

昭和51年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書

水素の精製、輸送、貯蔵システム 及び 保安技術に関する研究

(水素の低温貯蔵、精製段階の安全のための
計測制御システムに関する調査研究)

昭和52年3月

NEDO 図書・資料室



010018302-9

日本酸素株式会社



「1) ガスモーターによる水素の安全廃棄試験

2) 低温吸着精製器再生時の排出ガスの挙動調査」

日本酸素株式会社

昭和52年3月 68頁

1) 処理量 $15\text{N m}^3/\text{h}$ の廃棄試験装置を製作し、モデル試験を行うことによって、将来タンクローリー等による液体水素の大量輸送時に必要とされる廃棄装置の設計資料を確立することを目的とした。

2) 低温吸着器の再生工程に於ける酸素の排出挙動を3通りの再生方法について実験により比較検討し、吸着器の再生時に於ける安全性確保に関し検討することを目的とした。

本報告書の内容を公表する際はあらかじめ
工業技術院の許可を受けて下さい。

目 次

I	概 要	1
II	研 究 内 容	4
1.	ま え が き	4
2.	ガスモーターによる水素の安全廃棄試験	5
2.1	試験装置の計画	5
2.2	試験装置の製作	5
2.3	試 験	8
2.3.1	試験の概要	8
2.3.2	窒素ガスによる試験	10
2.3.3	水素ガスによる試験	12
2.4	ま と め	19
3.	低温吸着精製器再生時の排出ガスの挙動調査	23
3.1	ま え が き	23
3.2	実 験	24
3.2.1	実験の方針	24
3.2.2	実験装置	24
3.2.3	実験結果	25
(i)	水素中の酸素の吸着	25
(ii)	吸着器の水素ホールドアップ	25
(iii)	窒素パージによる酸素の排出	26
(iv)	水素パージによる酸素の排出	26
(v)	昇温に伴うガス放出による酸素の排出	27
3.3	ま と め	28
4.	あ と が き	30

I 概 要

本報告書は、昭和51年度通産省工業技術院のサンシャイン計画中の水素エネルギー部門のうち、民間委託業務の一つとして受託した調査研究に関するものである。

本報告書は「水素の精製，輸送，貯蔵システム及び保安技術に関する研究」の一部としての「水素の低温貯蔵，精製段階の安全のための計測制御システムに関する調査研究」であり，3年度目である昭和51年度は，昨年度行った試設計に基づき，具体的な試験等を実施したものである。

1. 昨年度までの経過

初年度である昭和49年度に於ては「低温貯蔵，精製段階の安全のための計測制御システム」に関する文献調査を実施することにより，液の貯蔵，輸送，取扱い及び低温精製等に関する内外技術の現状把握と安全関係事項の抽出を行ない次年度以降に実施予定の本テーマの調査研究遂行のための基礎となる資料を得た。

2年度目である昭和50年度に於ては，将来の水素エネルギー・システムとして保安上必要であり，かつ重要と考えられる次のテーマ 1)，ガスマーターによる廃棄法，2) バーンボンドによる廃棄法，3) 制御用低温弁，を次年度の具体的試験実施項目として選定しモデル試験の実施を前提とする諸検討，試設計を行った。

2. 結果の概要

昭和51年度は，1) ガスマーターによる廃棄法のモデル試験を実施するとともに，2) 低温吸着精製器再生時の排出ガスの挙動を調査する実験を行った。

先ずガスマーターによる水素の安全廃棄試験では，ガスマーターの特性を得る試験，ファンの特性を得る試験等を行った後，廃棄ダクト内の水素濃度分布を調べた。この試験によって，実装置の設計上考慮すべき項目や，解決すべき問題点等が得られた。

次に低温吸着精製器再生時の排出ガスの挙動調査では，原料水素中の不純物として酸素を取り上げた。再生工程として，(a) 窒素パージの場合，(b) 水素パージの場合，(c) 自然放出の場合，を想定した酸素の排出挙動の検討を行った。

この実験によって，再生時の安全性を確保するための基礎資料が得られた。

3. 研究実施担当者

安 藤 道 弘	開発本部	副本部長兼開発管理部長	(統括責任者)
田 代 為 喜	"	第 一 部 部 長	(推進責任者)
高 田 純 一	"	" 部 員	
肥 後 盛 長	"	" "	
斎 須 倉 人	"	" "	
近 藤 弘 一	"	" "	
佐々木 登	"	" "	
石 井 寿 一	"	第 三 部 部 長	(推進責任者)
若 泉 章	"	" 部 員	
里 見 泰 彦	"	開発管理部	"
生 方 健 治	技術本部	技 術 部 部 長	
橋 井 一 雄	"	" 部 員	
加 藤 芳 久	"	" "	

Ⅱ 研 究 内 容

1. ま え が き

将来、エネルギー媒体として水素が取扱われるようになれば、貯蔵、輸送ともに大量処理を必要とすることは当然と考えられる。

我国では、現在の水素利用は小規模のものがほとんどであり、液体水素を取扱った経験も無きに等しい。そのため関連技術の確立も多くは今後の課題として残されているのが実状と言えよう。昨年度の報告書では、この技術確立のために必要な試験項目として3つを選定して、諸検討、試設計を実施した。

今年度はこの中で、貯槽関係の項目としてガスモーターによる廃棄法の試験を実施した。昨年度行った試設計に基き、実用装置の $1/10$ 規模の試験装置を製作して、水素ガスの廃棄試験を実施し、安全廃棄のための基礎資料を得た。

精製関係では、高純度水素の製造のために多く使用されている低温吸着精製器の再生時の排出ガスの挙動を実験によって調査した。対象不純物を酸素として、排出ガスの安全性を設備、操作との関連で調査した。

2. ガスモーターによる水素の安全廃棄試験

2.1 試験装置の計画

昨年度の報告書で、米国において液体水素輸送用の鉄道タンク・カーでは蒸発水素ガスを安全に廃棄するためにガスモーターを用いた廃棄装置が使用されていることを取り上げ、将来我国においても液体水素の大量輸送時代が来れば、輸送用容器での水素ガスの安全廃棄法としてガスモーターによる廃棄法が取り上げられるであろうと述べた。そこで設計対象容器として容量 8,000 ℓ，蒸発率 0.5 %/day，圧力調節範囲 2.3 ~ 2.5 %G の多層真空断熱容器を備えたタンクローリーを考え、この容器での蒸発水素ガスを処理するためのガスモーター式廃棄装置の大きさを計算した。その結果水素ガスの処理量が 150 N $\frac{m^3}{h}$ のガスモーターを備えた廃棄装置とするのが適当であると結論づけられ、稀釈後の水素ガス濃度を 2 % にするため、空気量 7350 N $\frac{m^3}{h}$ のブロワーを備えるべきであるとした。

今年度はタンクローリーで使用される場合の 1/10 規模の廃棄装置を試作し、この装置を用いて水素ガスを廃棄する試験を行うことを計画した。つまり 15 N $\frac{m^3}{h}$ の水素ガス流量のガスモーターを用いてブロワーを回し 735 N $\frac{m^3}{h}$ の空気を供給して、水素ガス濃度 2 % の混合気体を作って廃棄すべく試験装置を計画した。

2.2 試験装置の製作

廃棄装置が実際に使われる場合は、水素ガスは液体水素容器から出る蒸発ガスであるが、試験装置ではこれを水素ガスボンベから供給する事になり、このガスはある圧力でガスモーターを回した後、ガスモーターに直結されたファンによって供給される空気とで混合気体を作り、2 % 程度の水素濃度となって廃棄される。我々が製作した試験装置の系統を図 2.1 によって詳しく説明する。水素ガスは 3 本口の水素ガス送気台に

接続したポンペから供給し PCV 1 によって 9.5 %G に減圧し、バッファタンクとして用いる容量 1 m³ の水素ガスタンクに一時的に貯蔵される。PCV 2 ではこれを更に減圧してガスマーター入口で 3 %G 以下の任意の試験圧力が得られるように調節され、浮子式流量計を通じてガスマーターに送気される。ガスマーター入口には空気圧作動式のピストン弁と手動弁を並列に設け、出口には手動弁及び逆止弁を設ける。逆止弁を出た水素ガスは排気ダクト内に設けた排気ヘッダーの穴から排出され、同様に排気ダクトの中に置かれたガスマーターに直結されたファンによって導入される空気によって拡散混合されて、2 % 程度の水素濃度となって廃棄される。この試験装置ではガスの置換のために、この他に真空ポンプに接続できる真空引口及び窒素ガスを供給するための窒素ガス供給口を設けている。

試験装置の性能は排気ダクト及びその中に納められるガスマーター、ファン、排気ヘッダーによって決定される。ガスマーター及びファンは前の項で述べたように水素ガス流量 15 N^m/h のとき、空気流量 735 N^m/h となる必要がある。又、ガスマーターの入口圧力及び出口圧力は通常それぞれ 2.5 %G 及び大気圧となることも必要であり、これによって仕様は決定される。実装置においては、これらの機器は特別に設計されるべきであるが、本試験装置では主に時間的制約によって、これらの仕様を満足する機器を市販品から選定、調達した。ガスマーターは特別に水素ガス用として市販されているものはないが、空気モーター等は電気モーターの使用不能な場所でのこれの代用品として種々使われており、回転数、馬力等も任意に選べるので、これを水素用ガスマーターとして転用した。この場合作動流体の違いによりガスマーターの回転数、流量が変化する。ガスマーターは容積形膨脹機械に属し、理論ガス動力 L KW、理論ガス消費量 Q m³/min は、それぞれ次の式によって示される。

$$L = 1.634 \times 10^{-6} \times V_0 Z N \left\{ \frac{P_1 K (C + \epsilon_0)}{K - 1} - \frac{P_1}{K - 1} \cdot \frac{(C + \epsilon_0)^K}{(1 + \epsilon_0)^{K-1}} - P_a - \epsilon_0 P_1 \right\}$$

$$Q = V_0 Z N \left(\frac{P_1}{P_a} \right) \left[C + \epsilon_0 \left\{ 1 - \left(\frac{P_a}{P_1} \right)^K \right\} \right] \times 10^{-6}$$

V_0 : 翼室体積 cm^3

Z : 翼室数

N : 毎分回転数 rpm

P_1 : 絶対給気圧力 $\frac{kg}{cm^2}$

P_a : 絶対背圧 $\frac{kg}{cm^2}$

K : 断熱指数

C : 締切率

ϵ_0 : すきま容積率

実際にはこれに効率を考慮して、実ガス動力、実ガス消費量を求める事ができる。ガスマーターの選定では、 C 、 ϵ_0 、 η 等をどのような値にとるかが問題となるので、今回は手持ちの空気モーターを用いて、実測によってガスの変化による回転数及び流量の変化割合を求めた。それによると、 $P_1 = 3.5 \frac{kg}{cm^2}$ abs. のとき窒素及び水素を用いて流量比 $K_Q = 3.78$ を得た。同じく実測によって回転数の比は、窒素及び水素の場合 $K_R = 1.94$ を得た。

これらの流量比、回転数比を考慮して窒素ガスで、入口圧力 $2.5 \frac{kg}{cm^2}$ のとき、流量 $4.76 \frac{N}{h}$ 、回転数 682 rpm の空気モーターを選んだ。これを水素ガスで使用した場合、流量は $4.76 \times 3.78 = 18.0 \frac{N}{h}$ 、回転数は $682 \times 1.94 = 1320$ rpm となる。このようにして選んだガスマーターの構造図を図 2.2 に示す。試験装置では廃棄する混合ガスの濃度を 2% 程度とするのでファンは回転数 1320 rpm で $18 \times 0.02 = 0.36 \frac{N}{h}$ の空気を送れるものが必要となる。我々はこれも市販品で調達することにし、換気扇用の 30 cm ファンを使用した。これはカタログによると回転数 800 rpm で $900 \frac{N}{h}$ の風量をもつものであり、廃棄する混合気体の水素濃度は 2% 以下にできるものと考えた。排気ダクトは内部に

収容するファンの寸法から外径 380 mm の円筒ダクトとした。排気ヘッダーは、これから出る水素ガスとダクト内に導入された空気とが均一に混合されるように水素ガス出口穴の配置を決めた。つまり排気ヘッダーを二条の環状とし、これに穿孔して水素ガス出口穴としたが、この二条環はダクト内の断面積を三等分する位置に配置した。従って内環の直径を 218 mm, 外環の直径を 308 mm とし、これにそれぞれ直径 3 mm の出口穴 12 個を等分布に配置した。排気ダクトは長さ方向に測定部分を 100 mm ずつ五分割し、うち一個を測定ダクトとし、これにダクト内の濃度分布, 風速分布を測定するための測定端を外部から挿入固定できる測定ポート四個を 45° 間隔で設けた。測定端のポート挿入長さ, 測定端を挿入するポート位置及び五分割した排気ダクトを前後に入れ換える事によって, 測定点を長さ方向, 半径方向にそれぞれ自由に換えられる事をねらった。これらを考慮した試験装置の組立図を図 2.3 に示す。

