧側流路における圧力損失を測定するために、電子式微差圧計(測定範囲:10~150mmH₂O、精度:±0.5%FS)が設けられている。

なお、カスケード全体の流量制御は、製品流および廃棄流の抜き出し部に設けた質量流量自動制御弁(前出の流量計とほぼ同仕様)によって行われる。

以上の各種計器類のうち、カスケードの操作と運転状態の管理を円滑に行うための遠隔操作弁、圧縮機、ポンプ類、流量計、圧力計などの操作スイッチならびに記録計類はパネルに集められている。これにより、圧縮機、真空ポンプの起動・停止、カスケードの各段独立運転⇄全段連結運転の切換え、カスケード操作圧力の調整などが遠隔操作で行なうことができる。

表 2.1 拡散筒内における隔膜の配列と隔膜特性値

段番号	隔膜の配列*1	外径 (cm)	内径 (cm)	拡散部 有効長 (cm)	表面積 (cm ²)	透過係数* (molAr/ cm ² cmHg·mm)	分離効率*2 (%)	孔直径*3 (Å)
1	20	1.92	1.60	400.0	2010	0.70	89	490
						0.73	90	440
	11					0.74	88	530
						0.77	89	490
	10					(0.735×10 ⁻⁵)	(89)	(490)
2	19	1.92	1.60	400.0	2010	0.71	90	440
						0.73	89	490
	12					0.74	89	490
						0.76	91	390
	9					(0.735×10 ⁻⁵)	(90)	(450)
3	18	1.90	1.60	400.0	2010	0.71	91	390
						0.73	91	390
	13					0.74	93	300
						0.76	90	440
	8					(0.735×10 ⁻⁵)	(91)	(380)
4	23	1.90	1.60	400.0	2010	0.72	90	440
						0.73	91	390
	14					0.74	91	390
						0.81	91	390
	17					(0.75×10 ⁻⁵)	(90)	(400)
5	16	1.92	1.60	400.0	2010	0.73	93	300
						0.73	89	490
	15					0.74	91	390
						0.74	89	490
	6					(0.735×10 ⁻⁵)	(91)	(420)
	5							

()内は平均値

*1 数字の配列(上から下へ)は、拡散筒入口側から出口側に対応。

(なお、数字は隔膜の製造番号である。)

*2 理想的な分離係数 $\alpha_0 = \sqrt{\frac{40}{36}} = 1.0541$ とする。

*3 アルゴンガスについての Present-de Bethune の式(次式)により計算した値。

$$Z_{Ar} = \frac{\int_{P_L}^{P_h} \exp\{0.167rP + 0.00156r^2 P^2\} dP}{P \exp\{0.167rP + 0.00156r^2 P^2\}}$$

Z_{Ar} : アルゴン同位体に対する隔膜の分離効率, P_h, P_L : 隔膜の高圧側および低圧側圧力 (cmHg)
 r : 隔膜の孔半径 (μ)

表 2.2 圧縮機の概略仕様

項 目	仕 様
型 式	2 気筒往復動型 (水冷式)
構 成	本体, 外部熱交換器, 電動機, 無段変速機
ケーシング材質	鑄鉄 (FC-30), ニッケルメッキ
軸 封	磁性流体軸受 磁性流体: ダイエステル 〔飽和磁化: 450 ガウス, 粘度: 400 c p (100°F)〕 〔蒸気圧: 10^{-6} Torr (室温), 10^{-3} Torr (200°F)〕
電 動 機 無 段 変 速 機	5.5 KW - 6 極, 定格電流 23.7 A (50 Hz) 回転数 150 - 600 rpm (変速比 4)
性 能	許容リーク量 : 1×10^{-6} atm·cm ³ (He) / sec 以下 主軸振動 : $\pm 75 \mu$ 以下 最大流量 : 18 Nm ³ / hr (Arガス) 設計圧力 : $\begin{cases} 0.3 \text{ kg/cm}^2 \text{ A (吸込)} \\ 3.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ A (吐出)} \end{cases}$ 圧縮比 : 10 (-) 吐出ガス温度 : 室温

表 2.3 プロセス配管の設計条件

配管系統	配管規格		流量範囲 (Nm ³ /hr)	圧力範囲 (kg/cm ² A)	平均流速 (m/sec)	レイノルズ数 (-)
	呼び径	内径(cm)				
供給流路	3/4 B×Sch10S	2.3	1.34~3.04	3~0.658	3.38	16,000~3,700
第1拡散流路*1	1/2 B×"	4.3	6.7~1.52	0.3~0.0658	4.38	4,400~980
未拡散流路(1)*2	1/4 B×"	1.05	6.7~1.52	3~0.658	8.13	17,500~4,000
未拡散流路(2)*3	1/2 B×"	4.3	6.7~1.52	0.3~0.0658	4.83	4,400~980

*1 第2拡散流路の設計値と同一。

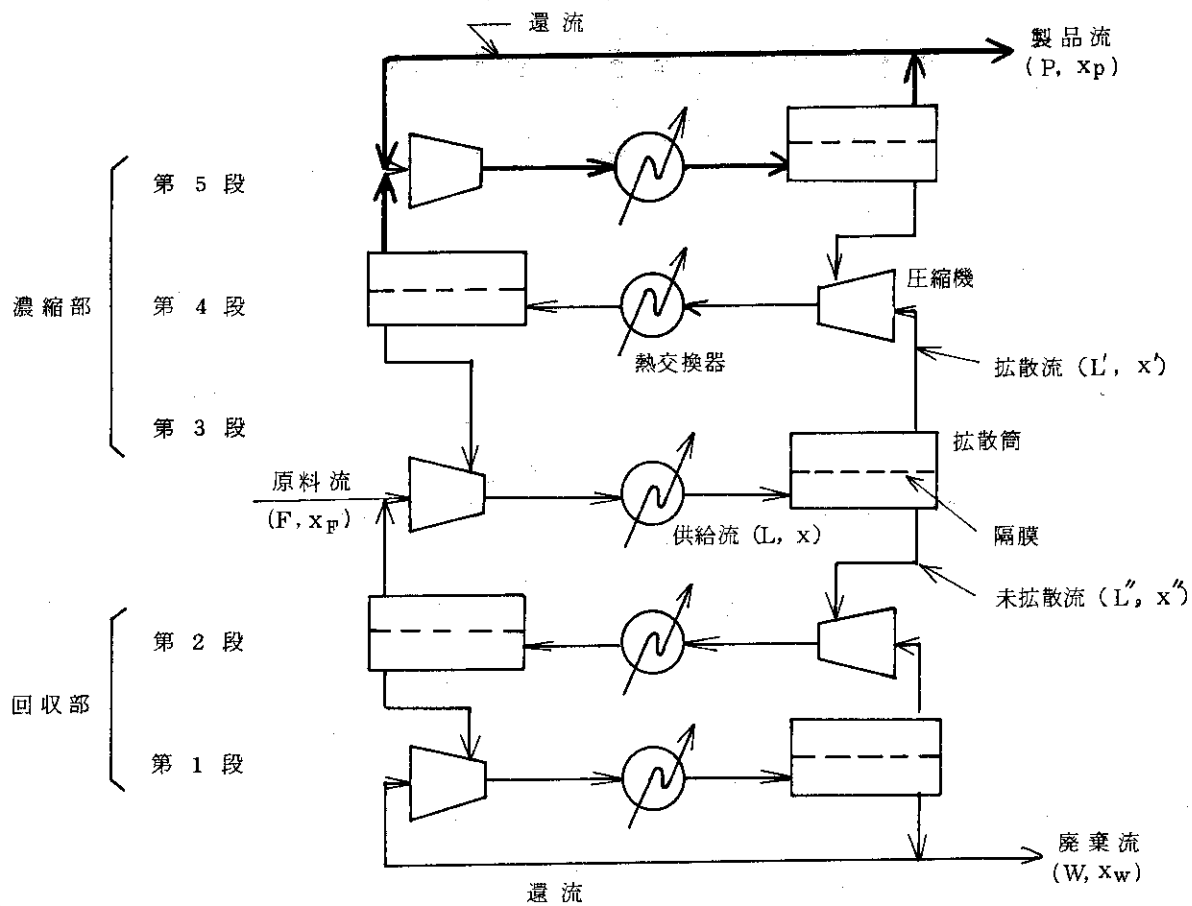
*2 拡散筒と自動圧力調節弁(PRC-F)との間の流路

*3 上記調節弁と圧縮機吸入側サージタンクとの間の流路

表 2.4 カスケード実験装置の容積

段番号	1段当りの容積	高圧側容積*	低圧側容積*
1	210 L	77 L	133 L
2	207	89	118
3	206	81	125
4	209	78	131
5	203	79	124
合計	1,035	404	631

* サージタンクの容積69Lを含む。



$\left\{ \begin{array}{l} x_F, x_P, x_W \\ x, x', x'' \end{array} \right\}$: 軽成分の濃度
 $\left\{ \begin{array}{l} F, P, W \\ L, L', L'' \end{array} \right\}$: 流量

図 2. 1 方形カスケードの概念図

[本研究では全還流条件で実験を行なっているため、
 原料の供給および製品・廃棄流の抽出しを行なっ
 ていない ($F = 0, P = 0, W = 0$)。]

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

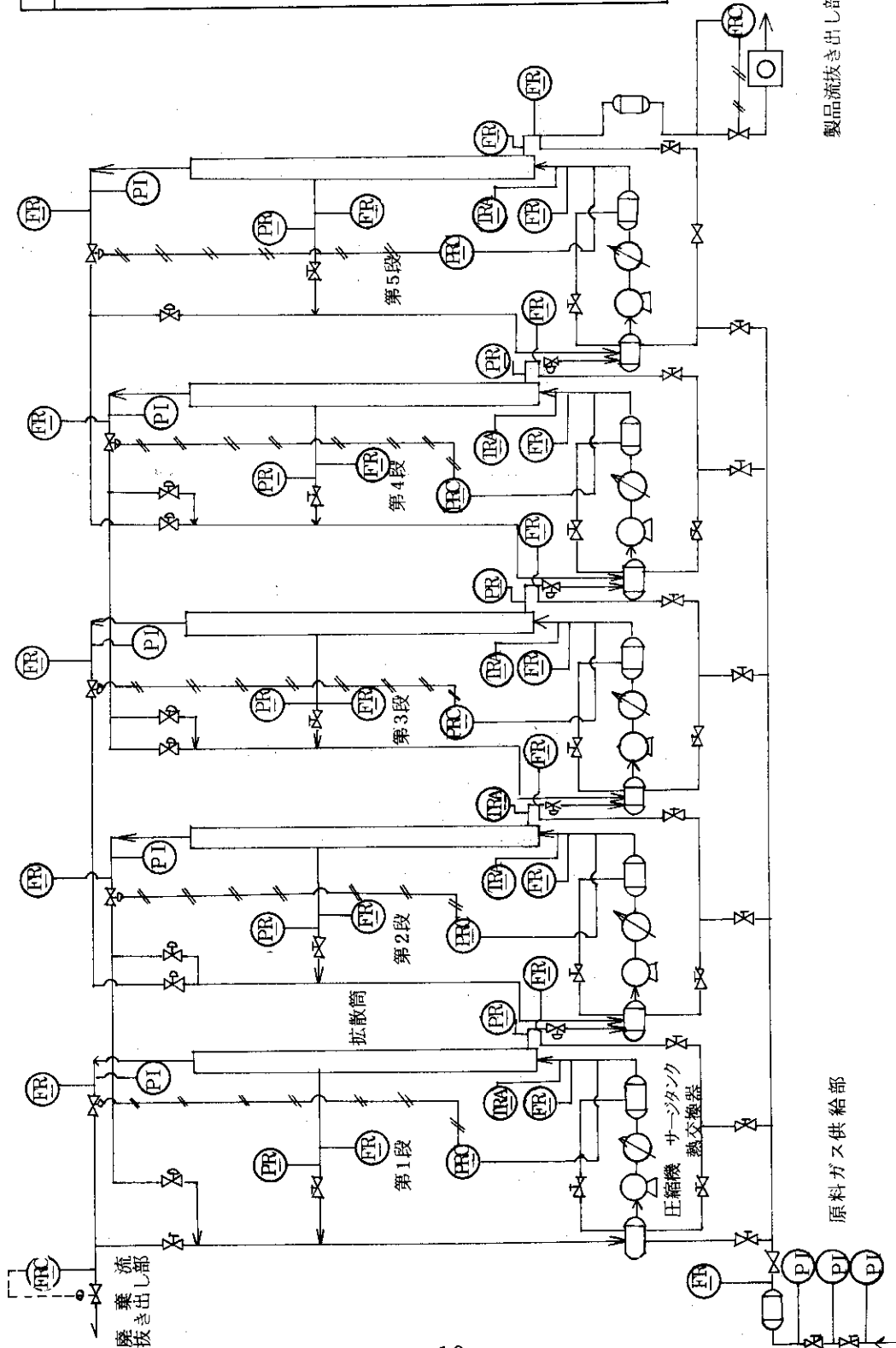
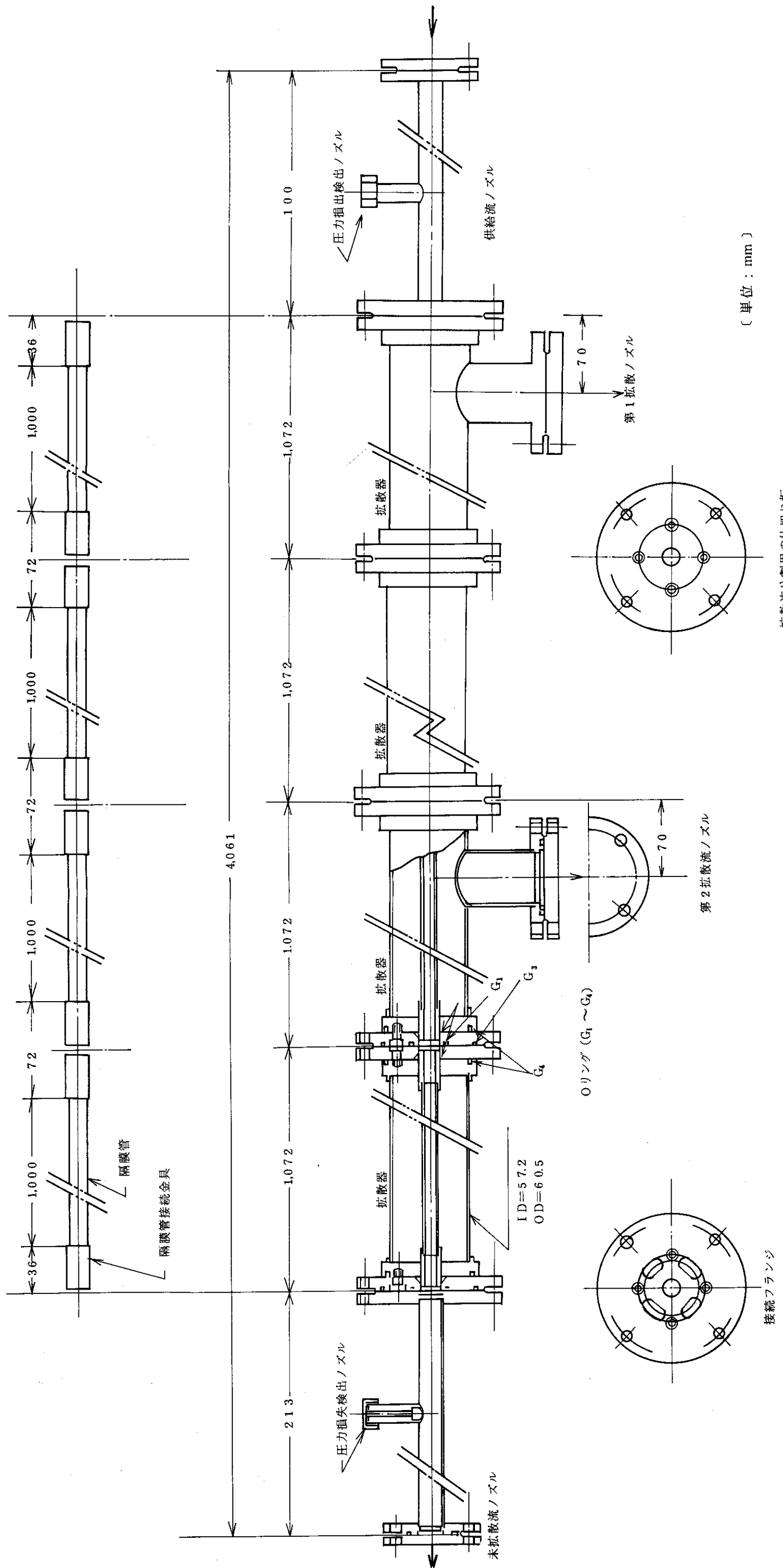