2.3 試 験

2.3.1 試 験 の 概 要

本試験装置では水素ガスを用いて試験を行う前に、予備的に窒素ガスによる試験を計画した。これは安全上の配慮によるもので、先ず窒素ガスによってガスモーター及びファンの特性、流速分布等を得る事によって水素ガスを廃棄する場合の予測を立て、安全廃棄の可能性を確かめる事を目的としたものである。試験はほぼ前年度に計画した内容を実行するものとした。つまり、

- ガスモーター単体の試験 (ガスモーター入口圧力 $\longleftrightarrow$ 窒素ガス流量 $\longleftrightarrow$ ガスモーターの回転数の関係を得る試験)
- 空気ブロワーとしての試験 (ガスモーター入口圧力 $\longleftrightarrow$ 窒素ガス流量 $\longleftrightarrow$ ファンの回転数 $\longleftrightarrow$ 空気流量の関係を得る試験)

を行った。この試験によって水素ガスを用いて試験が安全に行える可能性が得られたので、続いて水素ガスで次の試験を行った。

- ガスモーター単体の試験（ガスモーター入口圧力 $\longleftrightarrow$ 水素ガス流量 $\longleftrightarrow$ ガスモーターの回転数の関係を得る試験）
- 空気ブロワーとしての試験（ガスモーター入口圧力 $\longleftrightarrow$ 水素ガス流量 $\longleftrightarrow$ ファンの回転数 $\longleftrightarrow$ 空気流量の関係を得る試験）
- 最小起動圧力の確認
- 排気ダクト内の水素濃度（分布）の測定

水素濃度（分布）を測定する場合は，ダクトの長さを変えて水素ガス吹出口からの距離の変化による濃度分布の様子を得ることも目的とした。

上記の試験で用いた測定計器類は次のようなものである。

測定項目	計器名	測定原理	メーカー	型番	仕様
流量(N_2, H_2)	ローターメーター	面積流量計	(株)上島製作所	8-1110型	ガラスターバ管式, 最大目盛 $40 N \frac{m^3}{h} H_2$ ($2.5 \frac{kg}{G}, 20^\circ C$)
圧力	圧力計	ブルドン管式			
風速	熱線式風速計	サーミスタ直熱式	新国際電業(株)	SAV-211D	$0 \sim 10 m/s$
水素濃度	ガス分析計	熱電導式	富士電機製造(株)	ZAF	$0 \sim 5\%$, $0 \sim 10\%$, $0 \sim 50\%$ 3レンジ切換
回転数	回転計	光電式	横河電機(株)	Type 2607	

ダクト内の空気流量は熱線式風速計で鉛直及び水平方向の各10点の風速を測定することによって算出した。風速計の検出部は直径8 mmのステンレスパイプ中にサーミスタが挿入されており，検出部が小さいので小部分の風速測定に適している。

ガス分析計では，測定ガスはポンプで測定器へ吸入される構造になっており，約2分の指示遅れがあったので起動時等のガス濃度の変化を追跡するには適さなかった。この為前年度の報告書で計画していた

起動時の水素ガス濃度の測定は断念せざるを得なかった。

2.3.2 窒素ガスによる試験

(a) ガスマーター単体の試験

ガスマーターの入口圧力を $0.5\%G$ から $3.0\%G$ まで変化させ、それぞれの圧力に対して窒素ガスの流量及びガスマーターの回転数を測定した。結果を図 2.4 に示す。同図より窒素ガスの流量とガスマーター回転数は比例関係にあることがわかるが、入口圧力と流量とが正比例しないので入口圧力は回転数とも正比例ではない。図 2.4 の横軸からわかるとおりガスマーターの入口圧力を増加させるとき、ガスマーターを流れる窒素ガスの流量の増加量は次第に小さくなっている。

(b) 空気ブローとしての試験

ガスマーターにファンを取付けて空気ブローとした場合、窒素ガス流量に対するファンの回転数を測定した。図 2.5 に測定ダクト（円筒カバー）を付けない場合の関係を、図 2.6 に測定ダクトを付けた場合の関係を示した。図 2.4 の状態はガスマーターの無負荷の場合であり、図 2.5 ではこれにファンを取付ける事により負荷をける事に相当する。更に図 2.6 ではダクトを取付ける事によって負荷が増す事になる。図 2.5、図 2.6 でガスマーターを流れる窒素ガスの量と回転数とは、 $2.5\%G$ の圧力まではほぼ正比例しているが、 $2.5\%G$ 以上になると流量の増加に比べて回転数の増加が鈍ってくる。そして負荷が増すにつれて（図 2.4 から図 2.6 に移行するにつれて）同一流量に対する回転数の値は小さくなり、その減少幅は図 2.4 と図 2.6 を比較した場合 15% である。一方ガスマーター入口圧力と流量との関係は $0.5 \sim 1.5\%G$ の範囲では、負荷が増すにつれて同圧力での流量は増加するが、 $2.0 \sim 2.5\%G$ を境にして逆に同圧力での流量が低下する現象がみられる。

次にファンの回転数に対するダクト内を流れる空気量を測定した。

これは、ダクト内水平方向及び鉛直方向の各10点の風速を測定して平均風速を求め、これにダクトの断面積を掛けて求めたものである。図2.7にこの結果を示す。この図から水素ガスを用いて試験を行う場合の安全廃棄の可能性を求める事ができる。図2.6より、ガスモーター入口圧力が2.5%Gの場合、水素ガス流量は $5.7 \text{ N}^{\frac{m^3}{h}}$ 、回転数は490rpmであり、2.2試験装置の製作の項で述べたように、これを水素ガスで動かすとすれば、水素ガスの流量は3.78倍、回転数は1.94倍になるはずである。従って流量は $21 \text{ N}^{\frac{m^3}{h}}$ 、回転数は970rpmとなるはずであり、この回転数の場合、図2.7より約 $1000 \text{ N}^{\frac{m^3}{h}}$ の空気量になると思われる。結局ダクトから廃棄される混合気体の水素ガス濃度は約2.1%となり、当初の計画値に近い濃度で水素ガスが廃棄できる目途がついた。ガスモーター入口圧力を2.5%G以外の圧力にしても、図2.6、図2.7を用いて同様の検討を行えば、廃棄混合気体中の水素濃度は2%程度になり、安全廃棄の可能性が得られた。

ガスモーター入口圧力が2.5%Gの場合のダクト内の風速分布を図2.8、図2.9に示す。2.2項に述べたように測定ダクトの測定用ポートは45°間隔に4個あり、これの水平方向ポートをport 1とし、以下時計まわりにそれぞれport 2, 3, 4としたが、このport 1とport 3での風速分布を示したものがそれぞれ図2.8、図2.9である。つまり図2.8は水平方向、図2.9は鉛直方向の風速分布を示しており、ダクトの長さ方向4ヶ所で測定したものである。各位置での10点の測定点は中心から環状にダクトの断面積を5分割したそれぞれの中心円の位置に等しく、ダクトの中心からの距離は内側から119.1mm, 206.5mm, 266.4mm, 315.4mm, 357.6mmである。この測定位置は「JIS B 8330 送風機の試験及び検査方法」にならったものであり、又これによると測定点もport 1及びport 3の計20点でよいとされている。図2.8、図2.9によればファンから遠ざかるにつれて風速が平均化される様子がわかる。特に図2.9によれば測定位置1では排気ヘッ

ダーのリングの集合金物（排気リング下部の二重円の部分）の存在により風速が異常に小さい値を取っており、この影響は測定位置3まで、はっきりと認められる。ファンから380 mm離れた測定位置4では、中心部分を除いてかなりよく風速は平均化されており、中心部分の二点を除けば風速の値の大小の差は port 1, port 3とも 0.6 m/s である。中心部分の二点は位置的にファンの回転軸部分に相当しているので、測定位置をかなりファンから遠ざけない限り、他の点との平均化は難しいものと思われる。この事は試験条件を変えた他の場合についてもいえるが、それらについては個々の説明で述べる。

図 2.10 ではダクトの長さ方向に直角な断面での風速分布を示した。これは図 2.8, 図 2.9 の測定位置 3, ファンから280 mmの位置の断面での風速分布であり, port 1 ~ 4 の各ポートでの40点の測定値をもとにしている。中心付近ではほぼ同心円的に風速が分布しているが外周付近ではまだ完全には平均化されるに至っていない。この図の場合、測定された風速の平均値は 1.9 m/s であり、回転数は515 rpmであった。

以上の試験を通じて、ガスマーターの最小起動圧力を確認したが、この値は常に $0.1 \% \text{ G}$ 程度であり、水素ガスを用いて試験を行う場合でも、最小起動圧力はほぼこの程度であろうと思われ、起動は確実に行えるものと感じられた。

窒素ガスによる試験の結果、水素ガスの廃棄は平均濃度 2% 程度の水素濃度で行え、試験装置は確実に動く事がわかった。同時に風速分布の平均化等問題があったが、窒素ガスによる試験は終了とし、引続いて水素ガスによる試験に移った。

2.3.3 水素ガスによる試験

(a) ガスマーター単体の試験

窒素ガスによる試験と同様、ガスマーターの入口圧力を $0.5 \% \text{ G}$ か

ら 3.0 %G まで変化させて、それぞれの圧力に対する水素ガスの流量及びガスモーターの回転数を測定したが、測定中に配管内のゴミがガスモーターに入り込み、ケーシングとペーンの間に噛み込む事故のため満足なデータを得られなかったのでデータの紹介は省略する。

(b) 空気ブロワーとしての試験

ガスモーターにファンを直結し、排気ダクト内に納めた場合の水素ガス流量に対するファンの回転数を測定した。ガスモーター入口圧力を 0.5 %G から 2.5 %G まで 0.5 %G ずつ変化させて、それぞれの圧力に対する水素ガスの流量及びファンの回転数を測定したものである。結果を図 2.11 に示す。水素ガス流量 $1.5 \text{ N}^{100}/\%$ ぐらいまでは、流量と回転数は正比例の関係にあるが、それ以上の流量では回転数の増加がやや鈍くなって、ガスモーター入口圧力が 2.5 %G では流量 $1.8.6 \text{ N}^{100}/\%$ で、回転数 920 RPM という結果が得られた。これは窒素ガスによる試験で推定した値 $2.1 \text{ N}^{100}/\%$ 、970 RPM と比較すると、流量は $2.4 \text{ N}^{100}/\%$ の減、回転数は 50 RPM の減であるが、10 % 程度の誤差でこのような推定が成立する事を示すものと考えられる。

排気ダクト内の空気量の測定は、窒素ガスによる試験の場合と同様に、熱線式風速計で排気ダクト内の風速を測定し、平均風速に排気ダクトの断面積を掛ける方法で求めた。熱線式風速計の測定原理は簡単に述べると、流体が熱線から取り去る熱量を測定し、これを風速目盛りで指示しているものであるから、空気の流速を目盛った計器で他の流体の流速を測定する場合は何らかの補正を必要とする。今回の試験では約 2 % の水素濃度の空気流の風速を測定するものであるが、空気と水素との物性値、とりわけ熱伝導率の差異によって、空気用計器での読み取り値はそのまま使えず、全ての測定点で補正を行った。熱線式風速計の基本式は King の式と呼ばれるもので次のように表現される。(日刊工業新聞社刊、工業計測技術大系 3、流量 (F)、P176 による)

$$H = k (T - T_0) \ell \left\{ 1 + \sqrt{2\pi \frac{\rho C_p v}{k} d} \right\}$$

H : 熱線から毎秒失われる熱量

k : 気体の熱伝導率

T : 熱線の温度

T₀ : 気体の温度

ℓ : 熱線の長さ

d : 熱線の直径

ρ : 気体の密度

C_p : 気体の定圧比熱

v : 気体の流速

この式から水素濃度 C % での正しい風速値は

$$\sqrt{v'} = a\sqrt{v} - \frac{b}{60}$$

v' : 水素濃度 C % での正しい風速値 m/s

v : 空気用計器で測定される風速値 m/s

a, b : 水素濃度 C % での補正係数

と表わされる。試験で使用した風速計について a, b の値を求めたものが図 2.12 である。a, b は水素濃度 C が変わると変化する値で、C = 2.0 (2 % H₂) の場合、a = 0.85, b = 0.39 であるが、このとき空気用計器で v = 4.0 m/s であったと仮定すれば、v' = 2.9 m/s となる。試験では風速測定と同時に水素濃度も測定し、上記の手順で補正を行った。ガスモーター入口圧力 2.5 %G での風速分布を、port 1 については図 2.13 に、port 3 については図 2.14 に示した。測定位置がファンから遠ざかるにつれて風速は次第に平均化されてくるが、窒素ガスの場合と同じように中心付近の二点は他の測定点に残されている。測定位置 1 では、ファンの直前は大きな値を示しているが

それより内側及び外側では 1.0 m/s 程度の風速である。測定位置がファンから遠ざかると外側は次第に値が大きくなるが、内側の値はほとんど変化しない。従って排気ヘッダーの水素ガス吹出口は風速の値の大きな部分に集中させるか、又は、風速がある程度平均化された位置に排気ヘッダーそのものを移動させるべきと考えられる。これについては次の濃度測定の項で詳述する。port 3 の測定結果、図 2.14 をみると、測定位置 1 の下側部分では、排気ヘッダーのリングの集合金物の影響が出ており、流れが乱されている。流れの中にこのような抵抗となるものを入れるのは避けるべきである事がわかる。

他の圧力、 2.0 、 1.5 、 1.0 kg/G について測定した風速分布を図 2.15 から図 2.20 に示した。それぞれ port 1 及び port 3 について測定したものである。これらの図は測定位置は 3 及び 4 だけとした。先の図 2.13 及び図 2.14 も加えて風速の平均化の様子を調べるため、測定位置 4 について中心付近の二点は除いて最大値と最小値の差をまとめると次のようになる。

ガスモーター入口圧力	port	最大値	最小値	差
kg/G		m/s	m/s	m/s
2.5	1	3.3	2.1	1.2
	3	3.2	2.0	1.2
2.0	1	3.0	2.0	1.0
	3	2.6	2.0	0.6
1.5	1	2.4	1.9	0.5
	3	2.2	1.6	0.6
1.0	1	1.9	1.3	0.6
	3	1.8	1.3	0.5

風速の平均化は、廃棄される混合気体中の水素濃度の平均化との関係で検討されるべきであるが、その意味では次の項にまとめられている。

るように、測定位置 4 の程度の平均化で十分であると考えられる。つまり、最大値及び最小値の差が上記の値を取る位置では濃度は平均化できており、風速の平均化には、それほど神経質になる必要はないようである。

図 2.13 から図 2.20 までの測定位置 3 及び 4 の測定値から平均風速を求め、ファンで送られる空気量を求めたものを図 2.21 に示した。この図からガスマーターの水素ガス流量とファンの空気量は正比例関係にある事がわかり、これは一次式 $y = 50x$ (x : 水素ガス流量, y : 空気量) で表わされている。従ってダクト内で混合された後の水素ガス濃度の平均値は $C = 0.020$ となり、水素濃度 2% の混合気体が形成されるはずである。計算上は水素ガス濃度は当初の計画値に等しくなった。

(c) 排気ダクト内の水素濃度 (分布) の測定

排気ダクト内の水素濃度分布を、ガスマーター入口圧力ごとに、更に測定ポートごとに図 2.22 から図 2.29 にまとめた。ある圧力でガスマーターの回転に使用された水素ガスはガスマーターを出るときはほぼ大気圧となって図に示された Exhaust Ring の出口穴から排出される。出口穴はファンに対向しているので、水素ガスはダクト内の空気流に対向して排出される。これまでの風速測定のデータからわかるように、測定位置 1 では中心から三番目の測定点付近の風速が最も大きいので、この付近での水素ガスの排出量を多くする事は重要であると考えられた。排気ヘッダーの排気リングは前に述べたように、直径 218 mm の内環及び直径 308 mm の外環の二条環より成っており、それぞれに直径 3 mm の出口穴 12 個が等分布に配置されているが、風速分布の影響を考慮して外環の出口穴 6 個を閉じ、合計 18 個の出口穴を持った排気ヘッダーで試験を行った。図 2.22 及び図 2.23 でガスマーター入口圧力 2.5 %G の場合の測定位置 1 及び 2 での水素濃度分布の様子がわかるが、これによると部分的に水素濃度が 4% 以上とな

る測定点も多く見られる。これらの図では風速の小さい中心付近の二点でも4%以上となっており、水素ガスは空気流の流れ方向に風速の大きさだけで拡散されているのではなく、ダクトの半径方向の拡散もかなり大きいと言えよう。図2.22及び図2.23から、各測定位置での20点の測定値から平均値を求めると、測定位置1から4に進むにつれて、3.16%→2.74%→2.72%→2.52%と減少している。このような傾向は入口圧力が2.0%G、1.0%Gの場合にもみられるので試験装置では排気リングに近い所ほど水素濃度が高くなっており、空気の流れと水素の流れとが完全に一致していない事を示しているといえる。図2.23では濃度分布に大きな凹凸があるが、これは排気リングでの水素ガス出口穴の位置に大きく関係している。この凹凸を少なくするためには出口穴の径を更に小さくして、穴の位置を広範囲に分布させる事が重要となるであろう。なお、その場合も先に述べたように、風速の大きい場所には穴の数を多くしてやる事は当然必要であろう。図2.23の測定位置1における濃度の最大値、最小値の差は3.95%であるが、測定位置4まで進むと、この差は1.00%となる。同様に図2.22では測定位置1で2.63%であったものが測定位置4では0.66%となっており、測定位置が300mm進んだだけでも濃度は大きく平均化される。これらの事実より、先に述べた排気リング近くでの濃度を平均化する努力が一層払われれば、ダクトの出口付近での濃度は更に平均化すると思われる。今回の試験では4%以上の水素濃度も測定されており、これを無くするためにも排気リング付近での濃度の平均化に努力するのは重要である。なお今回の試験では排気リングをファンのごく近くに置いたため、吹出穴の位置を決定するのに風速の大小を考慮しなければならなかったのだが、排気リングを風速がある程度平均化された位置に置けば、単に出口穴を広い範囲にわたって等分布に配置すればよく、実装置ではその方が製作は簡単になるであろう。

図 2.24 , 図 2.25 にガスマーター入口圧力が 2.0 %G の場合の濃度を, 図 2.26 , 図 2.27 に 1.5 %G の場合の濃度を, 図 2.28 , 図 2.29 に 1.0 %G の場合の濃度をそれぞれ示した。測定位置 4 での水素濃度の平均化の様子を調べるため, これらをまとめると次のようになる。

ガスマーター入口圧力	port	平均値	最大値	最小値	差
% G		%	%	%	%
2.5	1	2.54	2.98	2.32	0.66
	3	2.51	2.98	1.98	1.00
	1+3	2.52	2.98	1.98	1.00
2.0	1	2.32	2.58	2.10	0.48
	3	2.05	2.28	1.78	0.50
	1+3	2.18	2.58	1.78	0.80
1.5	1	2.10	2.55	1.55	1.00
	3	1.90	2.14	1.69	0.45
	1+3	2.00	2.55	1.55	1.00
1.0	1	1.88	2.32	1.60	0.72
	3	1.67	1.82	1.59	0.23
	1+3	1.77	2.32	1.59	0.73

表より水素濃度の最大値及び最小値の差は 1 % 以内に納まっており, この程度の値ならば濃度は平均化されていると言えよう。水素濃度の平均値をみると, ガスマーター入口圧力が減少すると, この値も減少している。前の項(b)の図 2.21 から求めた廃棄混合気体の水素ガス濃度は 2 % となっており, 実測値はややこれとずれている。この原因は風量を求める基礎データである風速を測定する場合, ダクトの長さ方向の風速だけを測定しなければならないのに, 他の成分の影響が多少出ている事によるのであらうと解釈される。いずれにせよ, 今回の試験装置は 2 % 程度, できれば 2 % 以下の水素濃度で廃棄することを目

的としたのだが、まず初期の目的は達せられたと思われる。

(d) 最小起動圧力の確認

風速及び濃度測定の実験を通じてガスマーターの起動・停止を多数回繰り返した。主として起動・停止はH3で行い、徐々に開・閉した。この時起動・停止とも約0.1%G程度の圧力でなされ、我々の計画した通常の廃棄圧力2.5%Gであればガスマーターの起動は100%確実である。ガスマーターを他の、これより低い圧力での廃棄系に使用する場合でもガスマーター入口圧力が1.0%G以上であれば起動に関して何ら心配はない。又、EV1を使用してガスマーター入口圧力を一気に使用圧力までかけても、1.0%G以上の圧力では確実に起動するので、起動時にガスマーターを強制的に回転させる補助的手段、例えば前年度の報告書で述べているようなガスマーター回転軸への圧縮空気の吹きつけ等は不要である。

2.4 ま と め

今回の試験結果から、実用の廃棄装置製作の場合に考慮すべき問題点がとらえられたので今後の課題としてこれらをまとめてみる。

(a) 水素濃度の分布

排気ダクト内の水素濃度は均一に、しかも規定濃度に収める必要がある。規定濃度の実現は、ガスマーターあるいはファンの、ある回転数を実現させるための水素ガスの流量及びその回転数のときファンによって送られる風量との関係で決められるものであり、これはガスマーターの性能、ファンの性能で決まるものである。実装置でもこれらの流速値だけを満足させる事は簡単であろう。この場合ファンは単に風量を考慮するだけでなく、風速分布が平均化されていなければならず、排気ヘッダーの出口穴の位置と合わせて、水素濃度の均一性に重大な影響を与えるものである。今回の試験装置で使用したファンは回

転軸部分の占める断面積が大きかったため、排気ダクトの中心付近の風速が1 m/s程度しか得られず、その他の点でも風速分布の大小が極端になり過ぎていた。このため、水素濃度を均一化するために排気ヘッダーの出口穴の配置に気を配らなければならず、しかもそうしたにも拘らず測定位置1では水素濃度が大幅に不均一になった。風速の大きい領域に出口穴を多く設けるのは当然であろうが、穴が集中すれば水素濃度が4%以上にもなり危険である。風速の大きさと出口穴の集中度の関係をつかむのはかなり困難であり、むしろファンの風速分布を均一化の方が容易と考えられる。つまり排気ヘッダー付近から水素濃度を均一化するためには、①風速分布がなるべく平均化されたファンを選ぶ、②排気ヘッダーをファンから遠ざけて、風速が均一化された位置で水素が吹出すようにする、③①、②が満足されるならば排気ヘッダーの出口穴はなるべく小さな径とし、多数個設ける、という配慮が必要である。更に今回の試験ではダクト外径は380 mmであったが、ファンの空気量が得られるならば、ダクト径はなるべく小さなものにして水素ガスと空気との混合をスムーズにする必要もある。なお水素ガスの廃棄圧力が変化しても常に一定の水素濃度で廃棄できるためには、ガスマーターの流量と回転数の関係及びファンの回転数と空気量との関係はそれぞれ直線関係となるように設計すべきである。

(b) ガスマーター

今回の試験で使用したガスマーターは、特に水素ガス用として設計されたものではなかったが、実用の装置ではこれまで述べたような条件を満足するものを開発する必要がある。今回使用したガスマーターではシリンダーとペーンの間に異物を噛み込む事故のため、ガスマーターを分解して洗浄しなければならないことがあった。このような事故はシリンダ内面が傷つく事態にも発展し、ガスマーターの性能低下につながるものであるから、入口にフィルターを設けて保護しなけ

ればならない。ガスモーターはこの他にもペーンがスムーズに動かなければ容積効率が低下する事になるので、ロータとペーンの接触面は滑らかに仕上げ、ペーンは供給水素ガス圧力でシリンダ内面に押しつけられるように、半径方内側に切欠きを設けて内側からの押圧を利用する等の工夫が必要である。ガスモーターはギヤ等に金属接触部があるが、なるべく着火源を少なくする意味から、ペーンは不燃性のプラスチック等を用いなければならない。又、こうする事によって重量も軽くなり、ペーンの動きもスムーズになる利点がある。廃棄装置で使われるガスモーターは使用が不連続であるが、少なくとも点検は他の高圧ガス設備同様の周期とした方がよいので長期にわたって満足な性能を出せるよう耐久性も考慮すべきである。

(c) スケールアップの問題

本試験装置は容量 8000 ℓ、蒸発率 0.5 %/day の多層真空断熱方式のタンクローリーの水素ガス廃棄装置の $1/10$ 規模であった。これを実装置にスケールアップする時の問題点として以下が考えられる。

○ ガスモーターの選定

前の(b)項でも述べたが、常に安定した性能をもつ、水素ガス専用のガスモーターの開発が望まれる。

○ 排気ダクトの形状

今回の試験では混合気体の流れは水平方向であったが、このような形状であると排気ダクト出口からの自然風の吹き込みによってダクト内に水素ガスが滞留して、濃度が上がる事もあり危険である。タンクローリーは停止している事もあるので、ダクトの方向と車の進行方向を一致させるだけでは自然風の影響を除くことはできない。従ってダクトの方向は上向きにして自然風の影響を少なくした方がよいと思われる。試験結果でもみられるようにダクトの径はファンの径よりもあまり大きくする事は望ましくなく、むしろ混合状態を

よくするには、なるべく小さくした方がよい。排気ヘッダーは流速が平均化された位置に置いた方がよいので、寸法的に許されるならばファンと排気ヘッダーは少し間隔をおいて配置すべきである。又ダクト内の流れを乱さないため（風速の平均化の抵抗を少なくするため）排気ヘッダーはなるべく細いパイプで製作する注意も必要である。