図 2. 2 カスケード実験装置の概略フローシート



拡散流分割用の仕切り板

図2・3 拡散筒の構造および拡散筒内の気体の流れ概念

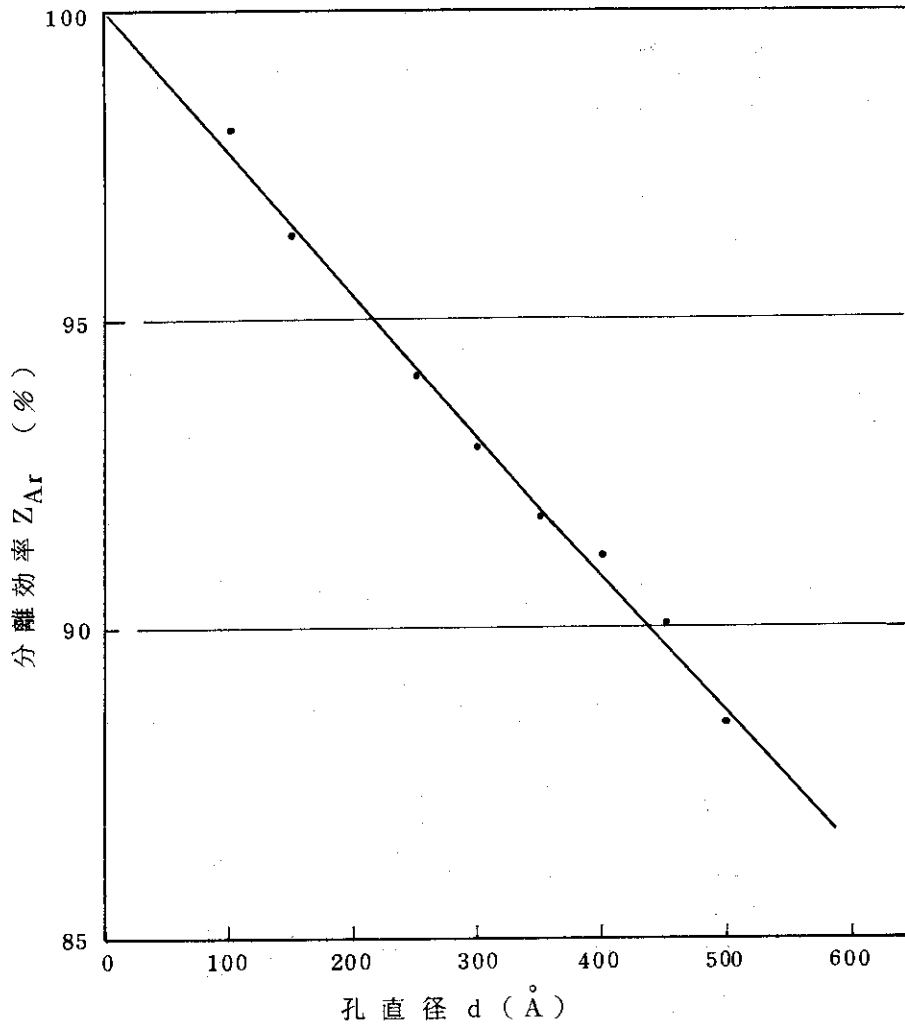
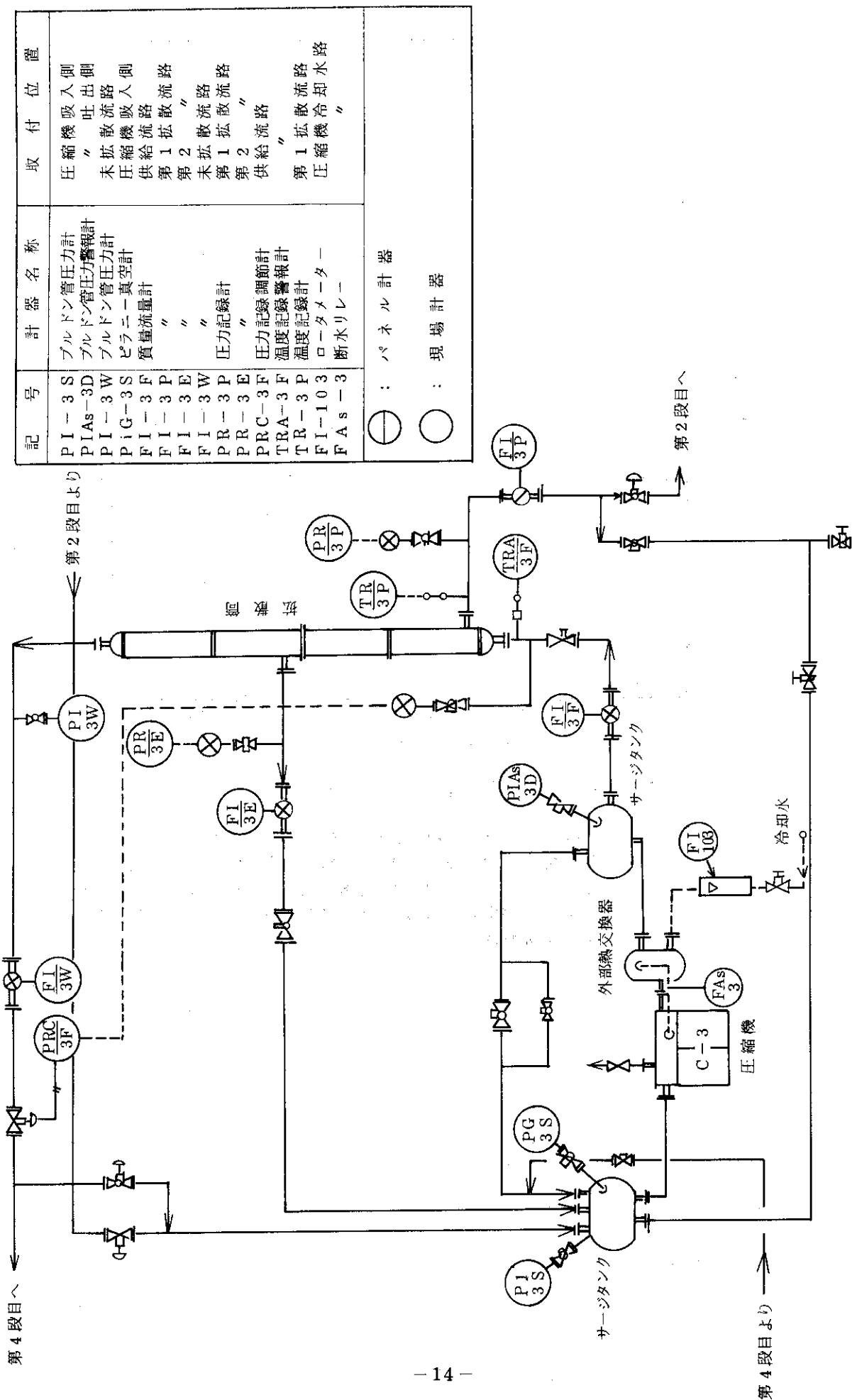


図 2.4 隔膜の分離効率と孔直径の関係

Present-de Bethune の式において、温度 25 °C、
 高圧側圧力 $P_h = 500 \text{ mm Hg}$ 、低圧側圧力 $P_l = 0 \text{ mm Hg}$
 としたときのアルゴン同位体 (^3Ar , ^{40}Ar) に対する関係
 である。図中のプロットは計算値であり、実線はそれら
 を結ぶ線である。



記号	計器名称	取付位置
PI-3S	ブルドン管圧力計	吸入側
PIAs-3D	ブルドン管圧力警報計	吐出側
PI-3W	ブルドン管圧力計	吐出側
PIG-3S	ピラニ-真空計	吸入側
FI-3F	質量流量計	流路
FI-3E	"	"
FI-3W	"	"
PR-3P	圧力記録計	流路
PR-3E	"	"
PRC-3F	圧力記録調節計	流路
TRA-3F	温度記録警報計	流路
TR-3P	温度記録計	"
FI-103	ロータメーター	流路
FAs-3	断水リレー	"

⊖ : パネル計器
 ○ : 現場計器

図 2. 5 プロセス段の計装・制御系統概念図 (第3段目)

3. 実験方法

3.1 カスケードの起動

(1) 起動手順

アルゴン同位体 ^{36}Ar — ^{40}Ar に対する隔膜の理論的な分離係数 α_0 は1.05409と非常に小さいので、実験に際して不純物成分の影響はできる限り排除する必要がある。

カスケードは、装置内に漏込んだ空気による分析精度への影響を無視できるリーク量($5 \times 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{cm}^3 \text{ He/sec}$ 以下)に設計されているが、さらに機器、配管などの内表面の吸着ガスを除去するため、装置全体を通常 10^{-2} Torr の真空状態に保っている。

カスケードの起動は、以下の手順で行う。

装置全体の気密が保持されていることを確認した後、アルゴンガスによるガスパーズと真空排気操作を2～3回繰返し、所定量の実験ガスを全段均圧になるように充填する。ついで各段を独立に起動し、拡散筒供給流圧力自動調節計により、夫々がカット0.5で安定に運転できるように未拡散流量調節弁をマニュアル調整し、上記圧力調節計を所定圧力に設定する。各段における圧力、流量が安定した後、圧力調節計を自動作動に切換え、さらに遠隔操作弁により全段の連結運転に移る。この瞬間から軽成分は上段へ、重成分は下段へと分離され、カスケード内に濃度分布が形成され始める。

(2) カスケードの制御特性

カスケードの制御特性を把握するためには、カスケードの種々の運転条件における特性を詳しく調べねばならない。この問題については、別に報告するので、ここでは、基本的特性である圧力制御特性について簡単に述べる。

全段を連結したカスケード運転の場合、拡散筒供給流圧力は、初期充填ガス量、各段の高圧側および低圧側容積、隔膜および配管・バルブの流れ抵抗、圧縮機特性などによってほぼ一義的にある平衡圧力に定まる。したがって、前記の自動圧力調節計の設定圧力とこの平衡圧力とが整合しない場合には、次のような現象が生ずる。すなわち、設定圧力が平衡圧力より高い場合には、自動圧力調節計は、拡散筒供給流圧力を上昇させるため未拡散流路の圧力調節弁を閉じる方向に作動する。この結果、拡散流量(上昇流)が増加し、上段は設定圧力に到達するが、下段ではガスインベントリが不足し圧力は一層低下する。逆に、設定圧力が低い場合には、制御弁は開く方向に作動し、未拡散流(下降流)が増える。したがって、この条件の場合には、最上段から順次所定圧力に達する反面、下段ではガスインベントリが過剰になり、圧力は設定値を越えて増加を続ける。このように、自動圧力調節計の設定が不相当であると、その影響は、まづカスケードの最下段にしわ寄せされ、ついで順次上段へと波及していくことが理解される。

3.2 測定方法

(1) 実験ガス

実験に用いたアルゴンガスの成分は以下の通りである。

アルゴン	: 99.999%
酸素	: 1 ppm
窒素	: 5 ppm
水素	: 1 ppm
メタン	: 3 ppm
二酸化炭素	: 3 ppm
露点	: -65℃

(2) 同位体分析法

アルゴンの同位体比 $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ の測定には、Varian Mat 社製の質量分析計 CH-7 (イオン軌道半径 214mm, 偏向角 90° , 加速電圧 3KV, 磁場走査型, ダブルインレット・ダブルコレクター方式) を使用した。

実験ガス中の同位体比 $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ は、アルゴンボンベ毎に僅かずつ異なるので、実験の都度カスケード充填ガスを標準ガスとして採取し、シングルコレクター法により同位体比 R_0 を求めておく。このときの精度 (同位体比標準偏差率) は $\pm 0.3\%$ である。一般に、試料ガスにおける真の同位体比 R_s は、シングル法による測定値 R_0 に $\sqrt{M_2/M_1}$ (M_1 : 軽成分の分子量, M_2 : 重成分の分子量) を乗じて補正しなければならない*。

カスケードの各部から採取したサンプルガスの分析はダブルコレクター法により行なう。この場合には、サンプルガスと標準ガスの夫々における同位体比の比 ξ を測定するので、上記の補正を必要としない。本法の精度は $\pm 0.02\%$ である。

したがって、サンプルガス中の注目成分の存在比 R ($^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$) と ^{36}Ar の濃度 x は、次式で与えられる。

$$R = \xi \cdot R_s = \xi \cdot \sqrt{\frac{40}{36}} \cdot R_0 \quad (一)$$

$$x = \frac{R}{1+R} \quad (\text{モル分率})$$

(3) 流量の測定精度

質量流量計 (20℃, 1atm のアルゴンガスにより校正) の指示計 (記録計入力) における

* 質量分析計の試料ガス導入系において毛細管リーク方式を採用しているため、実際のガス組成とイオン化室に導

入されるガスの組成との間に近似的に $\frac{(P_a)_i}{(P_b)_i} = \sqrt{\frac{M_a}{M_b}} \frac{P_a}{P_b}$ なる関係がなり立つことが知られている。

P_a, P_b および M_a, M_b は、 a, b 成分の分圧および分子量。 i はイオン化室における値である。

精度は、カスケード実験装置における圧力範囲約80～1500 mmHgにおいて最大±2%（温度、圧力の変動20%以内の場合）である。

一方、各流路の質量流量計の測定レンジは、下記の通りで、拡散筒供給流量に対する測定誤差が最も大きい。

拡散筒供給流：0～300 std l/min*

拡散流：0～100 std l/min

未拡散流：0～100 std l/min

拡散流と未拡散流の測定誤差の最大値は±2 std l/minで、これはカスケード装置の個有特性として表われる流量の変動幅（最小で約1.5 std l/min）にほぼ等しい大きさである。

したがって、拡散筒供給流量は、計器上の誤差の影響の少ない拡散流および未拡散流の流量計の値の和を用いた。

なお、記録計の精度は、上記精度の約1/10の±0.25% FSである。

* 20℃, 1 atmにおける流量の単位

4. 解析方法

多孔質隔膜法による気体の分離特性の解析方法についてはすでに報告した⁵⁾。ここでは、実験結果を解析、考察するために適用する計算式について概説する。

4.1 透過係数

多孔質隔膜の透過係数 Q は、理想的な細孔（円形断面を有する非常に細い直管）を通過する分子の流れに基づいて導出されたKnudsenの式およびPoiseuilleの式を実際の隔膜の場合に拡張して次のように表わされている。

Knudsen流については、

$$Q_K = \frac{4d}{3\ell} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi MRT}} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

Poiseuille流については、

$$Q_P = \frac{d^2}{32\ell\mu RT} \bar{P} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

遷移流については、上記2式を単純に加算して、

$$Q_T = \frac{4d}{3\ell} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi MRT}} + \frac{d^2}{32\ell\mu RT} \bar{P} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

ここで、 Q_K 、 Q_P 、 Q_T はそれぞれの流れに対する透過係数（ $\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{cmHg} \cdot \text{min}$ ）、 d は細孔の直径、 ℓ は細孔の長さ、 M は気体の分子量、 μ は気体の粘性係数、 T は気体の絶対温度、 R は気体定数であり、 \bar{P} は隔膜の高圧側および低圧側における圧力の平均値である。

以上の各式より、 Q_K は圧力に無関係であり、 Q_P は圧力とともに増加することが分る。

4.2 分離係数

本実験では、カスケード各段における拡散筒供給流、拡散流および未拡散流の³⁶Ar濃度を測定しているので、次の2通りの方法で分離係数を算出することができる。

各段毎の拡散筒の分離係数すなわち段分離係数 α_s は、

$$\alpha_s = \alpha_i = \frac{x'_i(1-x_i'')}{x''_i(1-x_i')} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

ここで、 x'_i は i 段目拡散流における着目成分の濃度、 x''_i は i 段目未拡散流における着目

成分の濃度である。

また、カスケード全体（5段）についての平均的な段分離係数は、方形カスケードの最小理論段数（全還流操作の場合の所要段数）を与える Fenske の式を適用する。

$$\ln \alpha_s = \frac{1}{N} \ln \frac{x_p(1-x_w)}{x_w(1-x_p)} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

こゝで、N は段数、 x_p 、 x_w はそれぞれカスケードの上、下端濃度であり、本実験では、 $N = 5$ 、 $x_p = x'_5$ 、 $x_w = x''_1$ となる。

4.3 分離係数に影響を及ぼす諸因子

実際の多孔質隔膜あるいは拡散筒においては、操作条件（圧力、圧力比、レイノルズ数など）、隔膜の細孔構造（孔径分布、断面形状、迷路度など）などにより、理想的な Knudsen 流の条件は達成されない。このため、拡散筒の分離係数は以下のような推算式で表わされる種々の因子により影響されると言われている。

一般に、拡散筒の分離係数 α_s は次式で表わされる。

$$\alpha_s - 1 = (\alpha_0 - 1) Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3 \cdot Z_4 \cdot Z_5 \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

こゝで、 α_0 は、隔膜の理想的な分離係数（ $= \sqrt{M_2/M_1}$ 、 M_1 ：軽成分の分子量、 M_2 ：重成分の分子量）であり、 $Z_1 \sim Z_5$ は以下に概説する各因子による効率である。

Z_1 は、逆拡散の効果と呼ばれる因子による効率であり、次式で表わされる。

$$Z_1 = 1 - \gamma \frac{\alpha_0 x_\ell (1 - \bar{x}) - \bar{x} (1 - x_\ell)}{(\alpha_0 - 1) \bar{x} (1 - \bar{x})} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

こゝで、 γ は隔膜の高圧側圧力 P_h と低圧側圧力 P_ℓ との比（ $= P_\ell / P_h$ ）であり、 \bar{x} 、 x_ℓ はそれぞれ隔膜の細孔を通過中の気体および低圧側の気体の組成である。なお、 $\alpha_0 - 1 \ll 1$ がなり立つような混合気体の場合には $\bar{x} \cong x_\ell$ であるので、上式は次のように近似できる。

$$Z_1 = 1 - \gamma \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

Z_2 は、遷移流あるいは Present-de Bethune の効果と呼ばれる因子による効率である。これは、粘性の影響が明確に現われない中間圧力（分子の平均自由行程 λ と細孔半径がほぼ等しくなる圧力）すなわち遷移流域において、異種分子同志の衝突による分子飛行速度の平均化が生ずるためにもたらされる因子である。

こゝでは、同位体混合ガスの場合には Present-de Bethune の式を非常に良く近似することのできる Martensson の簡単な次式により計算する。

$$Z_2 = \exp \left[- \frac{3 P_h d (1 + 9 S_c) (1 - \gamma)}{64 \bar{C} \mu} \right] \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

$$\bar{C} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

$$S_c = \frac{\mu}{\rho D_{12}} \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

ここで、 \bar{C} は気体分子の平均飛行速度であり、 μ, S_c, ρ, D_{12} はそれぞれ隔膜の高圧側における気体の粘性係数^{*1}、シュミット数、密度および相互拡散係数^{*2}である。

Z_3 は、気体が隔膜表面に沿って流れるとき、表面近傍に物質移動の緩慢な乱れの少ない境界層が形成されると想定して導出された分離係数影響因子による効率である。一般にこの因子は境界層の効果と呼ばれるが、現在のところ、このような仮定の妥当性およびこれを正確に算定する計算法は確立されていない。本報告では、Gilliland & Sherwoodの濡れ壁塔における気相物質移動係数の算出式を隔膜の場合に拡張したBilousの提案式および境界層における物質収支と物質移動係数とに基づいて提案されたEbelの式を用い、あわせて各式の適用性を考察する。

Bilousの式は、次のように表わされる。

$$Z_3 = \exp\left[\frac{-y\omega}{\rho D_{12}}\right] \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

$$y = 43 d_e (Re)^{-0.83} \left(\frac{\rho D_{12}}{\mu}\right)^{0.44} \quad \text{[乱流の場合]} \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

$$= \frac{13 d_e}{70} \quad \text{[層流の場合]} \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

ここで、 y は境界層の厚み、 ω は隔膜単位面積当りの透過流量、 d_e は隔膜管の高圧側流路における相当直径である。また、気体の各物性値は高圧側気体に対する値である。

Ebelの式は、次のように表わされる。

$$Z_3 = \exp\left[-\frac{2}{f_E} \cdot \frac{\mu}{\rho D_{12}} \cdot \frac{v_b}{V_h}\right] \quad \dots\dots\dots (4.15)$$

$$v_b = \frac{4 L'}{\pi d_e^2 \cdot \ell_T \cdot \varepsilon} \quad \dots\dots\dots (4.16)$$

ここで、 f_E は隔膜の表面摩擦係数、 v_b は隔膜細孔内の透過ガス流速、 V_h は隔膜の高圧

*1 Sutherlandの式 $\mu = K \frac{T^{3/2}}{T+C}$, ($K=1.900 \times 10^{-6}$, $C=133$)

*2 藤田の式 $D_{12} = \frac{7.0 \times 10^{-4} T^{1.833}}{P_h \left[\left(\frac{T_c}{P_c}\right)_1^{1/3} + \left(\frac{T_c}{P_c}\right)_2^{1/3} \right]^3} \sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}}$, (臨界圧力 $P_c=48 \text{ atm}$, 臨界温度 $T_c=151 \text{ }^\circ\text{K}$)

側流路断面の平均流速， ℓ_T は隔膜管の長さ， ϵ は隔膜の空隙率である。また，気体の物性値は高圧側における値である。

Z_4 は，表面拡散流の効果と呼ばれる因子による効率である。現在のところ，表面拡散流が分離係数に及ぼす影響は不明な点が多いが，不活性気体その他の理想気体の法則がよく当てはまる気体については分離係数に及ぼす影響は小さいと考えられている。アルゴン同位体分離を対象とした本実験の解析にあたっても同様の考え方を採用し， $Z_4=1$ と仮定する。

Z_5 は，流れ様式の効果と呼ばれる因子による効率であり，隔膜の両側における混合の度合いおよび流れの相対的方向により，完全混合型，並流型，十字流型，向流型に大別されている。

本報告では，実験に使用した隔膜管の構造（隔膜は厚さ約 1.5mm のニッケル焼結管内面に圧着（約 150 μ ）されている）より，隔膜を透過した気体は隔膜面に垂直方向に流れ去るものと考えて，Weller & Steiner の十字流型についての計算式を用いることにする。すなわち，

$$Z_5 = \frac{1}{\theta} \ell_n \frac{1}{1-\theta} \dots\dots\dots (417)$$

ここで， θ は拡散筒供給流量 L に対する拡散流量 L' の比 L'/L であり，カットと呼ばれる。

すでに報告したように，分離係数影響因子に関する在来の推算式はいづれも隔膜あるいは気体の流れの性質などについて理想的な条件を想定して導かれたものである。とくに，定量的な推算式の確立していない，いわゆる境界層の効果 Z_3 ，表面拡散流の効果 Z_4 およびより実際の隔膜に対して適用できる遷移流の影響 Z_2 の評価法の確立は，多孔質隔膜法における分離機構を解明するための重要な課題となっている。

本報告では，在来の推算式による段分離係数 α_s の推定を試みるために，次のような補正因子 k を導入し拡散筒の操作条件との関係を調べた。

$$k = \frac{\alpha_s - 1}{(\alpha_0 - 1) Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3 \cdot Z_4 \cdot Z_5} \dots\dots\dots (418)$$

4.4 隔膜の表面摩擦係数

気体が直円管内を流れるときの隔膜の見掛けの表面摩擦係数 f_F は，管路に沿って生じる圧力損失を算定する Fanning の式を書き換えた次式によって求める。

$$f_F = \frac{\Delta P_b}{4} \left(\frac{2 g_c}{\bar{u}^2} \right) \left(\frac{d_e}{\ell_T} \right) \left(\frac{1}{\rho} \right) \dots\dots\dots (419)$$

ここで， ΔP_b は隔膜管高圧側流路における圧力損失， \bar{u} は気体の平均流速， ρ は気体の密度 g_c は重力換算係数である。

なお，表面摩擦係数は，流れが層流のときはレイノルズ数 Re の関数として，乱流のときはレイノルズ数 Re および管壁の粗度 e/D (e : 粗面の突起の平均高さ) または e/D のみの関数として求めることもできる。

実際の拡散筒では、隔膜の表面に垂直方向に気体が透過していくので、隔膜の表面摩擦係数は拡散筒の操作条件（レイノルズ数、カットなど）と関係づけて表わさねばならないが、現在のところその計算方法は知られていない。

4.5 平衡達成時間

方形カスケードを全還流操作で運転する場合に、カスケード内濃度分布が平衡に到達するまでの所要時間を求める方法は幾つか知られている³⁾。こゝでは、比較的精度が高くかつ簡便な Burton の式⁴⁾を用いて計算する。

$$\tau_K = \frac{4}{(\alpha_s - 1)^2} \left(\frac{G_i}{L''} \right) \left[\frac{B^2}{B^2 + \pi^2} \ln \frac{2\pi^2(1+e^B)(1+e^{-B})}{K(B^2 + \pi^2)^2} \right] \dots\dots\dots (420)$$

$$B = \frac{1}{2} N (\alpha_s - 1) \dots\dots\dots (421)$$

こゝで、 G_i は 1 段当りのガスインベントリ、 L'' は 1 段当りの未拡散流量、 N はカスケード段数である。

また、カスケード起動後、 τ 時間における上、下端濃度を $x(N, \tau)$ 、 $x(0, \tau)$ とし、平衡達成後 ($\tau = \infty$) における濃度をそれぞれ $x(N, \infty)$ 、 $x(0, \infty)$ と表わしたとき、 K は次式で定義される。

$$1 - K = \frac{x(N, \tau) - x(0, \tau)}{x(N, \infty) - x(0, \infty)} \dots\dots\dots (422)$$

上式において、 $K = 0.02$ としたとき、98% 平衡が達せられたことを意味する。

5. 結果および考察

表 5.1 は、カスケードの第 3 段を代表段として、操作条件と実験結果をまとめたものである。各条件におけるカスケード全体の流量、圧力、濃度分布ならびに圧縮機の運転条件については、附表 1, 2 に示してある。

以後の考察は、これらの表に示された値に基づいてすゝめたものである。

5.1 透過係数

図 5.1 は、カスケードの第 3 段拡散筒における透過係数の実測値 Q_{exp} および (4.3) 式で算出した計算値 Q_{calc} と隔膜前後における圧力の平均値 \bar{P} との関係ならびにアルゴンガスの平均自由行程 λ の計算値と圧力 P との関係を示したものである。

これより、実測値 Q_{exp} は平均圧力にほとんど依存せず一定値約 $0.84 \times 10^{-5} \text{ mol-Ar/cm}^2 \cdot \text{cmHg} \cdot \text{min}$ をとっており、隔膜細孔中のガスの流れが理想的な Knudsen 流に近い条件であることが分る。ちなみに、実験に用いた隔膜の細孔直径は約 400 \AA (表 2.1 参照) であるから平均自由行程 λ が 800 \AA のとき $\lambda/r=4$ となり、Knudsen 流の条件 ($\lambda/r \geq 1$) を満足している。

一方、計算値 Q_{calc} より、実測値に近い透過係数を与える細孔長さは、細孔直径 400 \AA のとき、 $2000 \sim 2200 \mu$ であることが分る。この隔膜の厚みは約 150μ であるから、細孔の迷宮度 δ^2 として $1.33 \sim 1.47$ なる値が得られる。これは、アルミナその他の多孔質触媒について知られている値 (空隙率 0.3 のとき) の 2~3 倍に相当しており、隔膜中の細孔が非常に複雑に屈曲していることが分る。

5.2 起動時におけるカスケード特性

図 5.2 は、全還流条件で起動した場合のカスケード内における濃度の経時的な変化を上端 (第 5 段拡散流) x_5' および下端 (第 1 段未拡散流) x_1'' について示したものである。図に示した実験例は、代表的な操作圧力、すなわち供給流圧力 P_h が 472 mmHg 、 908 mmHg および 1429 mmHg の場合である。図より、いずれの場合も、起動と同時に ^{36}Ar および ^{40}Ar が、それぞれカスケードの上段、下段へと移動し始めること、さらに平衡達成時間は 30 分前後であり、操作圧力にはあまり依存しないことが分る。

また、各条件における分離の度合いに違いが認められるが、これは後述するように、操作圧力によりカスケード内の高圧側圧力、圧力比、流量などの流動条件が異なるためである。

図 5.3 は、前図に示した実験例のうち供給流圧力 P_h が 472 mmHg および 1429 mmHg の場合をとり上げ、起動後のカスケード循環流量の変化の様子を第 2, 第 4 段について示したものである。

各段における供給流 L 、拡散流 L' および未拡散流 L'' の各流量は、いずれの操作圧力 P_h の場合でもほぼ一定であり、カスケードが全体としてカット0.5の条件で安定に運転されていることが分る。しかし、各流量を詳細に見ると、拡散流 L' が未拡散流 L'' および供給流 L よりも安定している。これは、本実験装置が隔膜前後の差圧を一定とするような制御方式を採用しているためである。すなわち、本制御方式では、未拡散流路に設けた供給流圧力自動圧力調節弁の作動により、未拡散流量 L'' が調整されるため、供給流量 L もそれに応じて増減することになる。起動直後から10～30分における大きな流量変動は、各段の設定圧力により定まるガスインベントリーと初期充填ガス量との不整合を適宜修正した際に生じたものである。

また、第2段、第4段の流量収支に若干の違いがみられるが、これは1～2%程度であり質量流量計の精度(±2%FS)に基づくものである。

図中に示した拡散筒内各部のレイノルズ数より、供給流圧力 P_h が472mmHgの場合には隔膜管内の流れはほぼ層流となっており、1429mmHgの場合には乱流となっていることが分る。

図5.4は、平衡達成時間の実測値 τ_{exp} と計算値 $\tau_{0.02}$ を各実験条件における1段当りのガスインベントリー G_i に対して示したものである。また、図には、平衡達成時間に密接に関係する段分離係数 α_s と未拡散流量 L'' を示している。

ここで、 $\tau_{0.02}$ は、Burtonの式[(4.20)式～(4.22)式]より算出した値であり、カスケード上下端濃度の差 $x_5' - x_1''$ が平衡値の98%に到達するまでに要した時間である。段分離係数 α は、Fenskeの式[(4.5)式]より求めた5段全体についての平均的な値である。図において τ_{exp} は、ガスインベントリー G_i が約6mol/段以上の範囲で30分前後の値となっている。これは、計算値 $\tau_{0.02}$ から分るようにインベントリー G_i とともに未拡散流量 L'' が増加し段分離係数 α_s が減少する結果と考えられる。なお、 α_s は約4mol/段のインベントリーにおいて最大値をとる傾向を示しているが、これは、後述するように、図示したインベントリーの範囲で拡散筒における種々の分離係数影響因子が相互に関連しあうためと考えられる。

5.3 平衡時におけるカスケード特性

ここでは、図5.2に示した代表的な操作条件における実験例をとり上げ、各段における濃度分布、分離係数および分離係数に影響を及ぼす種々の因子について考察する。

5.3.1 濃度分布

図5.5は、各段における供給流濃度 x 、拡散流濃度 x' および未拡散流濃度 x'' を示したもので、いずれの操作条件の場合においても、各濃度が上段へと滑らかに増加していく様子が分る。いま、任意段 i とその上下の段 $i+1$ 段および $i-1$ 段のまわりの濃度に注目すると、次のような関係が認められる。

i 段目における拡散流濃度 x_i' と $i+1$ 段目における未拡散流濃度 x''_{i+1} がほぼ等しく、方形カスケードを全還流で運転する場合の条件である $x_i' = x''_{i+1}$ および $L_i' = L''_{i+1}$ (図5.3参照)

なる関係が満足されている。また、 $i-1$ 段目の拡散流濃度 x'_{i-1} と i 段目の供給流濃度 x_i および $i+1$ 段目の未拡散流濃度 x''_{i+1} がほぼ一直線上に並び、しかも段方向に傾きを有している。これらの濃度関係は、カスケードから製品流を抽出する場合にも満足されるものであり、方形カスケードの特徴となっている。これを理想カスケードの場合（各段の合流点において濃度の混合がなく、 $x'_{i-1} = x_i = x''_{i+1}$ なる関係がなり立つ）と比較すると、図に示す濃度分布より $x'_{i-1} < x_i < x''_{i+1}$ がなり立っている。すなわち、方形カスケードの段方向の濃度勾配は理想カスケードのそれよりも大きくなるため、所定の濃縮度を達成するのに要する段数が少なくなることが理解される。

一方、両カスケードを分離仕事の効率の観点からみると、各段の合流点において混合損失の生ずる方形カスケードは、一定量の濃縮製品を得るのに要する循環流量および所要動力が大きくなる。このため、実際のプラントでは、1段当りの循環流量が異なる幾つかの方形カスケードを用いて理想カスケードに近似させたステップカスケードが採用される。

5.3.2 段分離特性

図 5.6 は、平衡時におけるカスケード内の濃度分布（図 5.5 中の(b)）に対応する各段の段分離係数 α_s および流動条件を示したものである。これより、拡散筒の供給流圧力 P_h と隔膜前後の差圧 ΔP_b （供給流圧力 P_h と拡散流圧力 P_ℓ との差）はほぼ一定値であるが、隔膜前後の圧力比 γ にはバラツキがみられる。これは、本カスケードでは、供給流圧力 P_h を一定に保つ制御方式を採用しており、拡散流圧力 P_ℓ が各段の圧縮機性能、配管抵抗などにおける若干の相異により変化するためである。

しかし、図において、圧力比 γ のバラツキが分離係数に及ぼす影響は比較的小さいのは、隔膜における逆拡散の大きさがほぼ $(1-\gamma)$ に依存するものであり、しかも本実験では γ が 1 に比べてかなり小さいためである。

一方、各段の流量 L, L', L'' は、隔膜前後の差圧 ΔP_b および隔膜の透過係数 Q に応じて多少バラツキがみられるが、ほぼ一定値となっている。さらに、各流量間の収支は、カット θ がほぼ 0.5 に近い値となっていることから、カスケードが全還流条件で安定に運転されていることが分る。なお、隔膜管の高圧側平均レイノルズ数 \overline{Re} より、隔膜管内の流れはほぼ乱流となっている。

図 5.7 は、前図と対応する各段の分離効率およびこれに関係する気体の物性値を示したものである。ここで、 Z_s は $(\alpha_s - 1) / (\alpha_0 - 1)$ で定義される段分離効率であり、 $Z_1 \sim Z_5$ および k は (4.3) 節に述べた各式より算出した効率および補正項である。ただし、境界層の効果 Z_3 については、Bilous の式 (4.12), (4.13) を用いた。

図において、各段の密度 ρ および拡散係数 D_{12} は供給流圧力 P_h に対応して変化しているが、圧力に依存しない粘性係数 μ および $\mu / \rho D_{12}$ なる関係で定義されるシュミット数は一定値となることが注目される。

一方、分離係数影響因子については、逆拡散、Present-de Bethune および境界層の各効果は、各段における Z_1, Z_2, Z_3 の値から分るようにほぼ一定値となっている。これは、前述のように各段における流動条件および気体の物性値がほぼ一定値となっているためである。し

かし、カットの効果 Z_5 は、各段におけるカット θ の変化が顕著に現われ、段分離効率に大きな影響を及ぼしていることが分る。

最後に、補正因子 k の値は第1段において約0.97、第2段～第5段において約0.94であり、いずれも1に近い値であることが注目される。これは、隔膜管の高圧側の流れが乱流の場合には、 $Z_1 \sim Z_5$ の計算に用いた在来の推算式が分離係数に影響を及ぼす各因子の大きさを比較的よく近似するものであることを示唆している。