○ ファンの形状

ダクト内で均一な風速が得られるようにすべきである。このためには、回転軸部の断面積を少なくすることも必要であるが、広がりのある風向きを生み出すファンを採用する事も必要である。

○ 振動の問題

定置式で行った今回の試験と異なり、タンクローリーで使用する場合は耐震性を考慮しなければならない。ガスマーターの起動は走行中も確実になければならず、実装置で使用する場合は予備試験で作動を確認する事も必要であろう。

3. 低温吸着精製器再生時の排出ガスの挙動調査

3.1 ま え が き

低温精製器は、原料水素中の不純物を低温下で吸着除去し、不純物を留めた吸着器は適当な時期に再生を行なう。原料中の不純物の種類や濃度は供給源により様々で、炭化水素、 O_2 、 N_2 、 CO 、 CO_2 、等が含まれている。再生の仕方によっては、不純物濃度が原料中よりも濃い状態で排出されることが起こり得る。 N_2 、 CO_2 等は安全上はさして問題にならないが、可燃性、支燃性物質は危険性を伴うと考えるべきである。今回は、原料水素中の不純物として酸素を取り上げ、低温（ $-196^{\circ}C$ ）吸着器の再生行程における酸素の排出挙動を、次の3つの場合について検討することにした。

(a) 窒素ページの場合。従来、低温吸着器の再生は加熱昇温しつつ窒素ページすることにより行なわれるのが普通で、安全上は一般には危険はないとされている。しかしこの方法においても、吸着蓄積された不純物酸素が原料中の濃度よりも濃い状態で排出され、吸着行程終了時に器内に存在する水素との間に H_2-O_2 混合気が形成される可能性がある。こうした点は必ずしも明確にされているわけではなく、安全性が絶対に保障されるとは言えない面もある。

(b) 水素ページの場合。将来、水素がより大量に使用されるようになれば、精製器の再生に製品水素の一部を使う加熱水素ページ方式が安全上許されれば、経済性の点から検討の対象になり得よう。この方式では、加熱ページ用窒素や、吸着行程に移るため器内から窒素を排除するための真空ポンプが不要になるので、設備・操作ともに簡単になる利点があるからである。

(c) 自然放出の場合。吸着行程が終了したあと、吸着器の温度が上昇し、かつ窒素ページも水素ページも行なわずに、圧力上昇分を自然に放出する場合が想定される（再生の一方式または事故）。自然放

出の時に酸素はどのように排出するかまたは残留するかが問題になる。

3.2 実 験

3.2.1 実験の方針

低温吸着器の再生（切替）は，不純物が破過する少し前に行なうのが普通である。不純物の破過吸着量は，濃度，吸着剤，温度，ガス速度によって異なり，不純物が2種類以上あればそれらの影響もある。こうした点に関してはデータのある場合もあるが，未知なことのほうがむしろ多い。

そこで先ず，不純物酸素濃度が0.1%の場合を想定し，0.1%—99.9% H_2 混合ガス（ボンベ詰）を作り，液体窒素で冷却した吸着器により，この混合ガス中の酸素を除去する実験を行なった。モレキュラーシーブ5A（以下MSと略記）による破過曲線の実測例を図3.1に示す。同図から，飽和吸着量は $67 \text{ cm}^3/g_{MS}$ と計算される。

しかし，図3.1のように小さな吸着器では再生時の酸素追跡が困難なので，容積約30倍（ $4 \phi \times 95 \text{ Hcm}$ ）の大きさの吸着器を使用することにした。この大きさのMS吸着器が酸素の破過に達するには約50 m^3 もの混合ガス（0.1% O_2 ）が必要でしかも長時間かかる。そこで，真空排気した吸着器に一定量の純酸素を供給して低温に冷やすことにより，吸着行程終了時の状態と見做すことにする。

供給する酸素の量は，酸素濃度0.1%に相当させるならば，この吸着器で約50 ℓ である。しかしこのように大量の酸素を水素でページすることは，酸素の挙動がわかっていないうちは危険でやれない。大体酸素濃度が数十 ppm のオーダーに相当する酸素量数 ℓ について，前述した(a)～(c)の場合を念頭において実験をすることにする。

3.2.2 実験装置

実験装置は，真空引きした吸着器に既知量（容量1.1 ℓ の酸素ガス留

めの圧力から)の酸素を封入し、液体窒素で冷却し、液体窒素を抜き取って温度を上げ、水素または窒素で吸着器をパージし、排出ガスの流量と酸素濃度の測定を行なえるように作った。そのために必要な、弁類、圧力計、ガスクロマトグラフ、湿式流量計、真空ポンプ、液体窒素浴槽、ガスボンベ、吸着器加熱用ヒータ、等から構成されている(図3.2参照)。

吸着器の大きさを $4\phi \times 95\text{ Hcm}$ とし、吸着剤としては、活性炭(武田薬品シラサギG, 4~6メッシュ, 0.5 kg充填, AOと略記)と合成ゼオライト(ユニオンカーバイド社モレキュラーシーブ5A, $1/8"$ ペレット, 0.8 kg充填, MSと略記)の2種類を試験した。

液体窒素浴槽は、液体窒素の拔出速度、断熱蓋の取外し、および空気(または加温空気)の吹込みによって、温度上昇を調節できるようになっている。吸着器加熱時の温度は、中心部と周辺部および入口側と出口側による差異、吸着剤とガスの温度の違い等があり、これらは実験装置のデータから実際規模の装置を考察するときに重要な要因ではあるが、このことだけでも精密を期したら際限がなく、器壁外側に貼りつけたC-C熱電対で測るにとどめた。

ガス組成の分析はガスクロマトグラフによった〔分離カラム=モレキュラーシーブ, 検出器=熱伝導度型〕。分析時間は約2分になるように設定したのでほぼ連続分析と同様のデータが得られる。

3.2.3 実験結果

(i) 水素中の酸素の吸着

前述した(3.2.2参照)。実験装置は図3.2と同じである(ただし吸着器だけは別)。水素中に酸素を0.1%含む混合ガスを、液体窒素温度に保った吸着器に連続して流し、出口ガスの酸素濃度の変化を測定した。

(ii) 吸着器の水素ホールドアップ

図2の装置により、 -196°C の吸着器に水素を満し、ある時間を経

て圧力が平衡に達したのち、温度を常温まで戻し、流れ出て来る水素を流量計で測った。吸着量と空間部分に存在する量の合計である。結果を図 3.3 に示す。

(iii) 窒素パージによる酸素の排出

予め真空引きした吸着器に一定量の酸素を封入し、液体窒素で冷却する。次に液体窒素を抜き、大気中（約 10°C ）に放置して自然に温度が上るのに任せつつ、窒素でパージしたときの排出ガス中の酸素濃度の変化の一例を図 3.4, 図 3.5 に示す。活性炭とモレキュラーシーブで、窒素パージ速度の違い例を示したが、同一吸着剤でパージ速度が異なる場合でもいずれも、最初に高濃度で酸素が出て、次第に減少し、温度が大体 $-40^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ になる頃に全部出終わっている。

この実験の場合は水素を含んでいないが、実際操作では次のようになると考えられる。吸着行程終了時には、不純物酸素の他に水素自身が大量に吸着されており、吸着器空間部分にも存在し、その量は図 3.3 からわかるようにこの実験装置（活性炭）で約 100 l である。吸着の強さは $\text{H}_2 < \text{O}_2 < \text{N}_2$ の順序であり、 N_2 による N_2 , O_2 の追い出しは置換脱着が寄与しているから、 N_2 により N_2 , O_2 が追い出され、 O_2 は H_2 を追い出す関係である。したがって初めは H_2 が出て来て、 O_2 が出口付近に押されて来る頃 $\text{O}_2 - \text{O}_2$ 混合ガスとして排出される。 H_2 は急速に排除され、 O_2 はそれよりはゆっくりと図 3.4, 図 3.5 のように出て来る。すなわち、濃度変化のパターンは図 3.6 のようになるであろう。

(iv) 水素パージによる酸素の排出

窒素の代りに水素でパージする他は前項と同じ操作で、先ず真空引きした吸着器に一定量の酸素を添加し、液体窒素で冷やす。しばらくしたあと、液体窒素を抜き、大気中に吸着器を放置し、温度の上昇と同時に水素でパージし、排出ガス中の酸素濃度を測る。測定例を図 3.7 図 3.8 に示す。窒素パージの場合との著るしい相違点は、酸素濃度に

ピークができることである。温度の上昇とともに酸素濃度は漸増し、 -60°C 付近から急増し、 $-50 \sim -40^{\circ}\text{C}$ でピークに達し、次いで急減し、 $-30 \sim -20^{\circ}\text{C}$ で全部排出し尽される。

酸素量、水素パージ速度をいろいろ変えた場合にも同じパターンのデータが得られる。図3.9（活性炭）と図3.10（モレキュラーシープ）は温度に対して酸素濃度を目盛ったもので、一定の温度範囲で酸素の大部分が排出され、活性炭では -40°C 付近、モレキュラーシープでは -45°C 付近にピークが集中していることがわかる。

ピークの酸素濃度と水素パージ速度の関係を整理したのが図3.11である。添加酸素量が少ない程ピーク時の酸素濃度が低く、水素パージ速度が速ければ薄められて出て来て、それらの条件によって酸素濃度が爆発範囲に入ることがある。同一の酸素量とパージ速度について比べると、ピーク濃度がモレキュラーシープより活性炭の方が高くなっているのは、各々の吸着剤の特徴をあらわしている。

実際操作の場合（吸着終了時に低温で水素が器内に充填している）にも同じ傾向になる。酸素添加、冷却に続き、さらに低温下で水素を追加充填（約1 ata）したあと、昇温水素パージしたときの結果を図3.12に示す。

温度上昇を遅くした場合の例を図3.13に示す。酸素の脱着は一定の温度域に集中しているので、この温度域をゆっくり通過すれば酸素は薄められて出て来る。（図3.11のピーク濃度と比較）。

(V) 昇温に伴うガス放出による酸素の排出

真空引きした吸着器に一定量の酸素を添加し、液体窒素で -196°C に冷却する。冷却した状態で水素を追加充填する（約1 ata）。次に液体窒素をゆっくりと抜き取り、かつ断熱蓋や浴槽内への空気吹き込みにより温度上昇速度を加減しながら、圧力上昇して来るガスを放出し酸素濃度を分析する。図3.14（活性炭）図3.15（モレキュラーシープ）に示すように、常温近くになると酸素濃度は高くなるが、それ

までに放出される酸素の量は僅かであり、大部分の酸素は未だ器内に残っている。モレキュラーシーブの場合 0°C では吸着器内に約 $2\text{ l/kg} \times 0.8\text{ kg} = 1.6\text{ l}$ の水素があり（図 3.3 参照）、酸素は加えたほぼ全量が残っているから、 $\text{H}_2 : \text{O}_2 \rightleftharpoons 1.6\text{ l} : 1.8\text{ l} \rightleftharpoons 47\% : 53\%$ の比率になっていることになる。

0°C 近くになったあと続いてこれを水素バージすると、酸素は急速に高濃度で排出される。

3.3 ま と め

低温吸着精製器内に蓄積された酸素を、昇温しながら水素（窒素）バージしたときの酸素の排出状態を調べた。この結果は上述したように、

- 1) 窒素でバージすると初めに濃い酸素が排出され、吸着終了時にある器内の水素との間に爆発範囲の $\text{H}_2 - \text{O}_2$ 混合気を形成する可能性がある
- 2) 水素でバージすると、ある温度範囲になったときに酸素濃度のピークがあり、酸素量、バージ速度、昇温速度の関係で、爆発範囲の $\text{H}_2 - \text{O}_2$ 混合気となる
- 3) 昇温に伴う圧力上昇分を放出（大部分が水素）すると、最後に高濃度の $\text{H}_2 - \text{O}_2$ 混合気が器内に形成されること

等が明らかになった

前記実験で酸素の量は、濃度数十 ppm のオーダーに大体相当するが、その場合でも排出酸素の濃度が爆発下限 4 % を越えている例が多い。より高濃度の酸素を含む水素を精製すれば、より高濃度の $\text{H}_2 - \text{O}_2$ 混合ガスが形成されることは明白であり、危険性も増大する。

再生行程において、均一速度で酸素が出て来るとしても、処理水素より少量のガスでバージすれば、酸素濃度が高くなるのは当然であり、しかもその上に酸素はある区間に集中して出て来るので一段と酸素濃度は上がることになる。このこと自体は避けがたいことであるが、その区間

は時間をかけ大量のガスでバージして濃度を下げるのが望ましい。

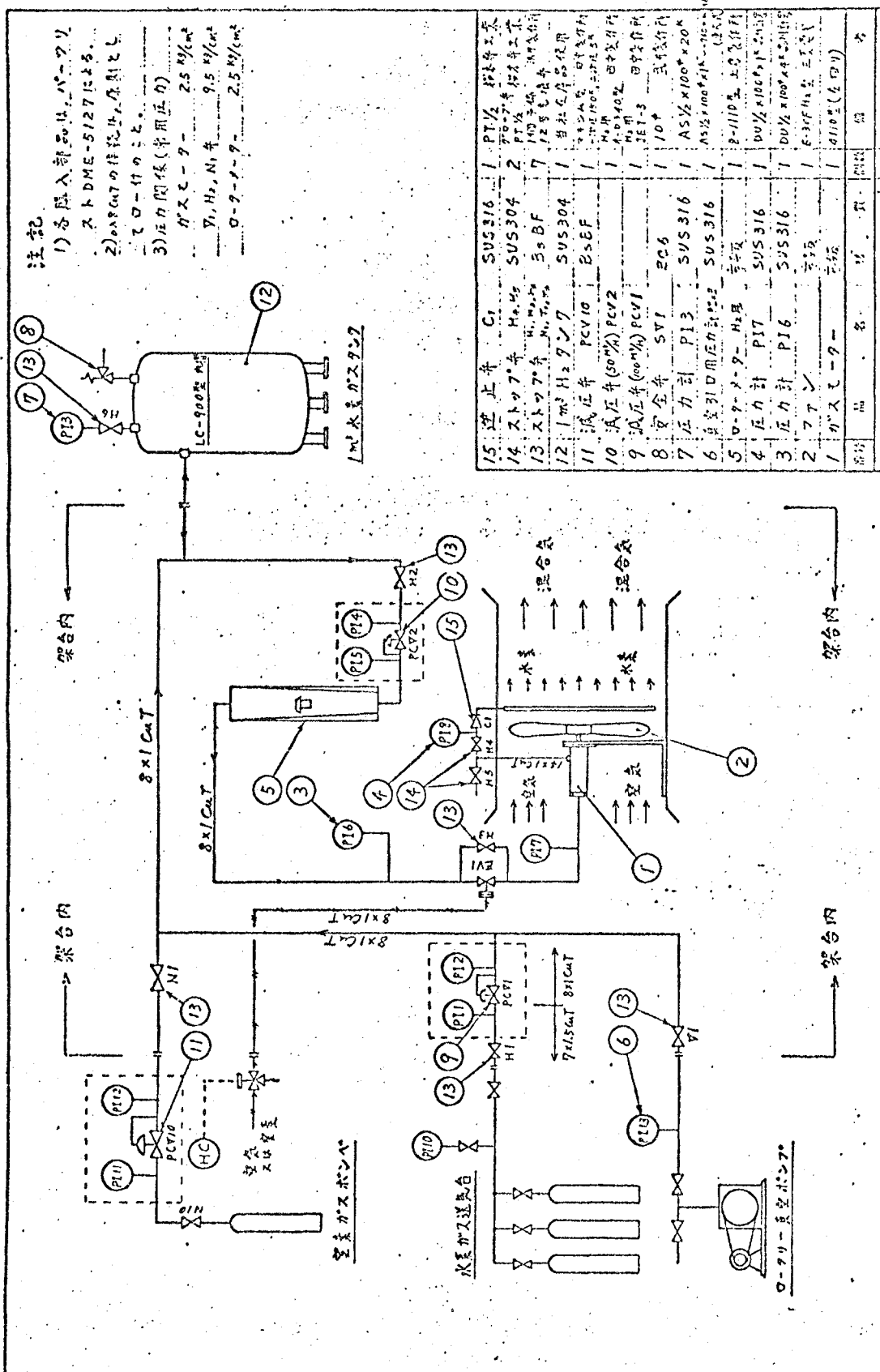
窒素バージ方式では、特に再生開始後の早い期間に大量の窒素でバージするのが良い。水素バージ方式では一定の温度区域に酸素が集中するので、この区間をゆっくり大量にバージするようにする。この区間だけ窒素バージに切替えることも考えられる。しかし、既述の窒素バージ方式の場合と同様の危険は伴うし、続いて窒素を排除するために真空ポンプ、水素バージが必要となり、結局は水素バージ方式の特徴は失われてしまう。自然放出方式は、 O_2-H_2 混合組成に関して望ましくない。

吸着器内または排出ガスに爆発範囲の H_2-O_2 混合組成が形成されても、即時に爆発が起きるわけではない。しかし何らかの着火源（バルブの動作、錆、切屑、帯電、等）が存在すれば、爆発の危険性はあるわけである。実装置で、 H_2-O_2 を爆発範囲にさせないための具体措置、複数不純物の相互影響、着火源の排除など、安全性確保に重要な課題はなお多いが、今回の実験はその解決のための基礎資料として意義が大きいと考える。

4. あ と が き

過去 2 年間の報告書で述べたように，宇宙開発上の要請から，大量の液体水素を取扱っている米ソなど一部先進国に比べると，我国のこの方面の保安技術は大幅に遅れている。将来の水素エネルギー時代では，より信頼性の高い技術が必要とされ，我国においても大量（液体）水素の取り扱いに関する保安技術の確立が急がねばならないだろう。

今年度は，これらの技術確立のための一部として，二つのテーマについて試験を行い，基礎資料を得ることができたが，まだ未開発の項目が多く残されている。今後とも必要技術の修得に努めながら，この方面の保安技術を確立していくことは重要と思われる。



- 注記
- 1) 各器入部品は、パナソニック DME-5127 による。
 - 2) oncut の規格は、原則としてロータリー。
 - 3) 圧力関係(常用圧力)
- | | | |
|------------|-----|-----------|
| ガス | 圧力 | 単位 |
| H_2, N_2 | 2.5 | Kg/cm^2 |
| O_2 | 9.5 | Kg/cm^2 |
| O_2 | 2.5 | Kg/cm^2 |

15	逆止弁	C1	SUS316	1	PT 1/2	標準工事
14	ストッパ弁	H ₂ 4	SUS304	2	PT 1/2	標準工事
13	ストッパ弁	H ₂ 5	SUS304	7	PT 1/2	標準工事
12	1m ³ H ₂ 97	PCV10	BSF	1	12号	標準工事
11	減圧弁	PCV10	BSF	1	12号	標準工事
10	減圧弁(50%)	PCV2		1	12号	標準工事
9	減圧弁(50%)	PCV1		1	12号	標準工事
8	安全弁	SV1	206	1	10号	標準工事
7	圧力計	P13	SUS316	1	AS 1/2	標準工事
6	真空計	PI13	SUS316	1	AS 1/2	標準工事
5	圧力計	P17	SUS316	1	AS 1/2	標準工事
4	圧力計	P16	SUS316	1	AS 1/2	標準工事
3	圧力計	P15	SUS316	1	AS 1/2	標準工事
2	圧力計	P14	SUS316	1	AS 1/2	標準工事
1	圧力計	P13	SUS316	1	AS 1/2	標準工事

図 2.1 ガスモーター式水素ガス廃棄試験装置系統図

STANDARD PNEUMATIC Model 4310

寸 法 約 $\phi 30\text{mm} \times \ell 160\text{mm}$

重 さ 約 500 g

ガス使用量(空気の場合) 12.2 % at 6.3 %

回 転 数 1.050 rpm

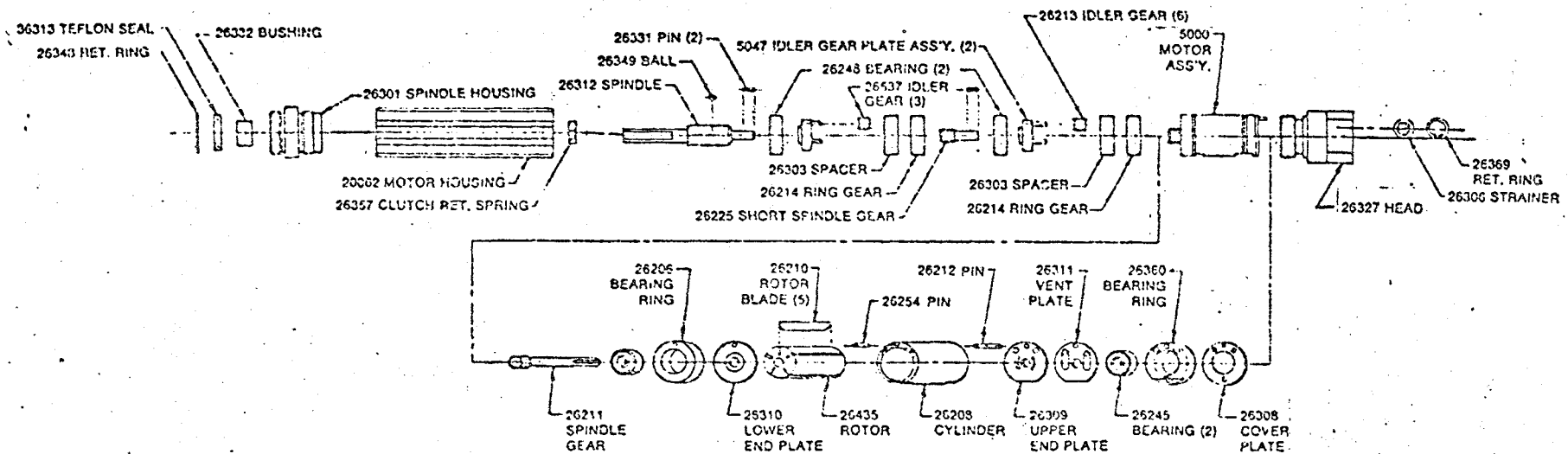
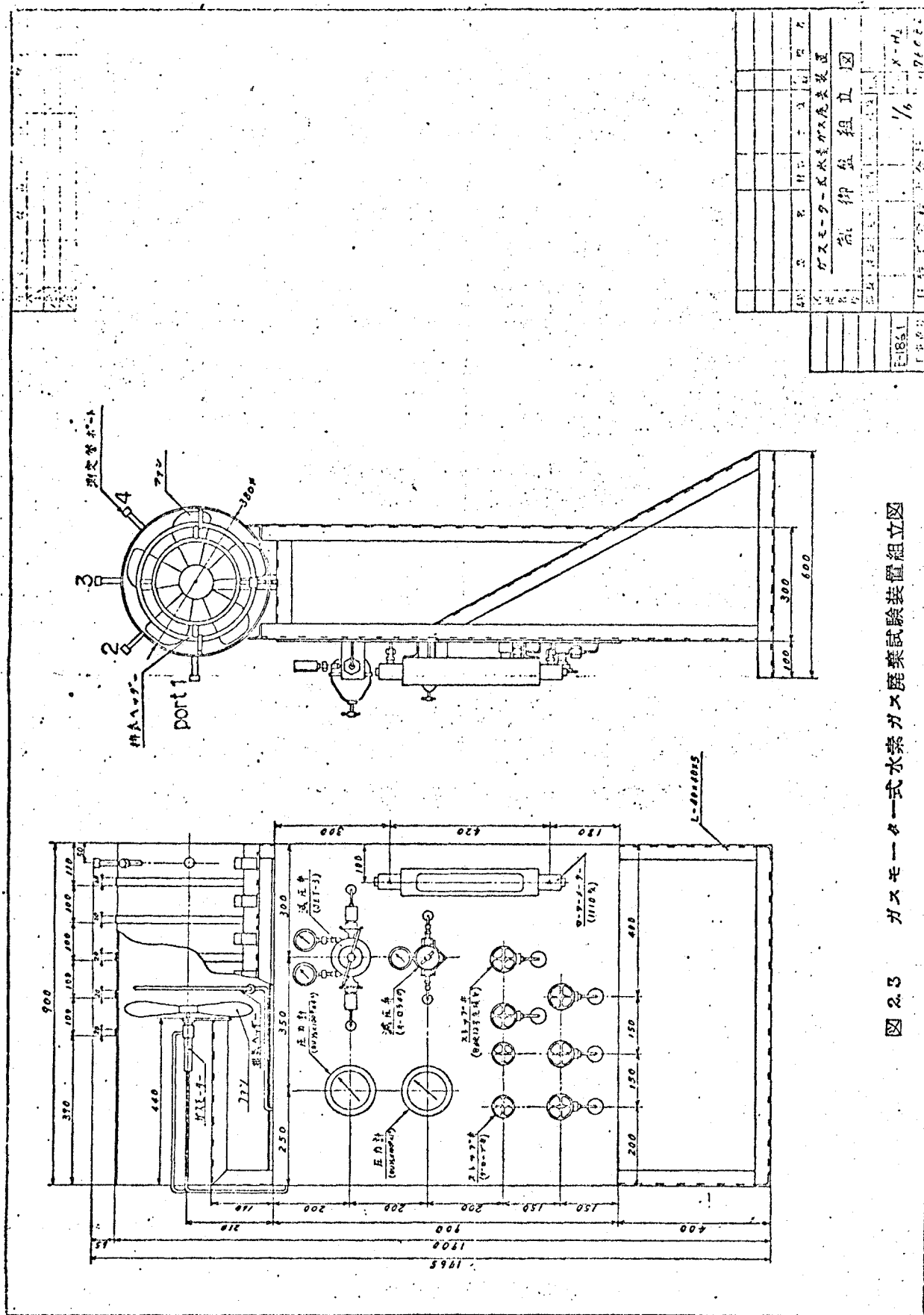