5.3.3 分離係数影響因子

図5.8は、カスケード内の流動特性が最も安定している第3段目の拡散筒操作条件と供給流圧力 P_h との関係を示したものである。図において、圧力比 γ は、圧縮機の設計圧縮比が一定 ($=10$) であるにもかかわらず、供給流圧力 P_h により大きく変化している。これは、圧縮機吸入側の拡散および未拡散流路における配管抵抗が P_h (すなわち、各流路の流量) により変化するためと考えられる。一方、カット θ は、供給流圧力 P_h および圧力比 γ に依存せず、一定値約0.5となっており、カスケードが操作圧力の広い範囲で安定に運転されていることを示している。また、透過係数 Q_{exp} も一定値約 $0.84 \times 10^{-5} \text{ mol-Ar/cm}^2 \cdot \text{cmHg} \cdot \text{min}$ となっており、各段における分離がほぼ理想的なKnudsen流の範囲内で行なわれたことが分る。

図5.9は、前図と対応する各点における拡散筒各部のレイノルズ数およびガスインベントリ-を示したものである。ここで、拡散筒供給流および未拡散流レイノルズ数 $(Re)_F$, $(Re)_W$ は隔膜管の入口および出口における値であり、高圧側平均レイノルズ数 \bar{Re} は隔膜管の入口、出口における平均値 $\{(Re)_F + (Re)_W\}/2$ である。また、ガスインベントリ- Gi は1段当り (第3段目) のガス量である。

図において、拡散筒各部のレイノルズ数はガスインベントリ-とともに供給流圧力 P_h に対してほぼ比例的な変化を示している。また $(Re)_F$ および $(Re)_W$ の値より、供給流は図の範囲においてほぼ乱流になっていると考えられるが未拡散流は層流から乱流の範囲で変化している。このことから、供給流圧力 P_h の低い範囲では、拡散筒高圧側のレイノルズ数が隔膜管に沿って変化することが推察される。

図5.10は、分離係数の影響因子を考える上で重要なパラメータであるシュミット数 $(Sc)_F$ およびこれに関係するガス物性値の圧力依存性を示したものである。ここで、各物性値は拡散筒入口における供給流 L に対する値である。図において、拡散係数 $(D_{12})_F$ は $1/P_h$ に、密度 ρ_F は P_h にほぼ比例するのに対し、粘性係数 μ_F は圧力 P_h に依存せず一定値となるため、シュミット数 $(Sc)_F$ は供給流圧力 P_h の広い範囲において一定値約0.67となっている。

図5.11は、段分離係数に影響を及ぼす各因子の大きさと供給流圧力 P_h との相関を示したものである。ここで、隔膜の細孔内における表面拡散流の効果 Z_4 は、既述したようにアルゴンガスがほぼ理想気体の法則に従う非吸着性の気体と考えられることから、 $Z_4 = 1.0$ としている。図において、逆拡散の効果 Z_1 は P_h に対し緩やかな増加を示しているが、これは図5.8に示した圧力比 γ の傾向と対応するものである。Present-de Bethuneの効果 Z_2 は P_h の増加とともにほぼ直線的に減少しており、しかもその減少度合いは約 $1.2 \text{ kg/cm}^2 \text{ A}$ 以上の圧力範囲における Z_5 の傾向とほぼ一致している。これより、この圧力範囲では、 Z_2 の推算式 (

4.9) が定性的にはよく成り立つことが分る。境界層の効果 Z_3 は、 P_h の広い範囲で一定となっている。これは Z_3 の推算式 (4.12) において、境界層の厚み y と隔膜単位面積当りの透過流量 ω との積および ρD_{12} が一定値となり、隔膜管高圧側のレイノルズ数 Re の変化 (図 5.9) の影響を表わしていないためである。

カットの効果 Z_5 は、図 5.8 に示したカット θ に対応するものであり、供給流圧力 P_h に依存しないことが明らかである。

ところで、図 5.1, 8 に示した透過係数は、本実験範囲内における隔膜細孔内の流れが圧力に依存しない Knudsen 流であることを示唆している。一方、前述のように Present-de Bethune の効果 Z_2 および段分離係数 Z_s は圧力 P_h に依存しており、細孔内の流れが遷移流になっていることを表わしている。細孔内の流れに関してこのような矛盾した結果が得られる理由は明らかではないが、理想的な細孔モデルに基づく (4.9) 式を孔径分布や細孔の屈曲が存在する実際の隔膜に適用することに限界のあること、あるいは境界層の効果 Z_3 が正確に見積られていないことなどが考えられる。

補正因子 k は、供給流圧力 P_h の低い範囲では単調な増加を示し、約 $1.4 \text{ kg/cm}^2 \text{A}$ 以上においてほぼ一定値 1.0 に漸近している。これより、(4.6) 式が、供給流圧力 P_h の高い範囲 (隔膜管内の流れは乱流となる) において定性的にはよく成り立っていることおよび圧力の低い範囲において実験値とのずれが非常に大きくなることが分る。低圧においてこのように大きなずれの生ずる理由としては、 $Z_1 \sim Z_5$ の計算に用いた推算式のうち、境界層の効果 Z_3 の算定に用いた Bilous の式 (4.12) ~ (4.14) がレイノルズ数の低い範囲で成り立たないことが考えられる。そこで、以下において隔膜の近傍における流れの状態と段分離効率との関係について若干の考察を試みてみた。

図 5.12 は、(4.18) 式で定義した段分離係数に対する補正因子 k と隔膜透過レイノルズ数 $(Re)_b$ との関係を示したものである。ここで、 $(Re)_b$ は隔膜の空隙率を 0.3^* と仮定した場合の単位表面積当りの拡散流量から計算した値である。これより、補正因子 k と隔膜透過レイノルズ数 $(Re)_b$ が図中の実線で表わした近似式、

$$k = 0.98 - e^{-0.803(Re)_b} \dots \dots \dots (5.1)$$

でよく関係づけられることが分かる。このことは、段分離効率 Z_s が隔膜透過レイノルズ数 $(Re)_b$ すなわち隔膜の細孔内における気体の流れと密接に関連していることを意味している。

ところで、Ebel の提案式 (4.15) は隔膜の高圧側および隔膜の細孔内における気体の流れの状態を考慮していることから、境界層の効果の推算法としては極めて興味ある式である。本式の適用にあたっては、隔膜の表面摩擦係数が分かっている必要があるが、隔膜の高圧側表面から低圧側への拡散流がある場合の表面摩擦係数を知ることは簡単ではない。したがって、隔膜近傍における流れの状態の分離係数への影響を解明するためには今後のより詳細な研究にまたねばならない。そこで、ここではこの問題の 1 つの手掛りを得る目的で、隔膜の見掛けの表面

* 隔膜メーカーの住友電気工業(株)における推定値は 0.3 ~ 0.5 である。

摩擦係数 f_F および f_E とレイノルズ数との相関を調べてみた。

図 5.13 は、隔膜の見掛けの摩擦係数の比 f_F/f_E と隔膜高圧側における平均レイノルズ数 \overline{Re} との関係を示したものである。ここで、 f_E は Ebel の式 (4.15) において、段分離効率 Z_s および (4.8), (4.9) (4.17) 式から逆算した Z_s を代入して計算した値であり、 f_F は隔膜管の高圧側流路における圧力損失の実測値を Fanning の式に適用して求めた値である。また、Ebel の式において、隔膜の細孔内における透過ガス流速 v_b は隔膜の空隙率を 0.3、細孔内のガス圧力を供給流および拡散流圧力の平均値として計算した。これより、 f_E/f_F と \overline{Re} の関係は次の近似式で表わせることが分る。

(i) $\overline{Re} < \sim 3000$ の場合

$$f_E = \left\{ 32.006 - 3.511 \times 10^{-4} \overline{Re}^{1.391} \right\} f_F \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

(ii) $\overline{Re} > \sim 3000$ の場合

$$f_E = 5.10 f_F \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

したがって、Ebel の式 (4.15) においてこれらの関係式を導入すれば、拡散筒における流量、圧力の関係および隔膜管の圧力損失から分離係数に及ぼす隔膜近傍の流れの効果をほゞ推定できることが分る。

すなわち、

(i) $\overline{Re} < \sim 3000$ の場合

$$Z_s = \exp \left[- \frac{1}{0.5 f_F (32.006 - 3.511 \times 10^{-4} \overline{Re}^{1.391})} \cdot \frac{\mu}{\rho D_{12}} \cdot \frac{v_b}{V_h} \right] \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

(ii) $\overline{Re} > \sim 3000$ の場合

$$Z_s = \exp \left[- \frac{1}{0.5 (5.10 f_F)} \cdot \frac{\mu}{\rho D_{12}} \cdot \frac{v_b}{V_h} \right] \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

表 5.1 カスケード操作条件および実験結果*

実験番号	I		II		III		IV		V		VI		VII	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
初期充填圧力 (kg/cm ² A)	0.30		0.39		0.50		0.60		0.68		0.75		0.85	
原料ガス組成	36 A 濃度 (mol%)		0.3175		0.3314		0.3311		0.3319		0.3335		0.3308	
	同位体比 ³⁶ Ar/ ⁴⁰ Ar (-)		0.31855		0.3325		0.33225		0.33299		0.33457		0.33193	
圧縮機回転数 (rpm)	250		300		450		450		450		450		450	
拡散筒供給流圧力 P _h (kg/cm ² A)	0.64	0.63	0.81		1.245	1.235	1.41	1.40	1.60	1.60	1.73	1.69	1.94	1.94
拡散流圧力 P _L (mmHg)	77.5	78.0	87.0		99.5	98.0	109.0	108.0	119.0	120.0	127.0	123.0	139.0	137.0
圧力比 r (-)	0.164	0.168	0.146		0.109	0.108	0.105	0.105	0.101	0.102	0.100	0.099	0.097	0.096
平均圧力 $\bar{P} = \frac{P_h + P_L}{2}$ (mmHg)	274.1	270.7	341.4		507.7	503.2	573.1	568.9	648.0	648.5	699.9	683.1	782.1	782.1
拡散筒供給流量 L (mol/min)	1.28	1.26	1.64		2.63	2.61	3.03	3.02	3.45	3.50	3.71	3.72	4.27	4.24
拡散筒供給流温度 (°K)	2995		3021		2953		2921		2930		2935		2926	
拡散流量 L' (mol/min)	0.656	0.654	0.862		1.356	1.348	1.564	1.552	1.772	1.760	1.930	1.893	2.205	2.184
未拡散流量 L'' (mol/min)	0.622	0.607	0.774		1.273	1.260	1.468	1.468	1.676	1.739	1.780	1.830	2.072	2.059
透過係数 Q _{exp} (mol ⁻¹ /cm ² ·cmHg·min)	0.83×10 ⁻⁵	0.84×10 ⁻⁵	0.84×10 ⁻⁵		0.83×10 ⁻⁵	0.83×10 ⁻⁵	0.84×10 ⁻⁵	0.84×10 ⁻⁵	0.83×10 ⁻⁵	0.83×10 ⁻⁵	0.84×10 ⁻⁵	0.84×10 ⁻⁵	0.85×10 ⁻⁵	0.84×10 ⁻⁵
カット θ (-)	0.51	0.52	0.53		0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.50	0.52	0.51	0.52	0.51
ガスインベントリ - G _i (mol/段)	2.61	2.59	3.14		4.69	4.66	5.38	5.35	6.07	6.06	6.53	6.39	7.35	7.32
供給ガス流速 (cm/sec)	4.20	4.22	4.28		4.38	4.38	4.41	4.44	4.44	4.50	4.42	4.55	4.50	4.50
供給流ガス密度 ρ (g/cm ³)	0.10×10 ⁻²	0.10×10 ⁻²	0.13×10 ⁻²		0.20×10 ⁻²	0.20×10 ⁻²	0.23×10 ⁻²	0.23×10 ⁻²	0.26×10 ⁻²	0.26×10 ⁻²	0.28×10 ⁻²	0.27×10 ⁻²	0.31×10 ⁻²	0.31×10 ⁻²
供給流ガス粘度 μ (poise)	0.23×10 ⁻³	0.23×10 ⁻³	0.23×10 ⁻³		0.23×10 ⁻³	0.23×10 ⁻³	0.22×10 ⁻³	0.22×10 ⁻³	0.22×10 ⁻³	0.22×10 ⁻³	0.22×10 ⁻³	0.22×10 ⁻³	0.22×10 ⁻³	0.22×10 ⁻³
供給流路圧力損失 ΔP _b (mmHg ₂ O)	1.0	1.0	2.76		9.7	9.7	11.2	10.9	1.22	1.27	1.35	1.35	1.49	1.48
供給流シュミット数 (S _c) _F (-)	0.67	0.67	0.67		0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
アルゴンガスの相互拡散係数 (D ₁₂) _F (cm ² /sec)	0.34	0.34	0.27		0.17	0.17	0.15	0.15	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11
拡散筒入口におけるレイノルズ数 (Re) _F (-)	2977	2935	3784		6194	6142	7208	7166	8179	8290	8788	8798	10143	10066
拡散筒出口におけるレイノルズ数 (Re) _W (-)	1450	1413	1790		2999	2968	3490	3485	3976	4120	4217	4325	4919	4885
隔壁透過レイノルズ数 (Re) _b (-)	253	253	333		533	530	620	613	700	693	763	747	870	863
段分離係数 α _s (-)	1.0481	1.0484	1.0521		1.0543	1.0546	1.0530	1.0541	1.0523	1.0527	1.0520	1.0526	1.0515	1.0523
段分離効率 Z _s (-)	889	895	963		1004	1009	980	1000	967	974	961	972	952	967
逆拡散の効果 Z _i (-)	0.84	0.83	0.85		0.89	0.89	0.89	0.89	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Present-de Bethune の効果 Z ₂ (-)	0.93	0.93	0.91		0.86	0.86	0.84	0.84	0.82	0.82	0.80	0.81	0.78	0.78
境界層の効果 Z ₃ (-)	0.91	0.91	0.91		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
流れ様式の効果 Z ₄ (-)	1.40	1.41	1.42		1.41	1.41	1.41	1.40	1.40	1.39	1.41	1.40	1.41	1.40
補正因子 k (-)	0.875	0.855	0.908		0.971	0.946	0.969	0.980	0.992	0.978	0.952	1.00	0.961	0.978
平衡達成時間 τ _{exp} (min)	-	-	-		32	-	28	-	-	-	30	-	31	-
98% 平衡達成時間 τ _{0.02} (min)	386		362		334		328		325		329		323	

* 第3段目における値

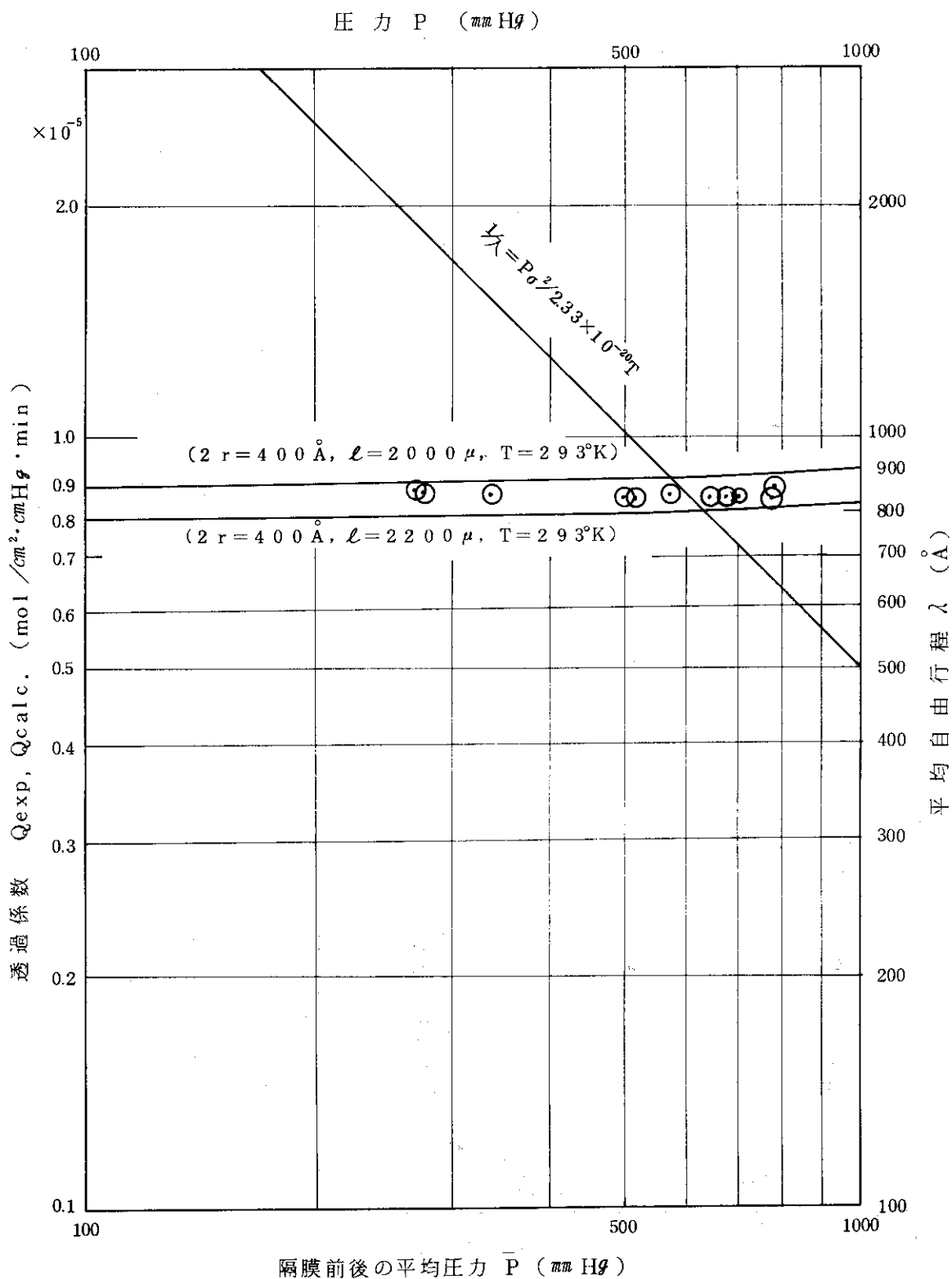


図 5. 1 隔膜の透過係数と圧力の関係

[実線 : 計算値 , ⊙ : 実験値
 アルゴンガスの分子直径 $\sigma = 3.67 \times 10^{-8} cm$ と仮定]