図 2.2 ガスモーター構造図



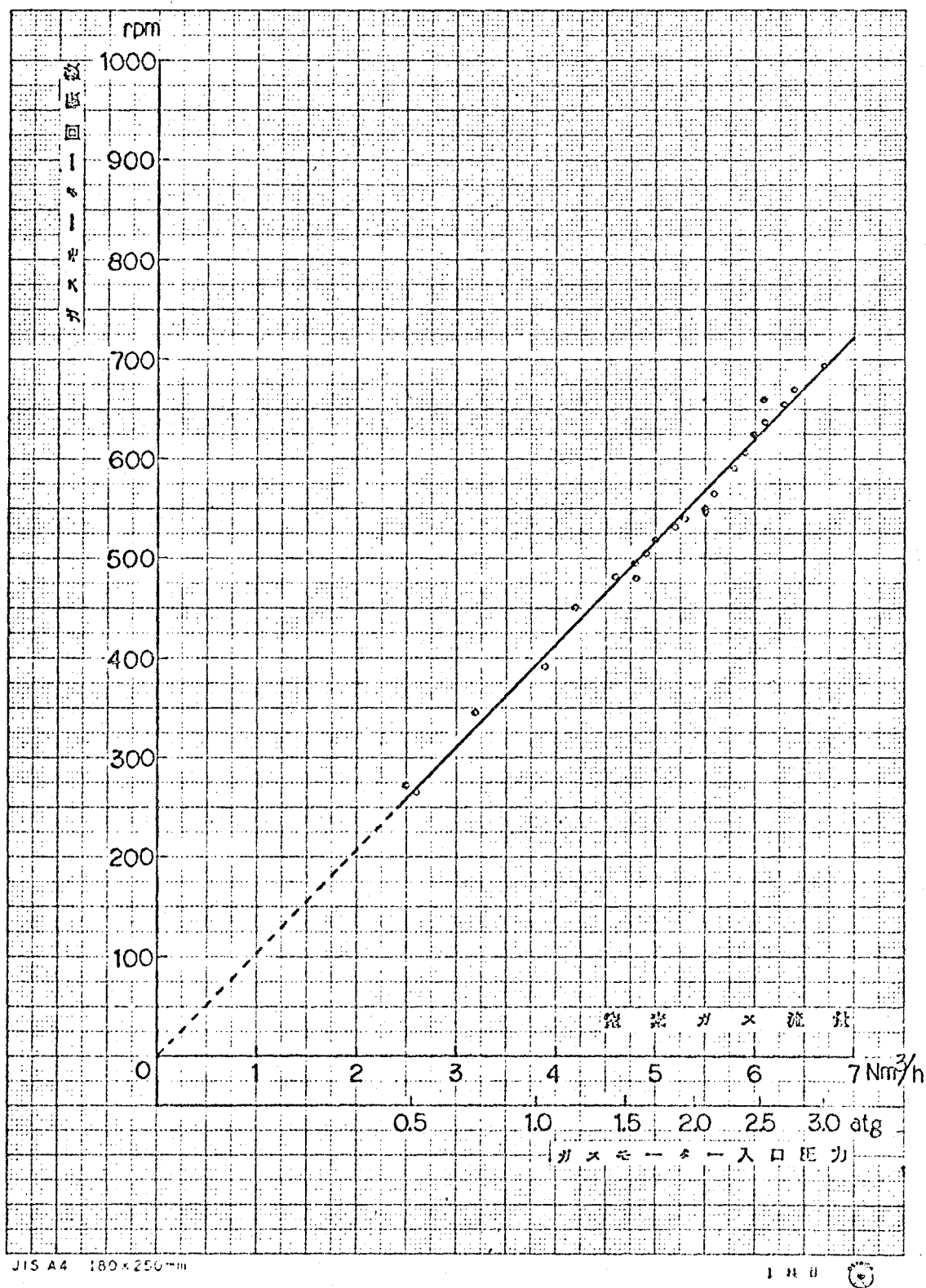


図 2.4 ガスモーターの回転数と流量の関係（窒素の場合）

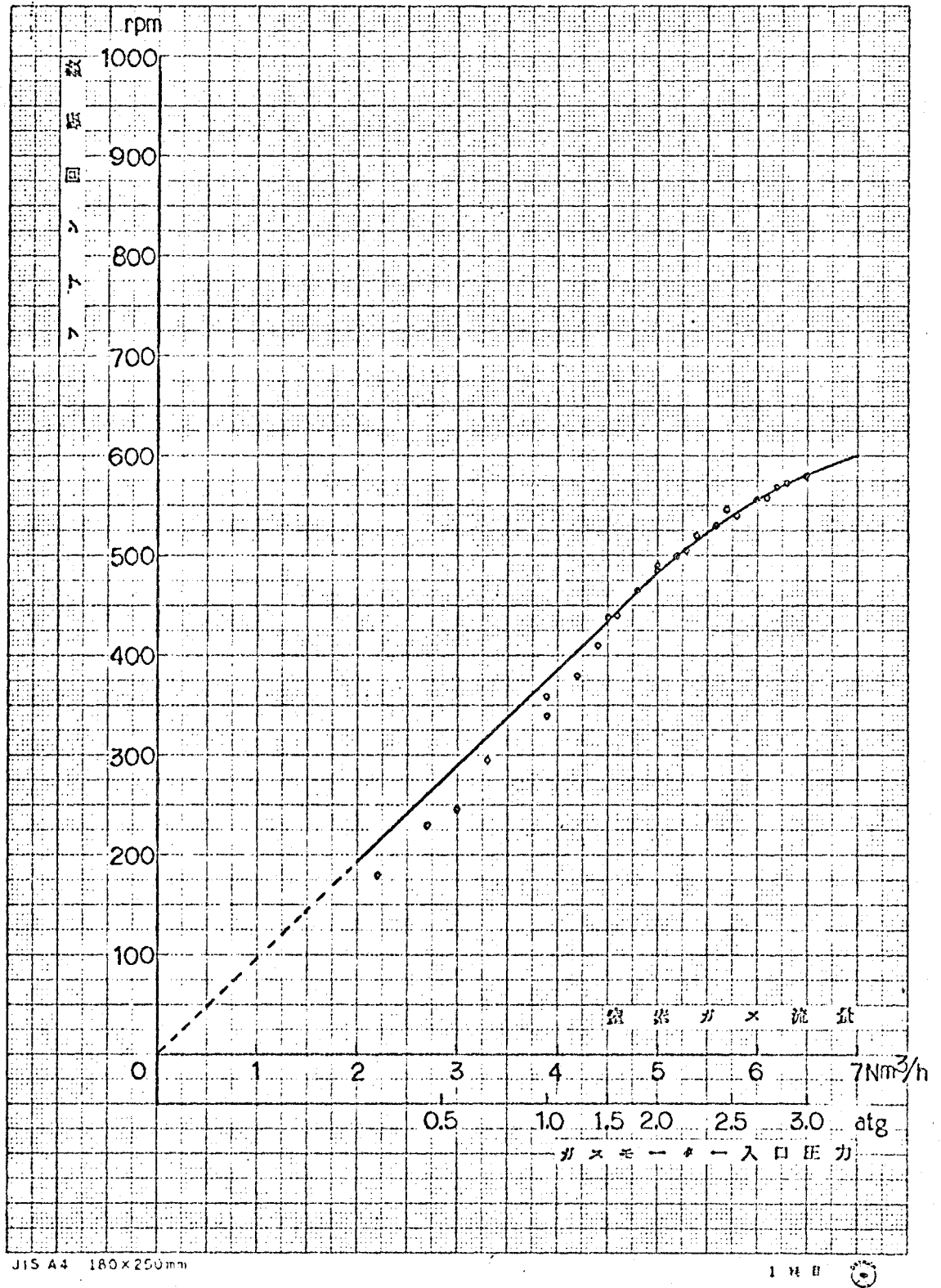


図 2.5 ファンの回転数と流量の関係（窒素の場合、ダクトなし）

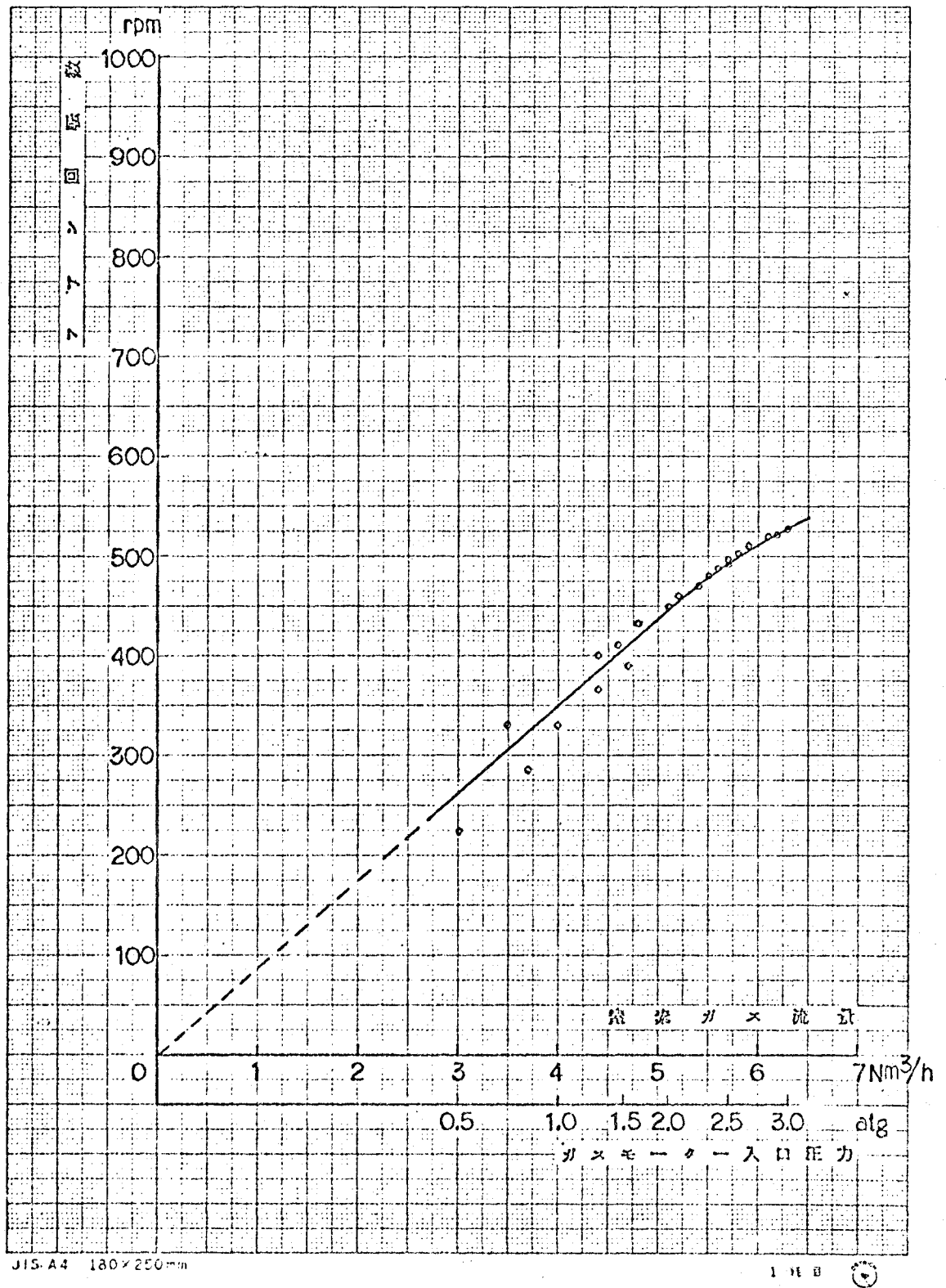


図 2.6 ファンの回転数と流量の関係（窒素の場合、ダクトつき）