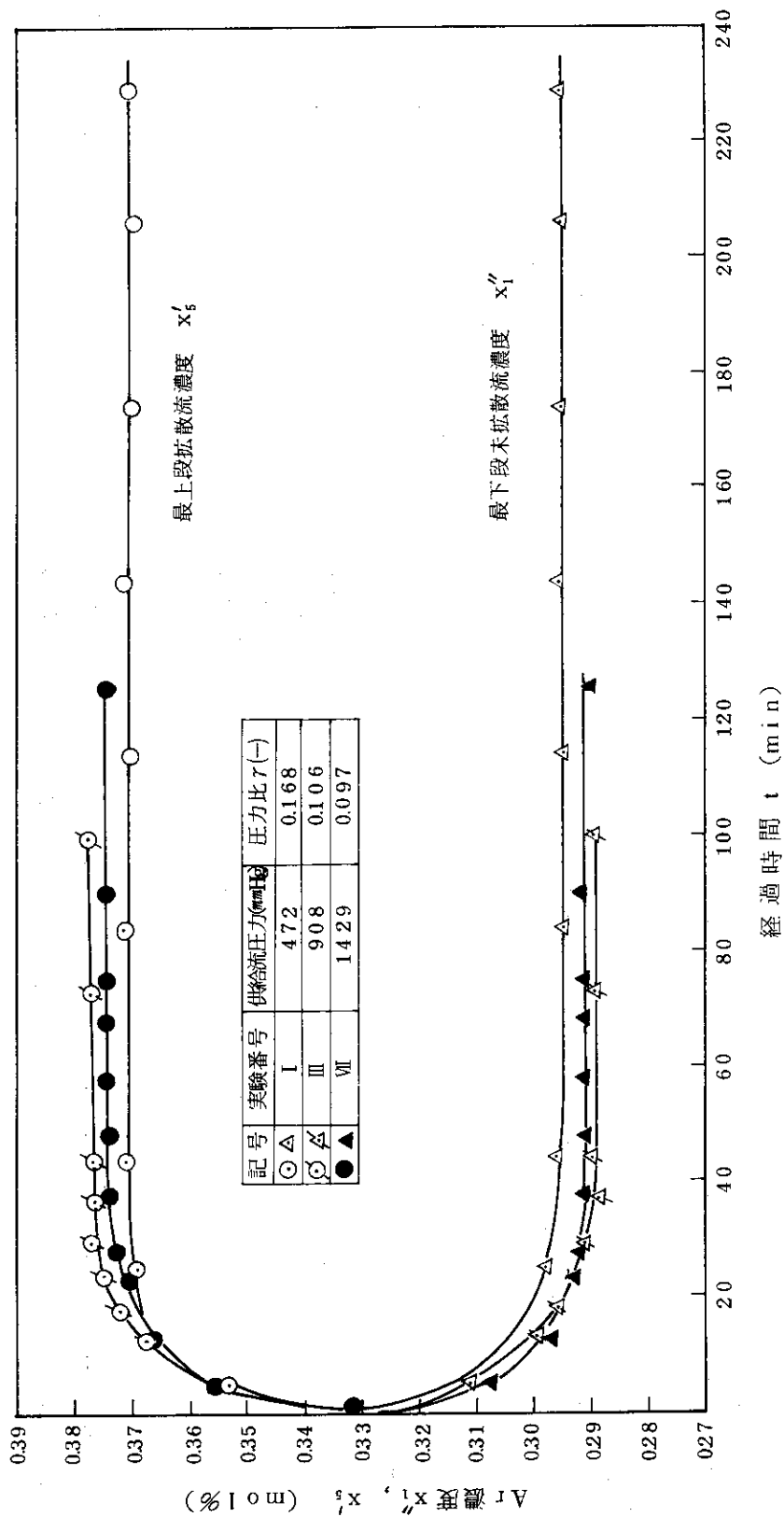


図5.2 カスケードの上、下端段における³⁶Ar濃度の経時的変化

〔各実験例のグラフは、カスケード初期充填ガス中の³⁶Ar濃度を
0.3315 mol%に補正している。〕

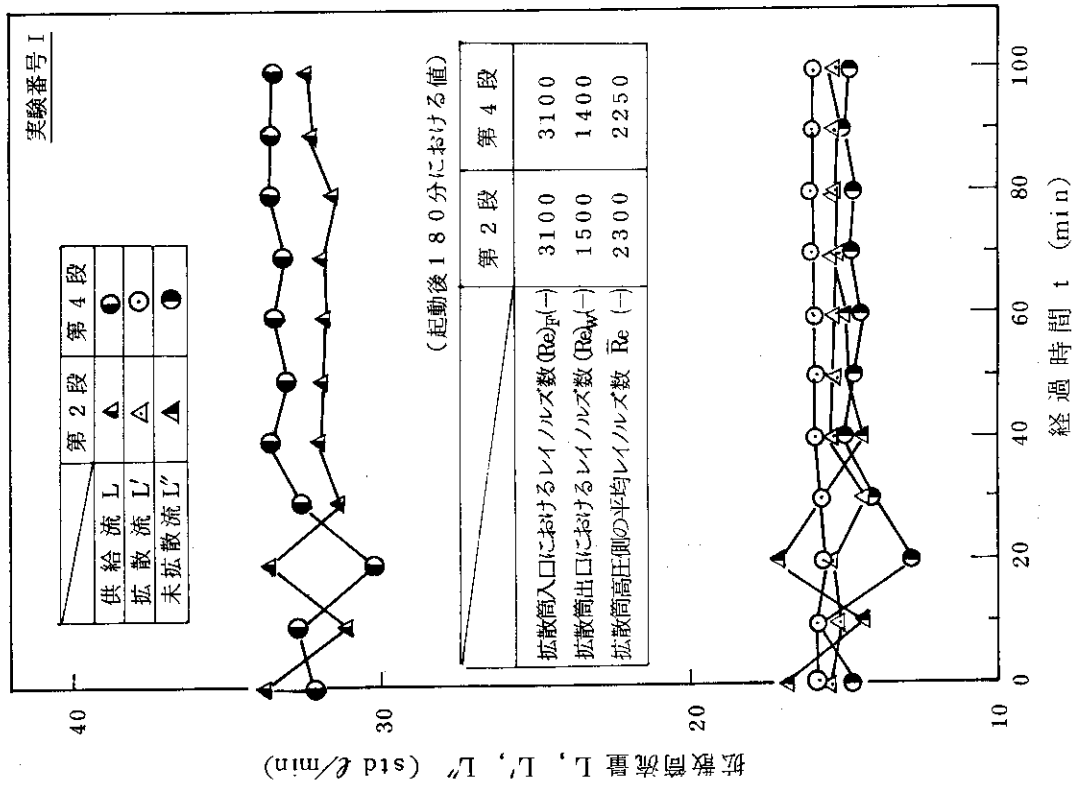
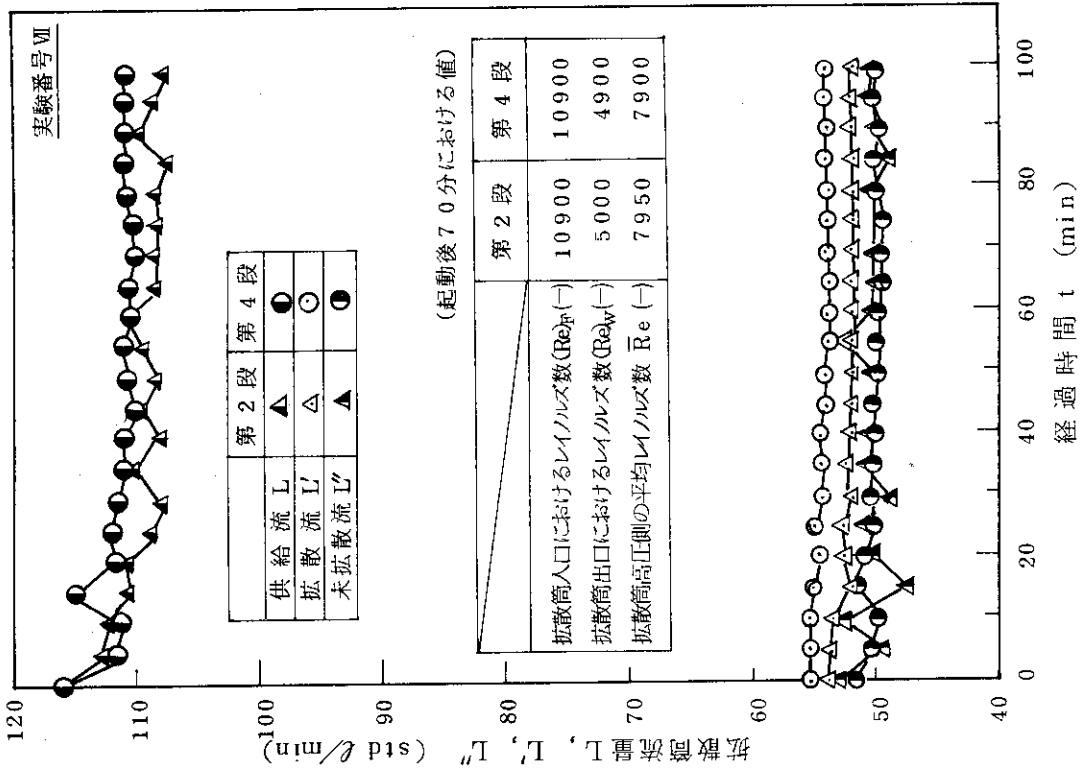


図 5.3 カスケードの第 2, 第 4 段における流量の経時的変化
 (時間 $t = 0$: 各段独立運転から全段連結運転に切換えた時刻)

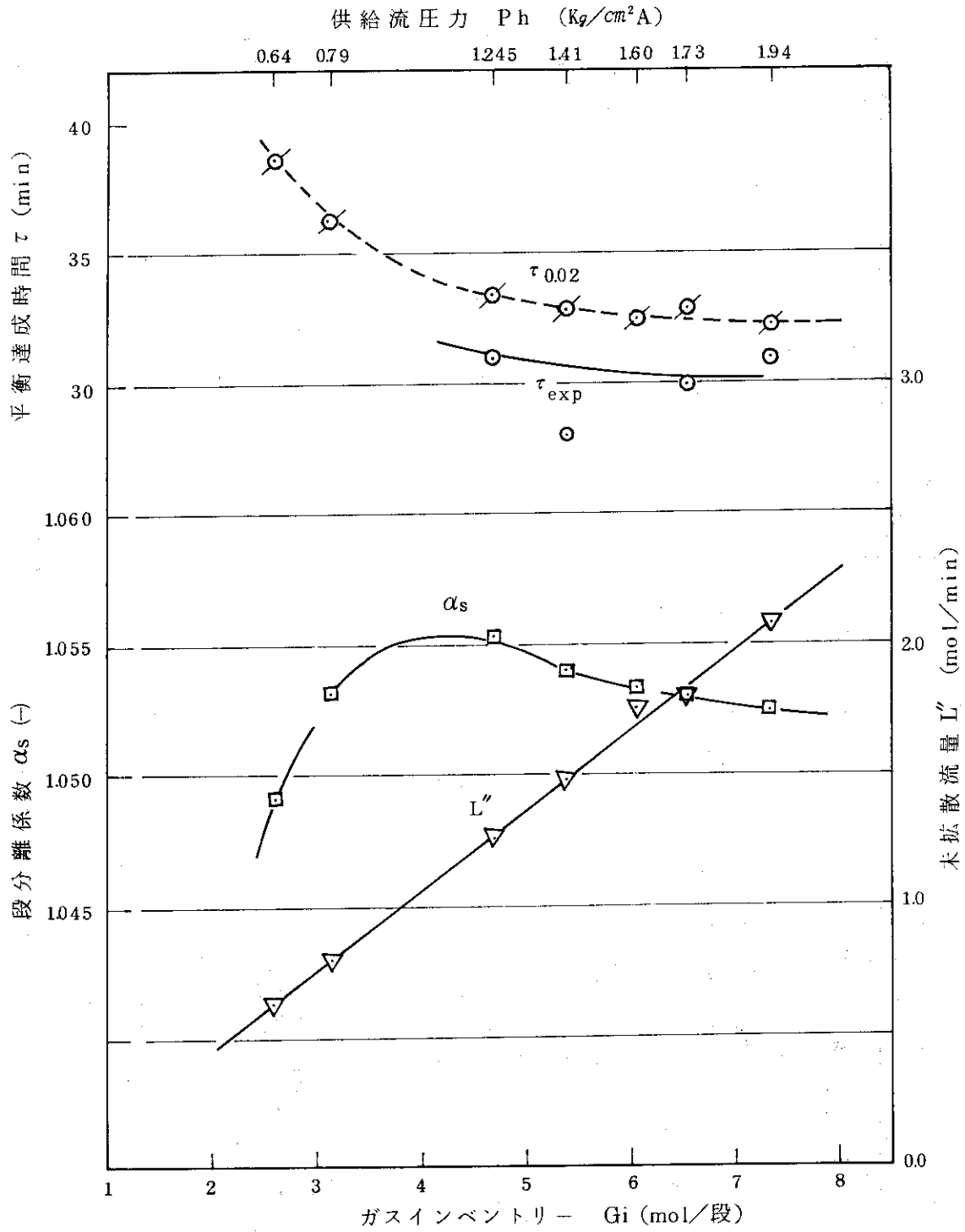


図5.4 平衡達成時間および段分離係数とガスインベントリとの関係

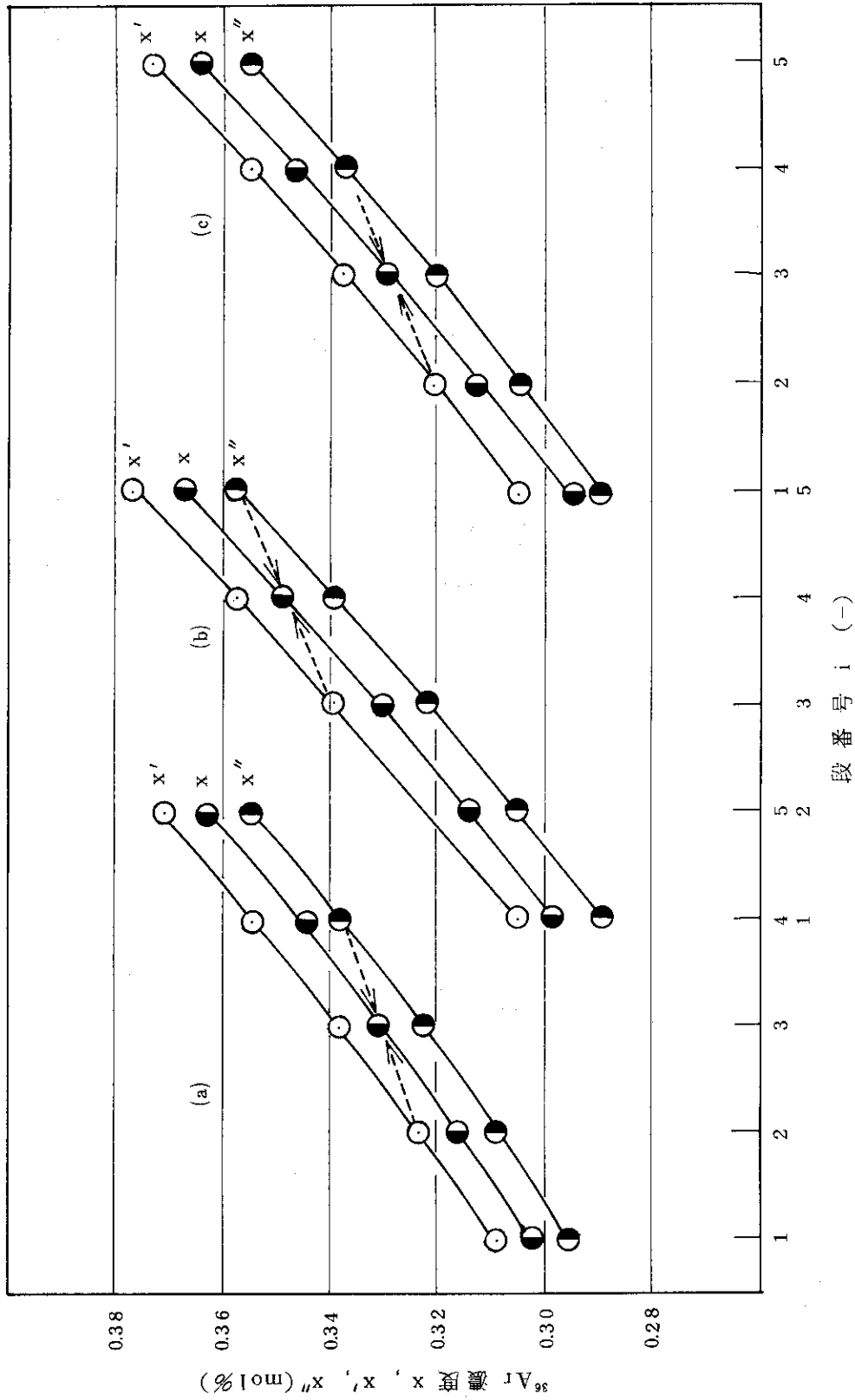


図 5. 5 カスケード内の平均濃度分布

(a): 実験番号 I (起動後 206 分における値)
 (b): 実験番号 II (起動後 100 分における値)
 (c): 実験番号 VII (起動後 90 分における値)