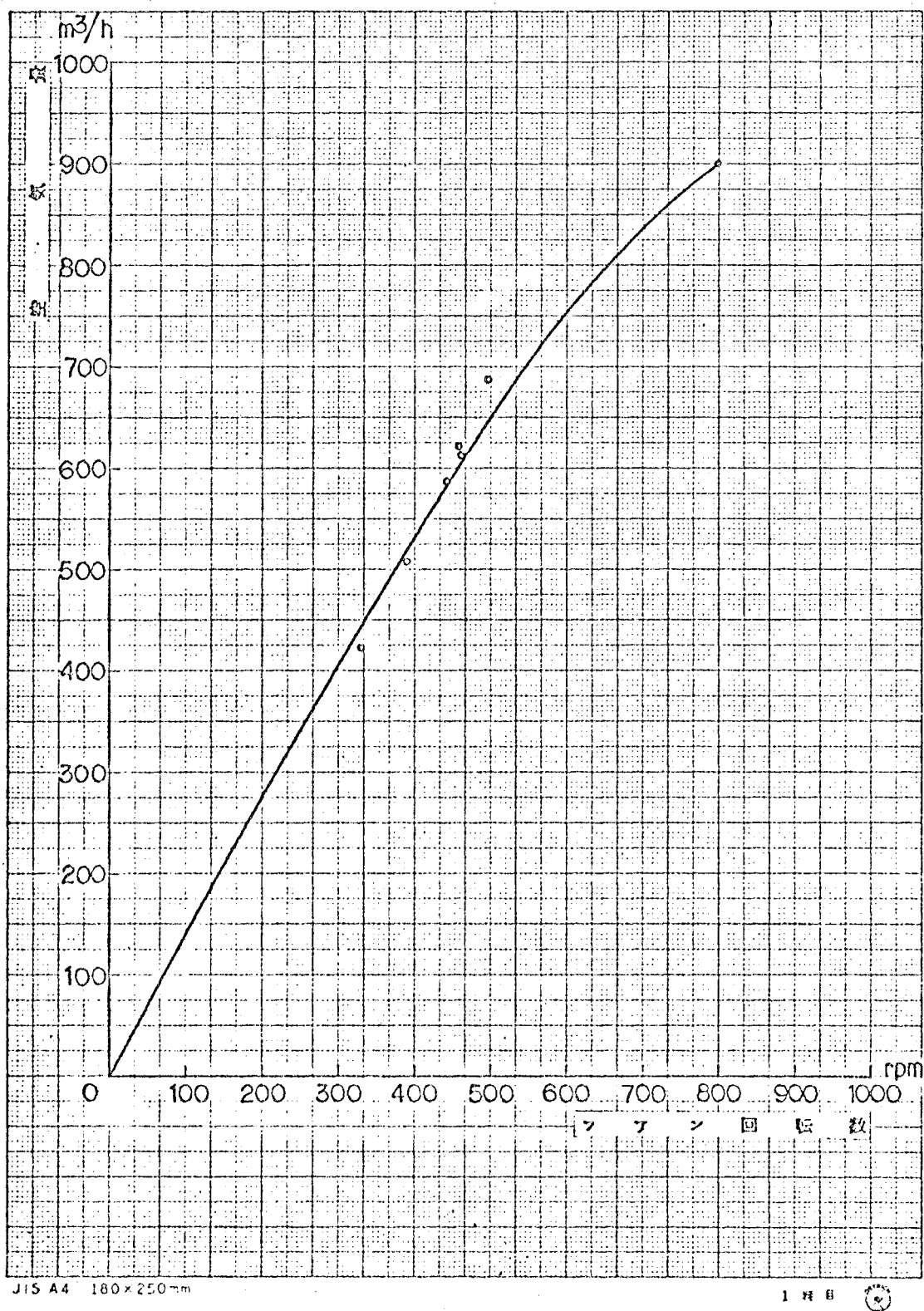


図 2.7 ファンの回転数と空気量の関係（窒素の場合）

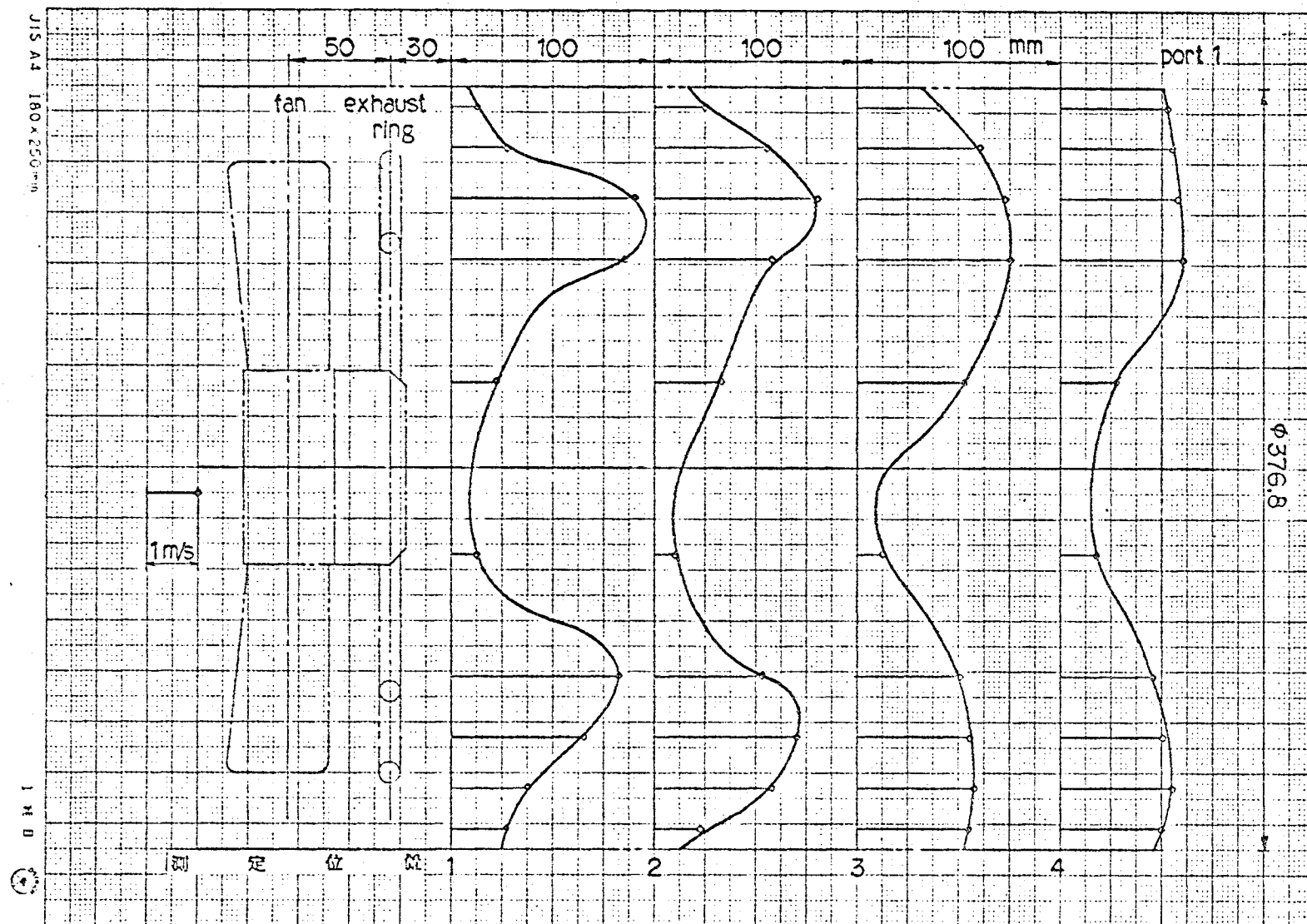


図 2.8 望索駆動時の風速分布 (25 atg, port 1)

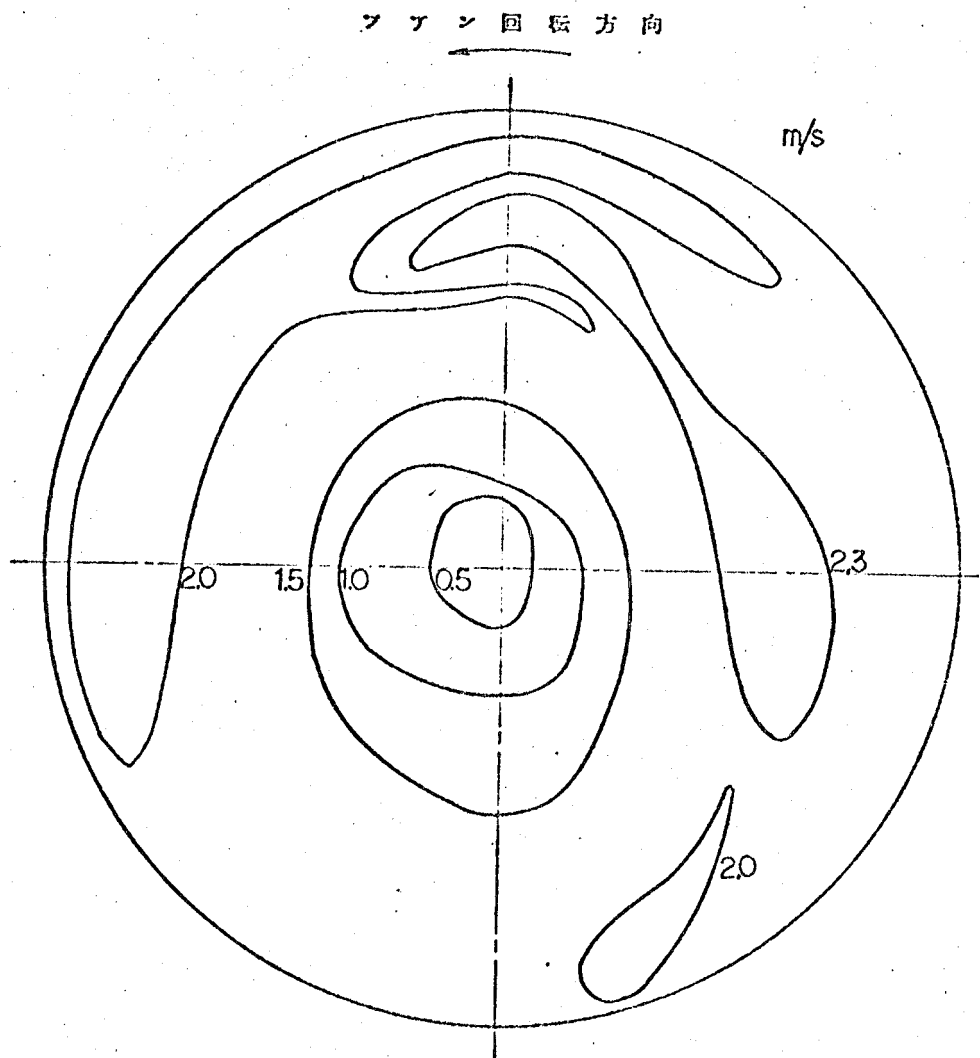


図 2.10 窒素駆動時の風速分布 (2.5 atg, 測定位置 3)