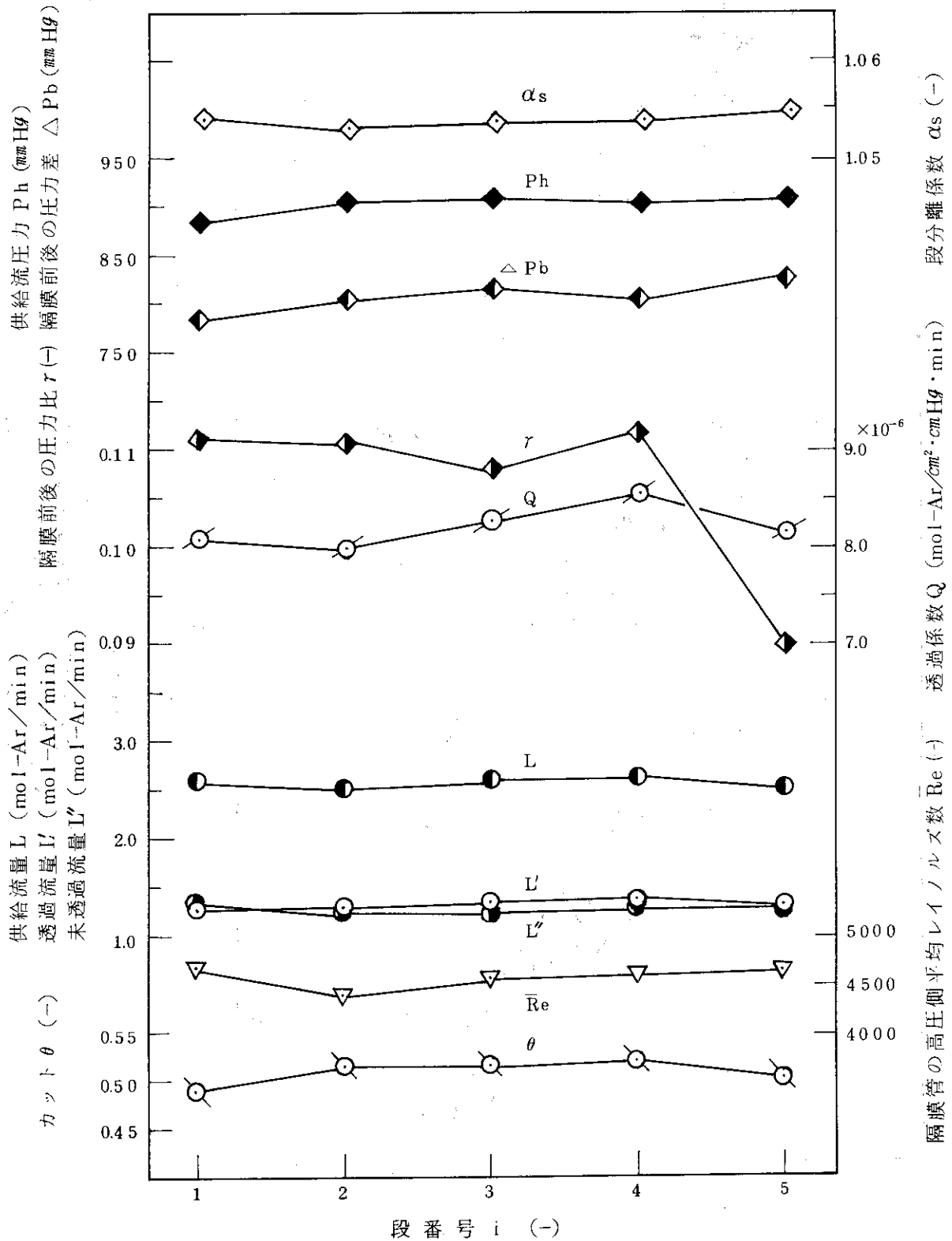


図 5. 6 カスケード内の流動条件

〔実験番号：5
起動後 93分における値〕

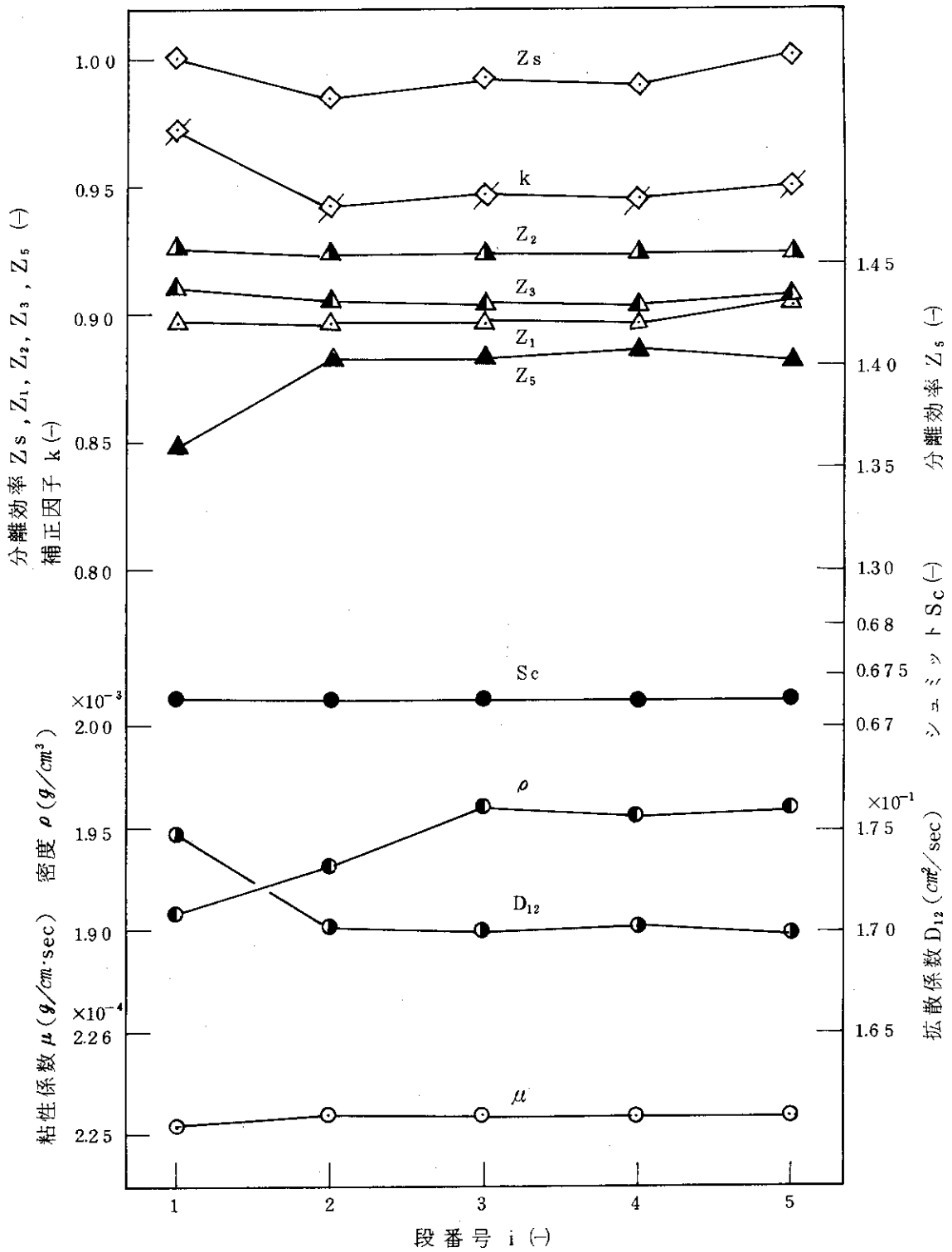


図 5.7 カスケード各段における気体の物性値および分離効率
 [実験番号 5 (起動後 93 分における値)
 • 気体の物性値 μ , τ , D_{12} , Sc は供給流および未拡散流における値の平均値で表わしている。]

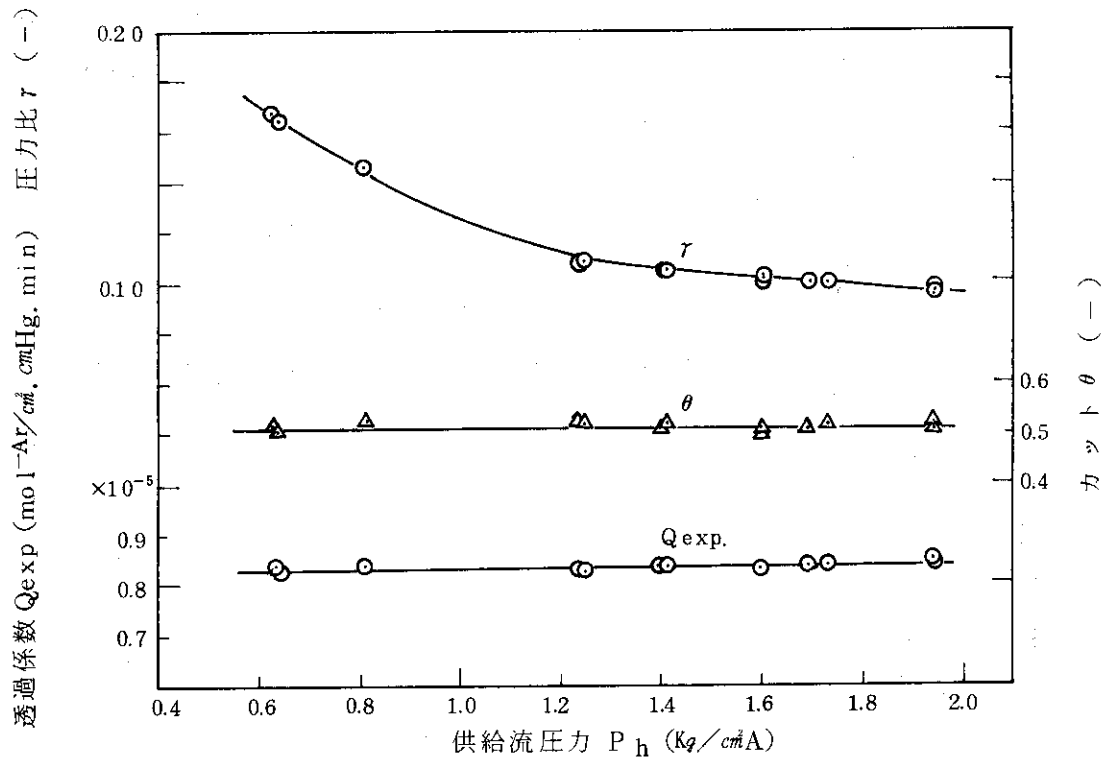


図5.8 拡散筒の操作条件と供給流圧力の関係 (第3段目)

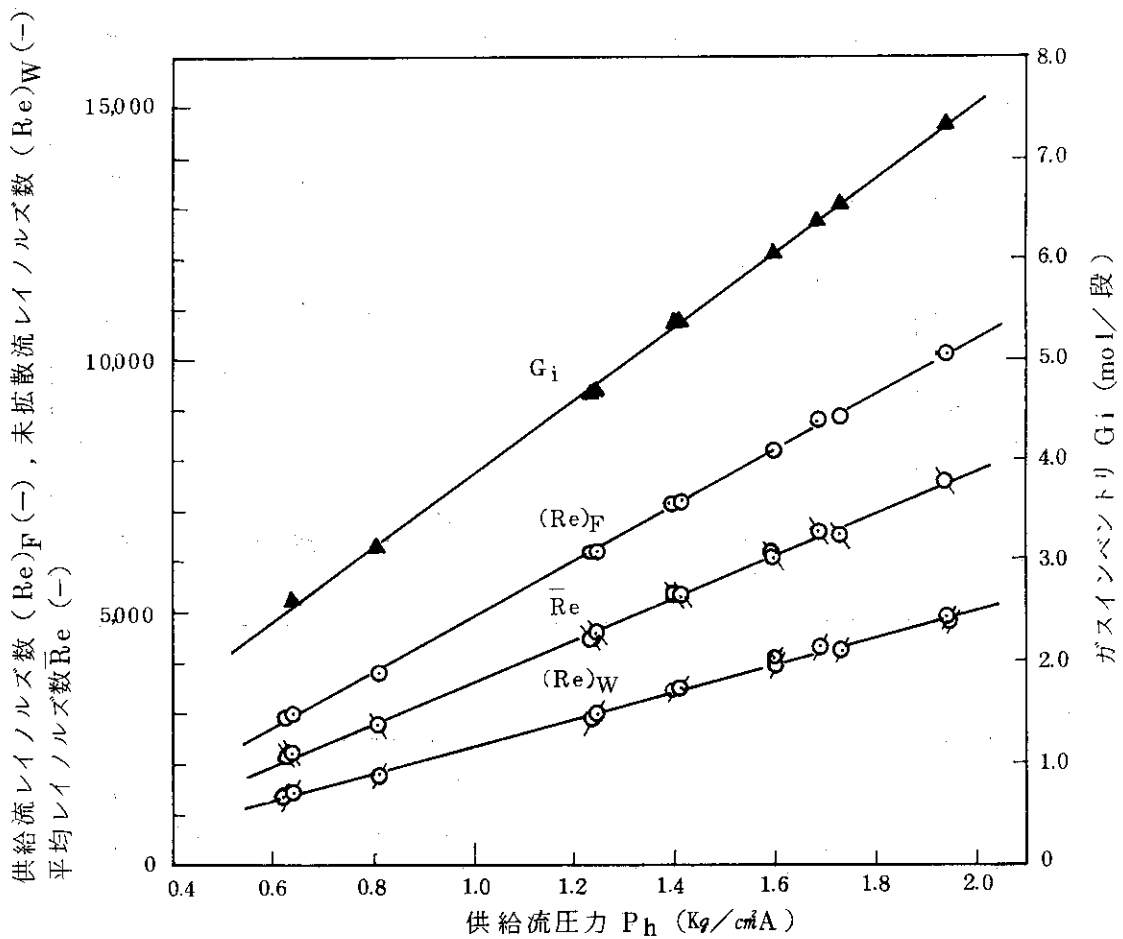


図5.9 拡散筒各部のレイノルズ数と供給流圧力の関係 (第3段目)

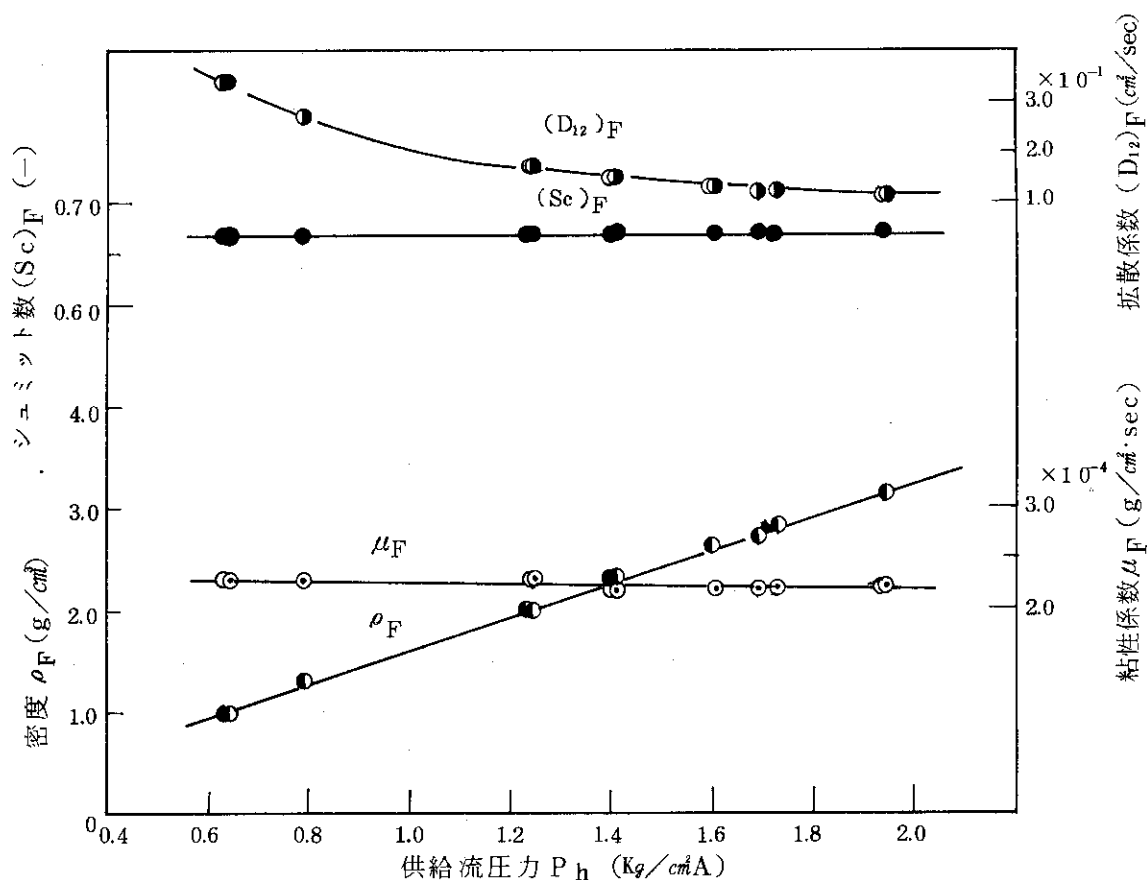


図5.10 拡散筒供給流における気体の物性値と供給流圧力の関係 (第3段目)

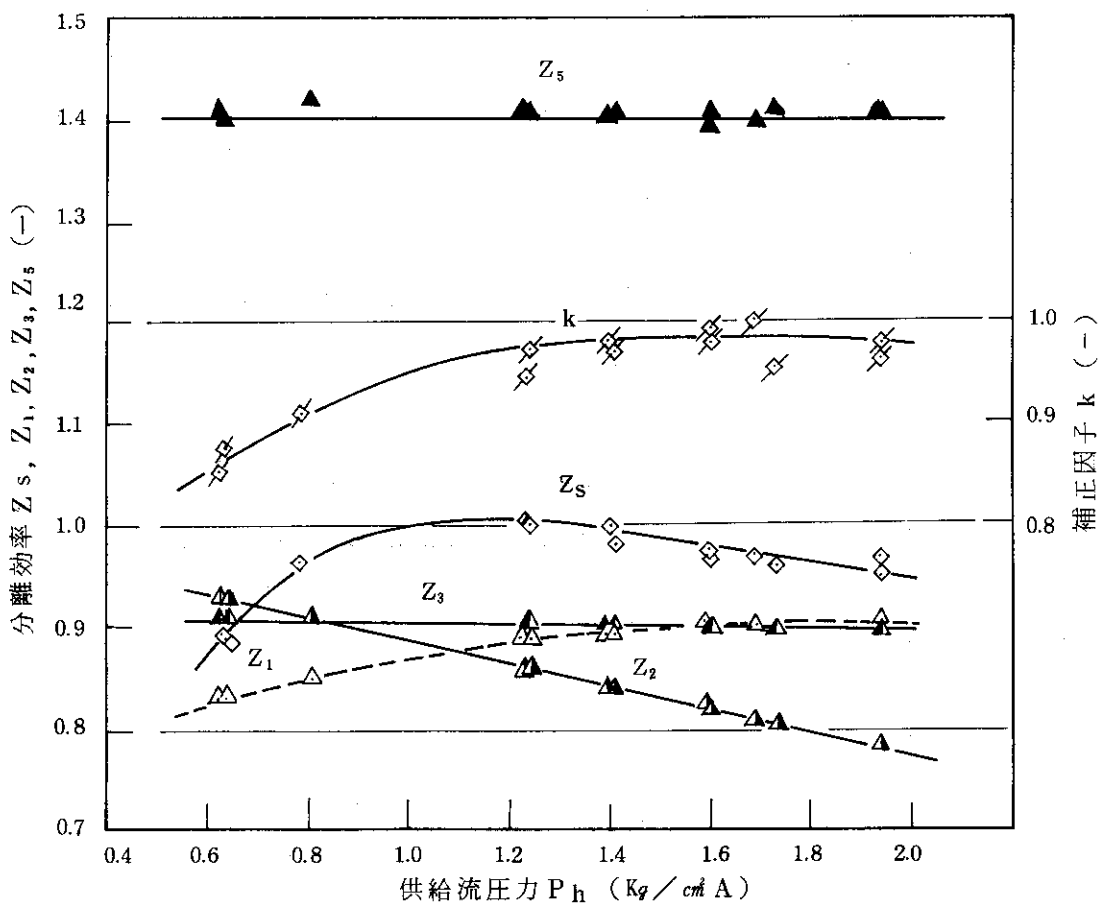


図5.11 拡散筒の分離効率と供給流圧の関係 (第3段目)

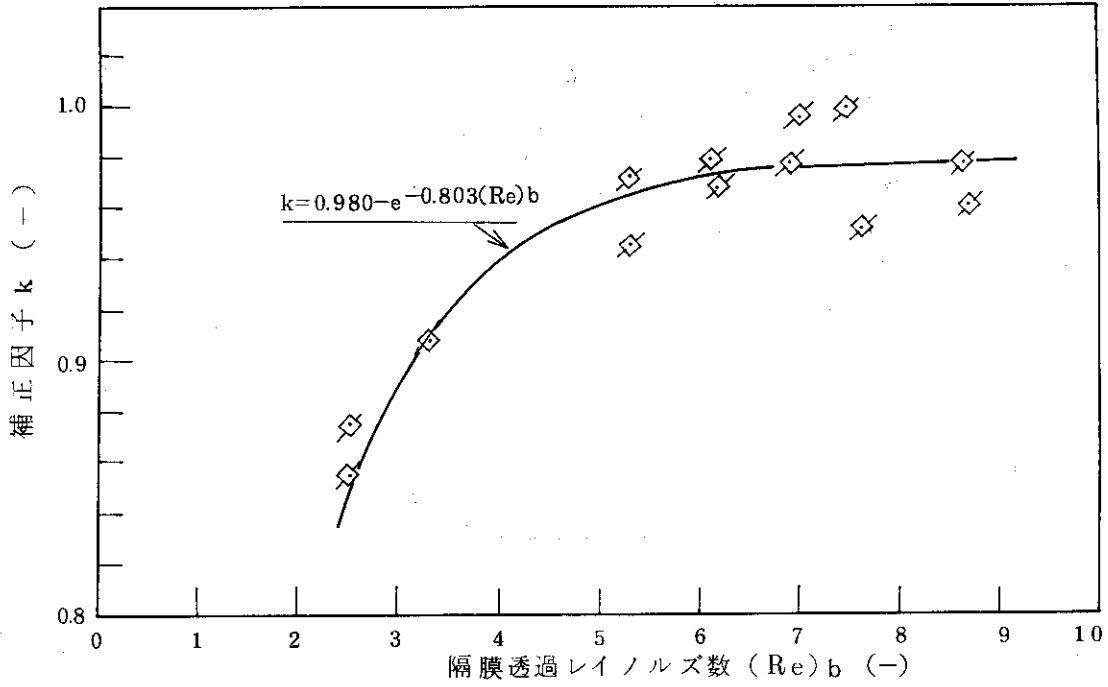


図5.12 段分離効率の補正因子と隔膜透過レイノルズ数の関係

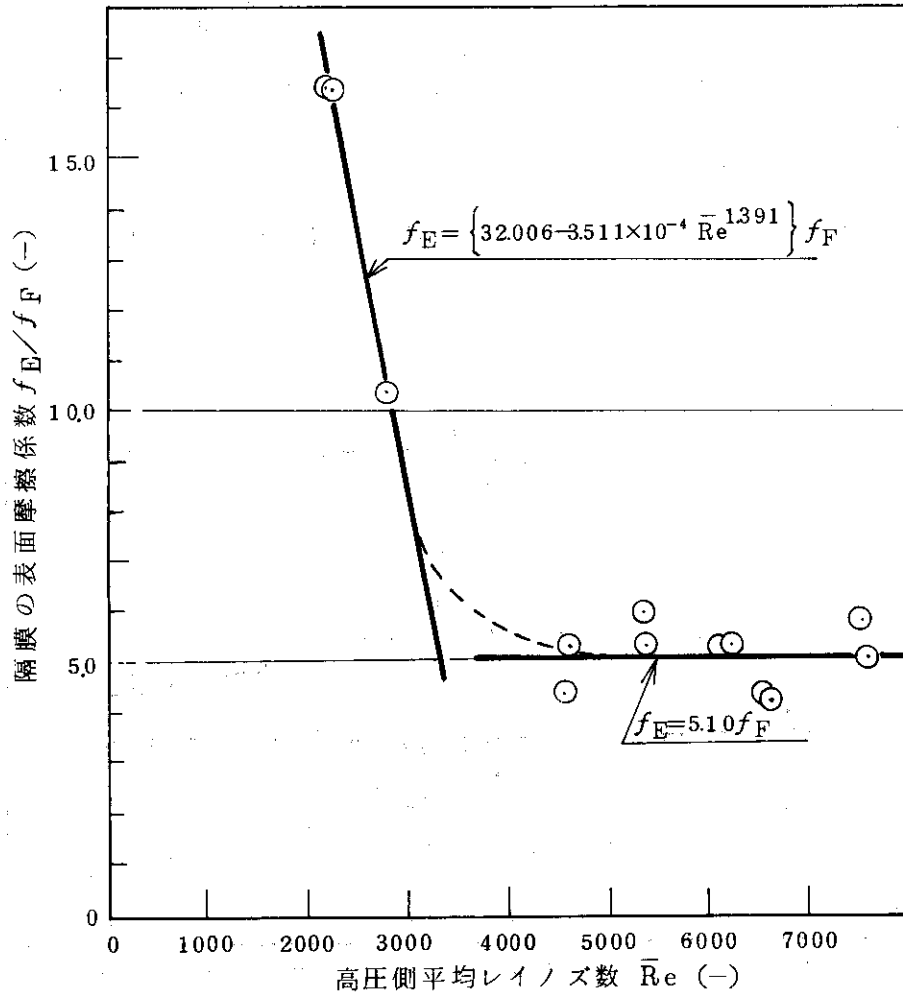


図5.13 隔膜の表面摩擦係数と高圧側平均レイノルズ数の関係

6. ま と め

本報告書は、多孔質隔膜を装着した工学規模の通常型方形カスケード装置によるアルゴン同位体分離実験の結果をまとめたものである。

本実験によって得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 実験に用いた隔膜の細孔直径および細孔長さは、透過係数の実測値 Q_{exp} より、それぞれ約 400 \AA および $2000 \sim 2200 \mu$ と推定された。また、細孔の迷宮度 δ^2 は $1.3 \sim 1.5$ (一)程度と見積られることから、隔膜中の細孔が複雑に屈曲していることが分った。
- (2) 透過係数 Q_{exp} より推定された隔膜の細孔内の流れは、広い操作圧力範囲においてほぼ理想的な Knudsen 流であった。
- (3) カスケード内の濃度分布の平衡達成時間 $\tau_{0.02}$ は、段のガスインベントリ G_i が減少するに従って長くなる傾向が認められたが、本実験範囲内では 30 分程度であり、Burton の式による理論値とほぼ一致した。
- (4) カスケード内の平衡濃度分布と流量との関係から、本カスケード実験装置が広い操作範囲において全還流操作の条件を満足して安定に運転できることが確かめられた。
- (5) カスケード内における流動条件は、各段のガスインベントリ G_i 、低圧側および高圧側の容積、圧縮機性能、配管系の圧力損失などにより変化する。このため、段分離係数 α_s に影響を及ぼす逆拡散の効果 Z_1 、Present-de Bethane の効果 Z_2 、境界層の効果 Z_3 などの諸因子も相互に関連し合って変化する。
- (6) 分離係数に影響する因子として隔膜透過レイノルズ数 $(Re)_b$ をパラメータとする補正因子 $k (= 0.980 - e^{-0.803(Re)_b})$ 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が分った。
- (7) 隔膜近傍における流れの効果 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 \bar{Re} および圧力損失をパラメータとする以下の関係式を見出した。
 - (i) $\bar{Re} < \sim 3000$ の場合

$$Z_3 = \exp \left[- \frac{1}{0.5 f_F (32006 - 3511 \times 10^{-4} \bar{Re}^{1.391})} \cdot \frac{\mu}{\rho D_{12}} \cdot \frac{v_b}{V_h} \right]$$

- (ii) $\bar{Re} > \sim 3000$ の場合

$$Z_3 = \exp \left[- \frac{1}{0.5 (5.10 f_F)} \cdot \frac{\mu}{\rho D_{12}} \cdot \frac{v_b}{V_h} \right]$$

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) Cohen K.: "Theory of Isotope Separation", McGraw-Hill Book Company Inc., New York (1951)
- 2) Naruse Y., Matsuda Y., Maruyama Y. and Aochi T.: JAERI-M 6501, "Static Characteristics of the Gaseous Diffusion Cascades Consisting of Two-Compartment Diffusers" (1976)
- 3) Naruse Y., Maruyama Y., Aochi T., Higashi K., Yamazaki H. and Daito Y.: JAERI-M 6272, "Studies on Dynamic Behavior of Gaseous Diffusion Plant(1) Square Cascade" (1975)
- 4) Higashi K.: "Uran Noshuku" (Uranium Enrichment), 1st. ed., Nikkan-Kogyo Shinbunshya, Tokyo, (1971) [in Japanese]
- 5) Naruse Y. and Yoshida H.: JAERI-M 7858, "Separation of Gases by Porous Membrane Method" (1978)
- 6) Naruse Y., Yoshida H. et al.: JAERI-M 7822, "Separation of Argon Isotopes by Porous Membrane Method (Part I) Design of Engineering Cascade Facility" (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) Cohen K.: "Theory of Isotope Separation", McGraw-Hill Book Company Inc., New York (1951)
- 2) Naruse Y., Matsuda Y., Maruyama Y. and Aochi T.: JAERI-M 6501, "Static Characteristics of the Gaseous Diffusion Cascades Consisting of Two-Compartment Diffusers" (1976)
- 3) Naruse Y., Maruyama Y., Aochi T., Higashi K., Yamazaki H. and Daito Y.: JAERI-M 6272, "Studies on Dynamic Behavior of Gaseous Diffusion Plant(1) Square Cascade" (1975)
- 4) Higashi K.: "Uran Noshuku" (Uranium Enrichment), 1st. ed., Nikkan-Kogyo Shinbunshya, Tokyo, (1971) [in Japanese]
- 5) Naruse Y. and Yoshida H.: JAERI-M 7858, "Separation of Gases by Porous Membrane Method" (1978)
- 6) Naruse Y., Yoshida H. et al.: JAERI-M 7822, "Separation of Argon Isotopes by Porous Membrane Method (Part I) Design of Engineering Cascade Facility" (1978)

附表 1. カスケードの運転条件

実 験 番 号	II-1 (750920T1422)					I-1 (750926T1416)					I-2 (750926T1540)				
	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)	0.39														
製品流量 (S.c.c./min)	0														
原料流量 (S.c.c./min)	0														
廃棄流量 (S.c.c./min)	0														
製品抜き段位置	—														
原料流供給段位置	—														
廃棄流抜き段位置	—														
カスケード内流動条件															
供給圧力 (PRC-F) (kg/cm ² A)	0.73	0.81	0.81	0.81	0.81	0.64	0.64	0.64	0.64	0.65	0.64	0.625	0.63	0.645	0.65
" (信号圧) (kg/cm ² G)	0.43	0.71	0.62	0.50	0.56	0.56	0.61	0.625	0.52	0.56	0.49	0.62	0.63	0.52	0.56
第1拡散流圧力 (PR-P) (mmHg)	87.0	91.0	87.0	93.0	81.0	78.0	81.0	77.5	81.0	72.0	78.0	81.0	78.0	81.0	72.0
第2拡散流圧力 (PR-E) (mmHg)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
拡散筒圧力損失 (mmH ₂ O)	—	—	—	2.76	—	—	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00	—
供給流量 (F) 記録計 (SL/min)	4.080	3.804	4.380	4.284	4.248	3.228	3.180	3.420	3.240	3.240	3.372	3.084	3.396	3.204	3.276
指示計 (SL/min)	4.000	3.750	4.000	4.200	4.250	3.250	3.000	3.300	3.400	3.400	3.300	2.900	3.300	3.300	3.500
第1拡散流量 (P) 記録計 (SL/min)	1.760	2.008	2.072	2.080	—	1.544	1.540	1.576	1.620	—	1.560	1.516	1.572	1.640	—
指示計 (SL/min)	1.780	1.950	2.000	2.000	—	1.500	1.450	1.550	1.550	—	1.500	1.480	1.530	1.550	—
未拡散流量 (W) 記録計 (SL/min)	2.200	1.620	1.860	1.940	2.020	1.440	1.520	1.496	1.472	1.540	1.604	1.508	1.460	1.488	1.560
指示計 (SL/min)	1.900	1.600	1.900	1.900	1.900	1.400	1.400	1.480	1.480	1.430	1.500	1.450	1.520	1.470	1.460
第2拡散流量 (E) 記録計 (SL/min)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
指示計 (SL/min)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
供給温度 (TRA-F) (°C)	2.870	2.890	2.880	2.890	2.920	2.610	2.630	2.640	2.640	2.670	2.650	2.670	2.670	2.670	2.70
第1拡散流温度 (TR-P) (°C)	2.810	2.830	2.820	2.820	2.850	2.590	2.610	2.620	2.620	2.630	2.630	2.640	2.650	2.650	2.65
圧縮機運転条件															
回転数 (rpm)	300	300	300	300	300	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
消費電流 (A)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
吸入圧力 (mmHg)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
吐出圧力 (Kg/cm ² G)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
全段の連結運転開始時刻	11:16														
カスケード条件の変更時刻	—														

実験番号	Ⅲ-1 (751022T1555)					Ⅲ-2 (751022T1640)					Ⅲ-1 (751024T1215)				
	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)	0.50														
製品流量 (S·cc/min)	0														
原料流量 (S·cc/min)	0														
廃棄流量 (S·cc/min)	0														
製品抜き段位置	—														
原料流供給段位置	—														
廃棄流抜き段位置	—														
カスケード内流動条件	—														
供給流圧力 (PRC-F) (kg/cm ² A)	1.21	1.24	1.245	1.24	1.24	1.20	1.23	1.235	1.23	1.235	1.39	1.41	1.41	1.41	1.42
" (信号圧) (kg/cm ² G)	0.49	0.64	0.61	0.52	0.58	0.52	0.64	0.59	0.51	0.58	0.46	0.62	0.59	0.52	0.58
第1拡散流圧力 (PR-P) (mmHg)	98.0	100.0	99.5	101.0	84.0	98.0	100.0	98.0	101.0	82.0	109.0	109.2	109.0	110.0	92.5
第2拡散流圧力 (PR-E) (mmHg)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
拡散筒圧力損失 (mmH ₂ O)	—	—	—	97.0	—	—	—	97.0	—	—	—	—	—	11.20	—
供給流量 (F) 記録計 (SL/min)	67.80	65.76	66.24	67.68	68.04	67.80	64.44	66.24	67.56	67.56	82.08	76.44	78.24	79.32	78.72
指示計 (SL/min)	66.00	61.00	66.00	66.00	71.00	65.00	60.00	65.00	65.00	70.00	82.00	71.00	75.00	75.00	83.00
第1拡散流量 (P) 記録計 (SL/min)	31.00	31.20	32.60	33.30	—	30.70	31.10	32.40	33.20	—	36.30	36.40	37.60	38.20	—
指示計 (SL/min)	30.20	30.50	31.50	31.70	—	30.40	30.50	30.70	31.50	—	35.60	35.70	36.00	36.50	—
未拡散流量 (W) 記録計 (SL/min)	32.50	30.50	30.60	30.80	31.30	32.00	29.20	30.30	30.50	31.40	41.50	35.00	35.30	35.60	37.00
指示計 (SL/min)	27.80	29.20	31.70	30.00	30.00	26.00	29.80	30.00	29.50	29.80	41.50	34.20	35.00	34.40	35.20
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)	21.90	22.20	22.10	22.10	22.30	22.10	22.30	22.30	22.30	22.30	18.70	19.10	18.90	19.00	19.20
第1拡散温度 (TR-P) (°C)	21.70	21.80	21.70	21.80	21.90	21.90	21.90	21.90	21.90	21.80	18.40	18.70	18.60	18.70	19.30
圧縮機運転条件	—														
回転数 (rpm)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
消費電流 (A)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
吸入圧力 (mmHg)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
吐出圧力 (kg/cm ² G)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
全段の連結運転開始時刻	15:07														
カスケード条件の変更時刻	11:25														

実験番号	N-2 (751024T1255)					V-1 (751025T1515)					V-2 (751025T1550)				
	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)	0.68														
製品流量 (S·cc/min)	0														
原料流量 (S·cc/min)	0														
廃棄流量 (S·cc/min)	0														
製品抜き段位置	—														
原料供給段位置	—														
廃棄抜き段位置	—														
カスケード内流動条件	—														
供給圧力 (PRC-F) (kg/cm ² A)	1.42	1.40	1.40	1.395	1.405	1.59	1.60	1.60	1.61	1.62	1.59	1.59	1.60	1.61	1.62
〃 (信号圧) (kg/cm ² G)	0.57	0.59	0.59	0.52	0.59	0.52	0.62	0.59	0.52	0.58	0.45	0.62	0.62	0.52	0.58
第1拡散流圧力 (PR-P) (mmHg)	10.80	10.75	10.80	10.90	9.20	11.80	11.90	11.90	12.00	10.24	11.75	11.90	12.00	12.10	10.30
第2拡散流圧力 (PR-E) (mmHg)	—														
拡散筒圧力損失 (mmH ₂ O)	—														
供給流量 (F) 記録計 (SL/min)	7.824	7.704	7.800	7.872	7.908	9.108	8.784	8.784	9.012	9.168	9.156	8.928	8.952	8.964	9.144
指示計 (SL/min)	7.450	7.250	7.550	7.500	8.200	8.900	8.200	8.700	8.800	9.400	8.200	8.250	8.700	8.750	9.500
第1拡散流量 (P) 記録計 (SL/min)	37.00	35.90	37.30	37.00	—	41.80	41.50	42.60	44.10	—	41.20	42.00	42.30	44.00	—
指示計 (SL/min)	36.00	35.20	36.00	36.00	—	41.00	40.70	41.40	42.30	—	40.80	41.00	41.00	42.00	—
未拡散流量 (W) 記録計 (SL/min)	37.30	36.10	35.30	35.20	36.40	43.50	40.50	40.30	41.00	42.40	44.40	41.30	41.80	40.20	42.10
指示計 (SL/min)	35.00	34.50	35.70	34.50	34.50	43.20	38.80	40.00	40.00	40.80	45.20	40.00	40.30	39.50	40.50
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)	19.20	19.70	19.50	19.70	19.90	19.50	20.00	19.70	20.00	20.00	19.70	20.30	20.00	22.00	20.20
第1拡散流温度 (TR-P) (°C)	19.00	19.20	19.20	19.30	20.00	19.20	19.40	19.40	19.50	19.90	19.50	19.70	19.70	19.70	20.30
圧縮機運転条件	—														
回転数 (rpm)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
消費電流 (A)	—	—	—	—	—	15.0	16.7	15.0	15.0	14.5	—	—	—	—	—
吸入圧力 (mmHg)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
吐出圧力 (kg/cm ² G)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
全段の連結運転開始時刻	11:25														
カスケード条件の変更時刻	14:50														

実験番号	M-1 (751029T1230)					M-2 (751029T1319)					M-1 (751030T1555)					M-2 (751030T1642)									
	1	2	3	4	5	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)	0.75																								
製品流量 (S.c.c./min)	0																								
原料流量 (S.c.c./min)	0																								
廃棄流量 (S.c.c./min)	0																								
製品放出し段位置	—																								
原料流供給段位置	—																								
廃棄流抽出し段位置	—																								
カスケード内流動条件	—																								
供給流圧力 (PRC-F) (kg/cm ² A)	1.68	1.73	1.73	1.73	1.73	1.68	1.69	1.69	1.68	1.69	1.69	1.69	1.69	1.68	1.69	1.94	1.945	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94
(信号圧) (kg/cm ² G)	0.54	0.64	0.61	0.53	0.59	0.58	0.62	0.61	0.53	0.59	0.62	0.61	0.61	0.53	0.59	0.54	0.54	0.64	0.64	0.54	0.59	0.59	0.62	0.64	0.53
第1拡散流圧力 (PR-P) (mmHg)	125.5	127.5	127.0	138.0	122.0	124.0	125.0	123.0	136.0	119.0	123.0	137.0	137.0	139.0	140.0	139.0	139.0	139.0	136.0	136.0	136.0	136.0	136.0	137.0	139.0
第2拡散流圧力 (PR-E) (mmHg)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
拡散筒圧力損失 (mmHg)	—	—	—	13.50	—	—	—	—	13.50	—	—	—	—	—	14.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14.80
供給流量 (F) 記録計 (SL/min)	91.80	94.50	97.80	97.50	98.10	95.10	95.40	95.40	93.00	93.30	107.1	110.1	108.0	110.4	111.0	106.5	106.5	107.7	108.0	105.0	106.5	106.5	107.7	108.0	110.7
指示計 (SL/min)	90.00	89.00	92.50	94.00	99.00	90.00	89.00	90.00	93.00	96.00	106.0	104.0	105.0	106.0	109.5	106.0	106.0	102.0	105.0	105.0	106.0	106.0	102.0	105.0	109.0
第1拡散流量 (P) 記録計 (SL/min)	43.70	45.30	46.40	46.80	—	43.50	44.30	45.50	45.50	—	51.70	52.00	52.90	54.10	53.00	51.20	51.20	51.90	52.50	54.00	51.20	51.20	51.90	52.50	54.00
指示計 (SL/min)	43.00	44.00	44.80	44.50	—	43.00	43.00	44.00	43.50	—	50.50	50.10	51.00	51.50	50.10	50.10	50.10	50.00	50.80	51.00	50.10	50.10	50.00	50.80	51.00
未拡散流量 (W) 記録計 (SL/min)	46.40	41.70	42.80	42.50	43.50	43.70	42.20	44.00	43.50	44.50	48.70	50.20	49.80	49.50	51.20	48.20	48.20	49.30	49.50	49.30	48.20	48.20	49.30	49.50	51.00
指示計 (SL/min)	44.00	41.00	44.00	44.00	42.60	44.20	40.50	42.50	43.50	42.00	47.10	48.20	50.10	49.50	49.50	46.50	46.50	48.00	48.80	48.60	46.50	46.50	48.00	48.80	48.80
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)	19.90	20.40	20.20	20.60	20.80	20.50	21.20	21.00	21.20	21.30	19.10	19.70	19.30	19.60	19.60	19.30	19.30	19.90	19.60	19.90	19.30	19.30	19.90	19.60	19.70
第1拡散流温度 (TR-P) (°C)	19.50	20.00	19.90	20.10	20.60	20.00	20.60	20.40	20.50	20.90	19.00	19.00	19.00	19.10	19.20	19.10	19.10	19.30	19.20	19.30	19.10	19.10	19.30	19.20	19.30
圧縮機運転条件	—																								
回転数 (rpm)	445	441	445	446	375	445	441	445	446	375	419	446	449	447	448	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
消費電流 (A)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16.20	17.80	16.90	17.40	16.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
吸入圧力 (mmHg)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
吐出圧力 (kg/cm ² G)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
全段の連結運転開始時刻	11:15																								
カスケード条件の変更時刻	14:45																								

附表 2. 起動時における濃度の経時的変化 *1

実験番号 I

経過時間 *2 (min)	29	44	84	114	144	174	204	236	—	—	—
最上段濃度 x_5' (mol%)	0.3691	0.3711	0.3711	0.3700	0.3711	0.3700	0.3696	0.3704	—	—	—
最下段濃度 x_1'' (mol%)	0.2978	0.2957	0.2948	0.2946	0.2957	0.2951	0.2953	0.2956	—	—	—

実験番号 III

経過時間 *2 (min)	5	13	18	24	30	37	44	73	100	—	—
最上段濃度 x_5' (mol%)	0.3528	0.3673	0.3719	0.3745	0.3767	0.3760	0.3761	0.3763	0.3770	—	—
最下段濃度 x_1'' (mol%)	0.3112	0.2997	0.2962	—	0.2912	0.2894	0.2901	0.2891	0.2892	—	—

実験番号 VII

経過時間 *2 (min)	5	13	23	28	38	48	58	68	75	90	125
最上段濃度 x_5' (mol%)	0.3552	0.3661	0.3705	0.3726	0.3735	0.3737	0.3741	0.3742	0.3741	0.3742	0.3742
最下段濃度 x_1'' (mol%)	0.3076	0.2974	0.2934	0.2921	0.2912	0.2909	0.2910	0.2911	0.2909	0.2913	0.2903

*1 初期ガス中の ^{36}Ar の濃度を 0.3315 mol% に補正。

*2 カスケード起動後の時間

附表3. カスケード内における³⁶Arの濃度分布(実測値)

[単位: mol%]

段番号	II-1 (750920T1420)					I-1 (750926T1432)					
	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	供給濃度	第1拡散濃度	第2拡散濃度
1	0.28445	0.29261	0.27844	—	0.2881	0.2948	0.2813	—	0.2881	0.2948	0.2813
2	0.30017	0.30758	0.29199	—	0.3020	0.3092	0.2947	—	0.3020	0.3092	0.2947
3	0.31533	0.32367	0.30713	—	0.3167	0.3243	0.3087	—	0.3167	0.3243	0.3087
4	0.33219	0.34153	0.32351	—	0.3301	0.3403	0.3241	—	0.3301	0.3403	0.3241
5	0.34938	0.35863	0.34010	—	0.3484	0.3569	0.3407	—	0.3484	0.3569	0.3407

段番号	I-2 (750926T1555)					III-1 (751022T1620)					
	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	供給濃度	第1拡散濃度	第2拡散濃度
1	0.2879	0.2956	0.2816	—	0.2981	0.3053	0.2891	—	0.2981	0.3053	0.2891
2	0.3022	0.3106	0.2951	—	0.3138	0.3032	0.3051	—	0.3138	0.3032	0.3051
3	0.3170	0.3248	0.3091	—	0.3305	0.3393	0.3217	—	0.3305	0.3393	0.3217
4	0.3307	0.3452	0.3243	—	0.3484	0.3575	0.3399	—	0.3484	0.3575	0.3399
5	0.3485	0.3577	0.3407	—	0.3684	0.3763	0.3574	—	0.3684	0.3763	0.3574

段番号	III-2 (751022T1647)					IV-1 (751024T1230)					
	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	供給濃度	第1拡散濃度	第2拡散濃度
1	0.2986	0.3048	0.2892	—	—	0.3060	0.2907	—	—	0.3060	0.2907
2	0.3140	0.3086	0.3053	—	—	0.3225	0.3056	—	—	0.3225	0.3056
3	0.3306	0.3392	0.3220	—	—	0.3392	0.3218	—	—	0.3392	0.3218
4	0.3486	0.3576	0.3395	—	—	0.3568	0.3390	—	—	0.3568	0.3390
5	0.3671	0.3770	0.3575	—	—	0.3760	0.3567	—	—	0.3760	0.3567

[単位: mol%]

段番号	N - 2 (7 5 1 0 2 4 T 1 3 0 5)					V - 1 (7 5 1 0 2 5 T 1 5 2 5)						
	供給流濃度	第1拡散流濃度	未拡散流濃度	第2拡散流濃度	供給流濃度	第1拡散流濃度	未拡散流濃度	第2拡散流濃度	供給流濃度	第1拡散流濃度	未拡散流濃度	第2拡散流濃度
1	—	0.3061	0.2895	—	—	0.3067	0.2916	—	—	0.3067	0.2916	—
2	—	0.3225	0.3056	—	—	0.3224	0.3073	—	—	0.3224	0.3073	—
3	—	0.3394	0.3218	—	—	0.3397	0.3225	—	—	0.3397	0.3225	—
4	—	0.3572	0.3392	—	—	0.3574	0.3396	—	—	0.3574	0.3396	—
5	—	0.3765	—	—	—	0.3760	—	—	—	0.3760	—	—

段番号	V - 2 (7 5 1 0 2 4 T 1 5 5 0)					M - 1 (7 5 1 0 2 9 T 1 2 3 7)						
	供給流濃度	第1拡散流濃度	未拡散流濃度	第2拡散流濃度	供給流濃度	第1拡散流濃度	未拡散流濃度	第2拡散流濃度	供給流濃度	第1拡散流濃度	未拡散流濃度	第2拡散流濃度
1	—	0.3061	0.2914	—	0.3003	0.3080	0.2928	—	0.3003	0.3080	0.2928	—
2	—	0.3227	0.3064	—	0.3125	0.3238	0.3079	—	0.3125	0.3238	0.3079	—
3	—	—	0.3168	—	0.3326	0.3408	0.3240	—	0.3326	0.3408	0.3240	—
4	—	0.3574	0.3398	—	0.3498	0.3584	0.3409	—	0.3498	0.3584	0.3409	—
5	—	0.3764	0.3576	—	0.3677	0.3769	0.3582	—	0.3677	0.3769	0.3582	—

段番号	M - 2 (7 5 1 0 2 9 T 1 3 2 5)					VII - 1 (7 5 1 0 3 0 T 1 6 1 5)						
	供給流濃度	第1拡散流濃度	未拡散流濃度	第2拡散流濃度	供給流濃度	第1拡散流濃度	未拡散流濃度	第2拡散流濃度	供給流濃度	第1拡散流濃度	未拡散流濃度	第2拡散流濃度
1	0.3007	0.3078	0.2927	—	0.2948	0.3060	0.2913	—	0.2948	0.3060	0.2913	—
2	0.3164	0.3240	0.3085	—	0.3134	0.3219	0.3059	—	0.3134	0.3219	0.3059	—
3	0.3331	0.3413	0.3247	—	0.3302	0.3386	0.3219	—	0.3302	0.3386	0.3219	—
4	0.3506	0.3596	—	—	0.3475	0.3560	0.3385	—	0.3475	0.3560	0.3385	—
5	0.3683	0.3779	0.3592	—	0.3649	0.3742	0.3560	—	0.3649	0.3742	0.3560	—

[単位: mol%]

段番号	VII - 2 (7 5 1 0 3 0 T 1 6 3 0)				
	供給流濃度	第1拡散流濃度	未拡散流濃度	第2拡散流濃度	第2拡散流濃度
1	0.2952	0.3058	0.2903	—	—
2	0.3137	0.3215	0.3056	—	—
3	0.3300	0.3385	0.3215	—	—
4	0.3474	0.3559	0.3385	—	—
5	0.3648	0.3742	0.3558	—	—