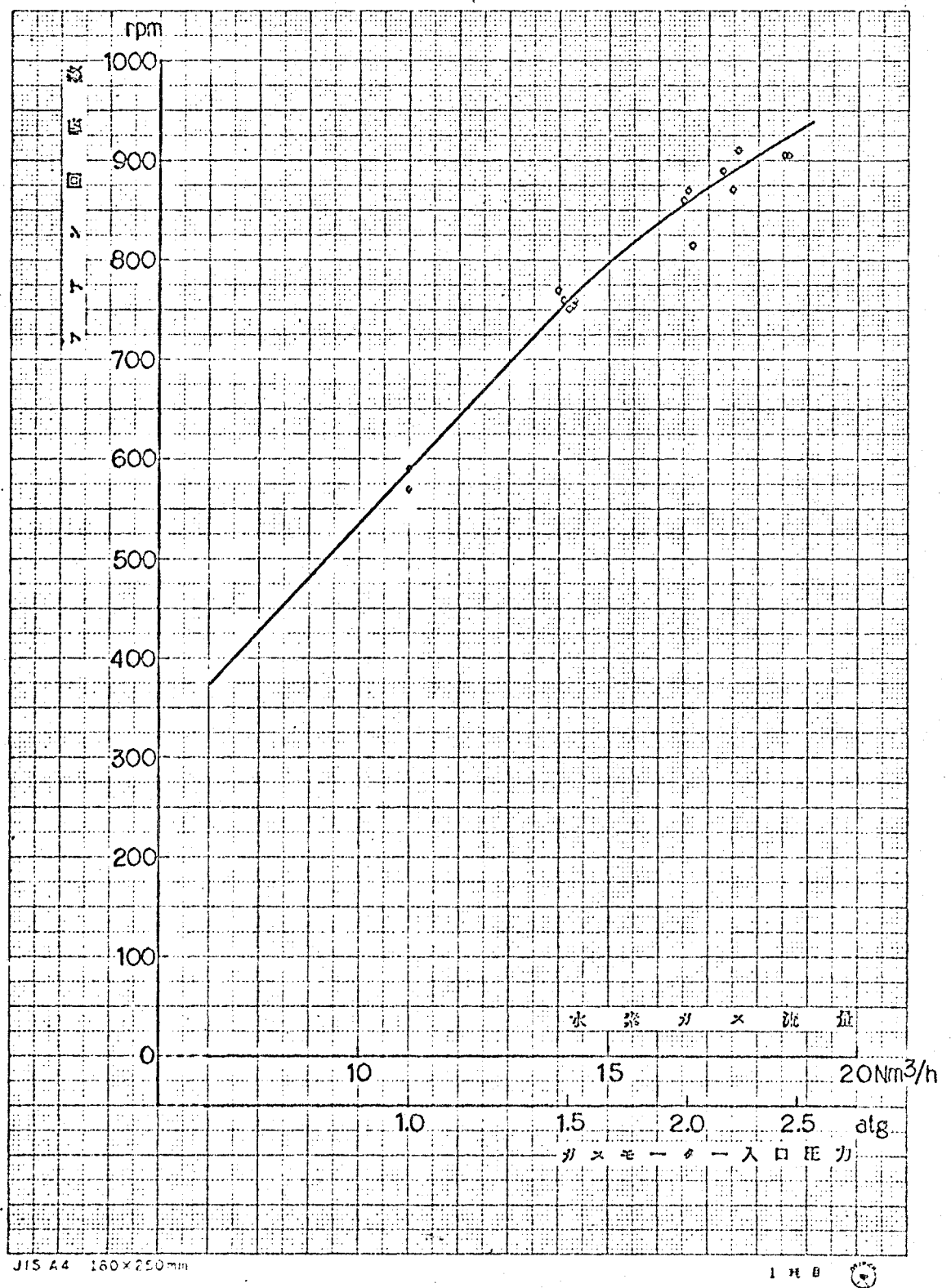
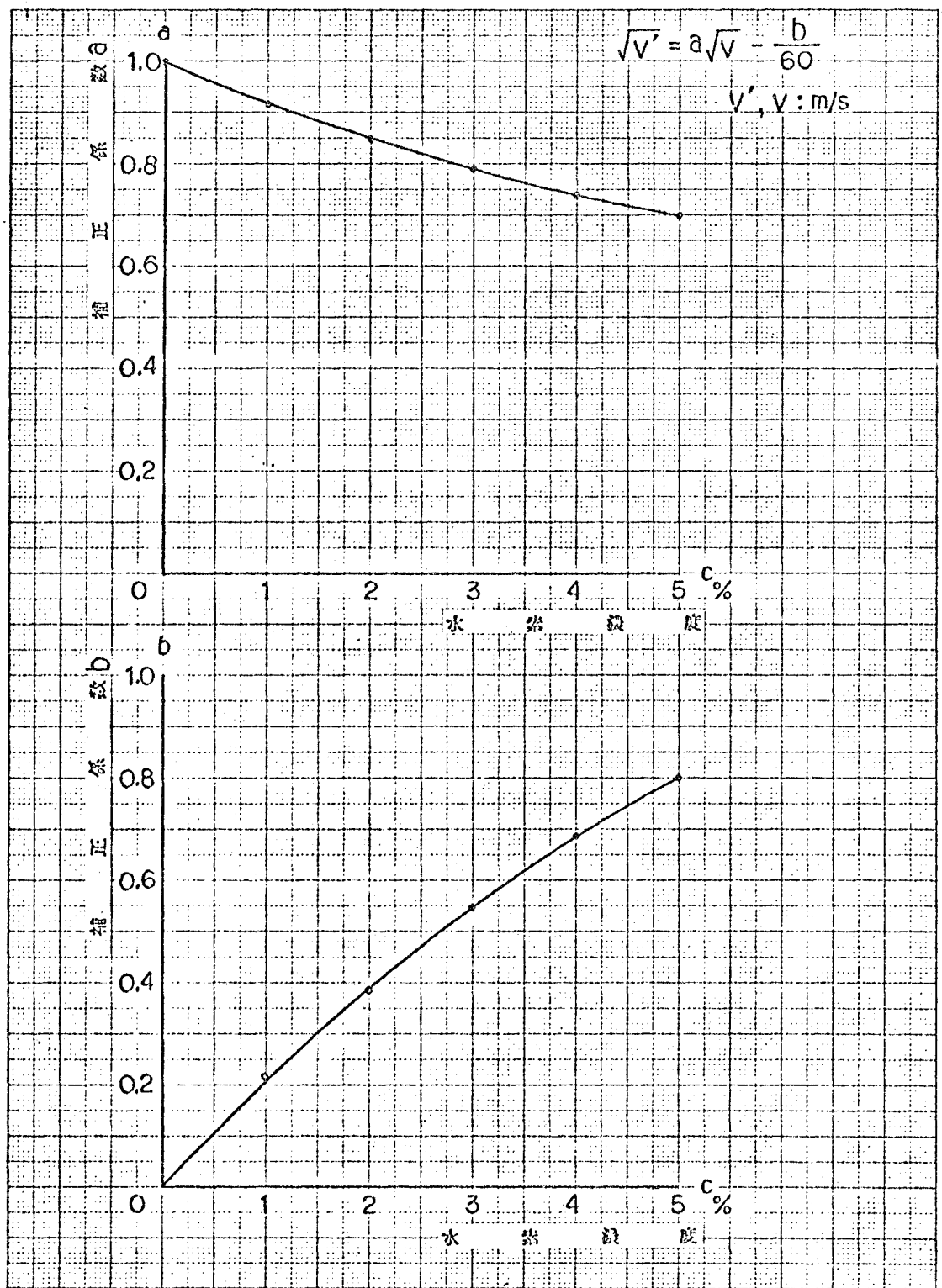


図 2.11 ファンの回転数と流量の関係（水素の場合、ダクトつき）



JIS A4 180×270mm

1 月 日

図 2.12 混合気流の風速補正係数

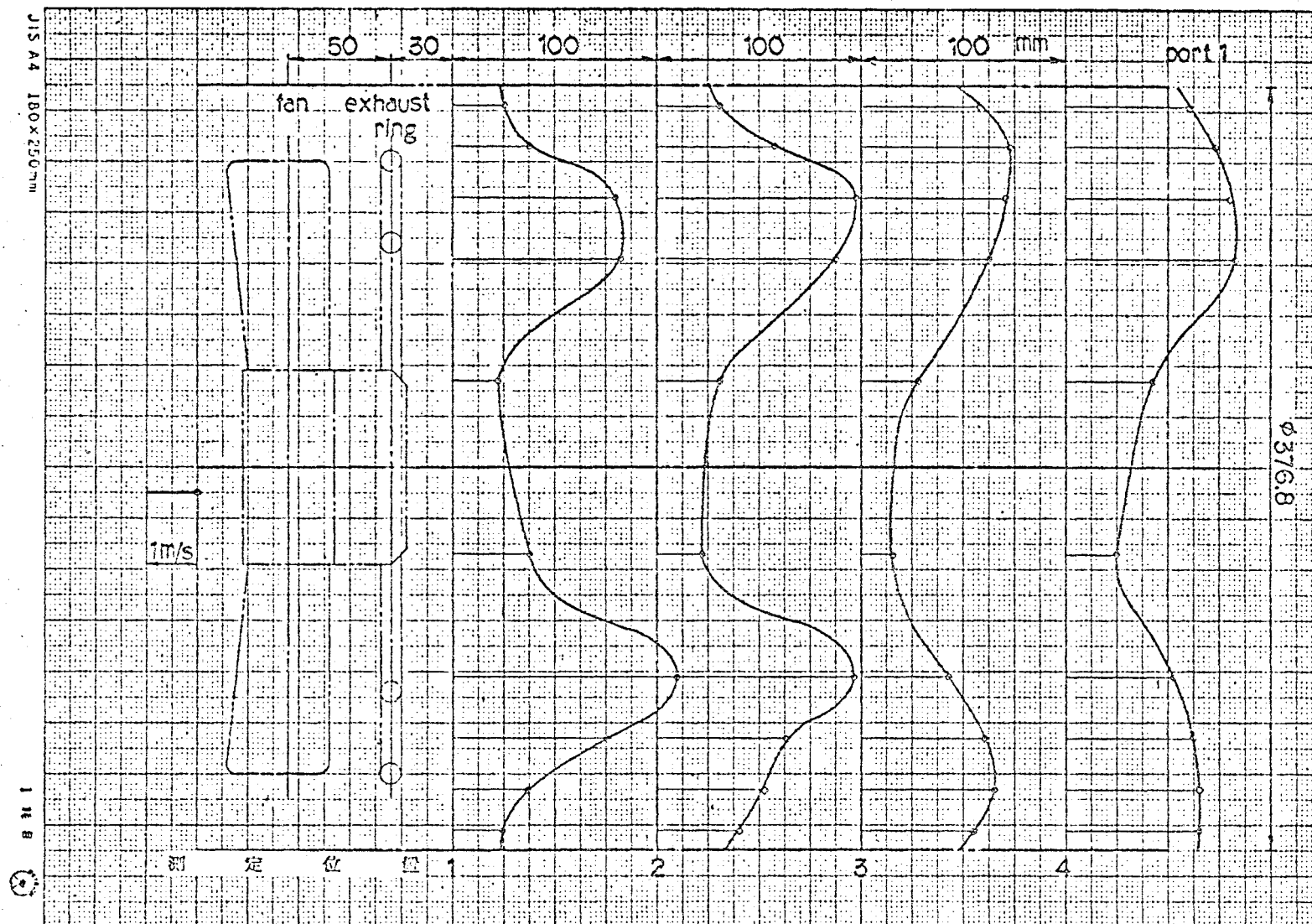


図 2.13 水素駆動時の風速分布 (25 atg . port 1)

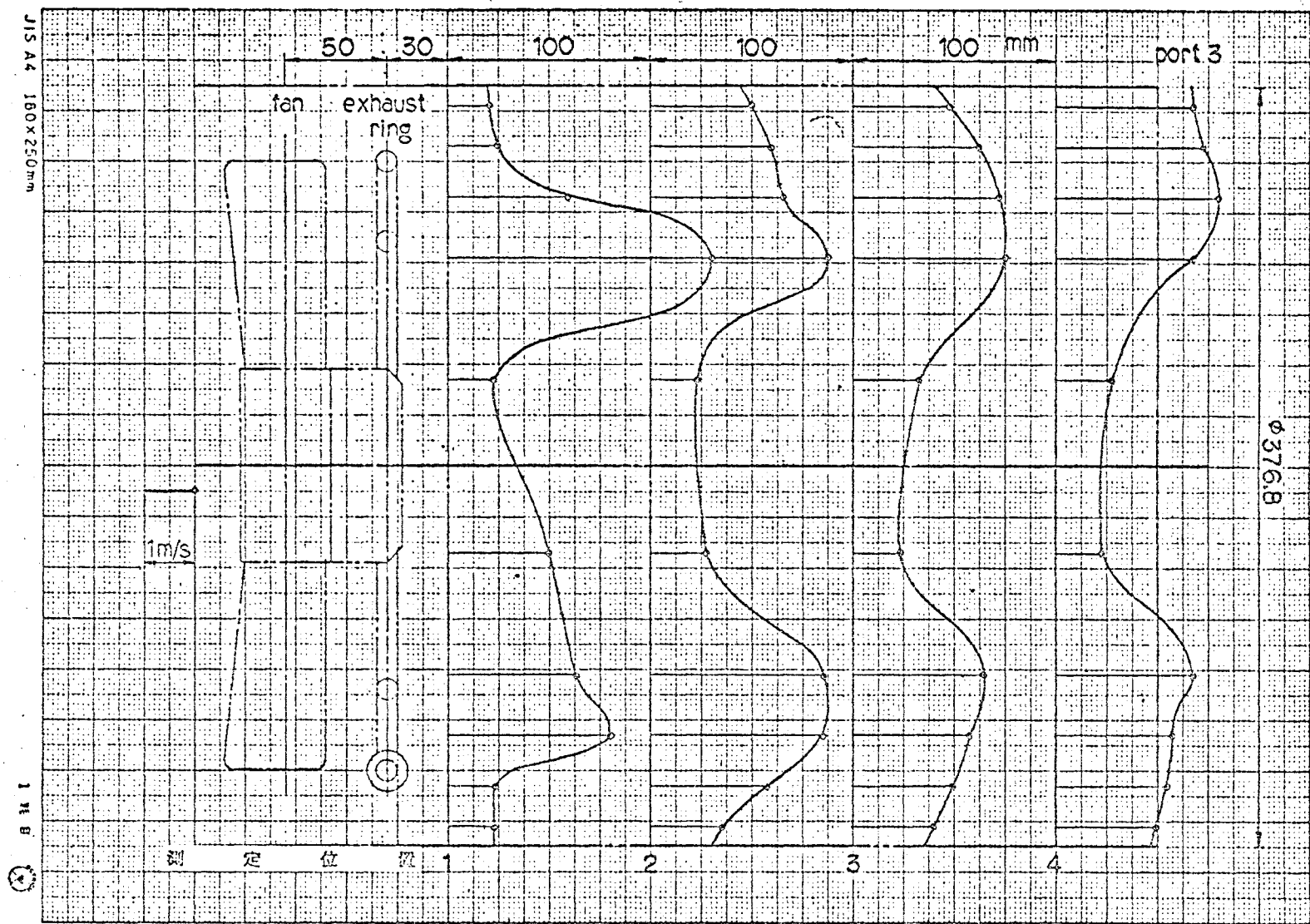


図 2.14 水素駆動時の風速分布 (25 atg. port 3)

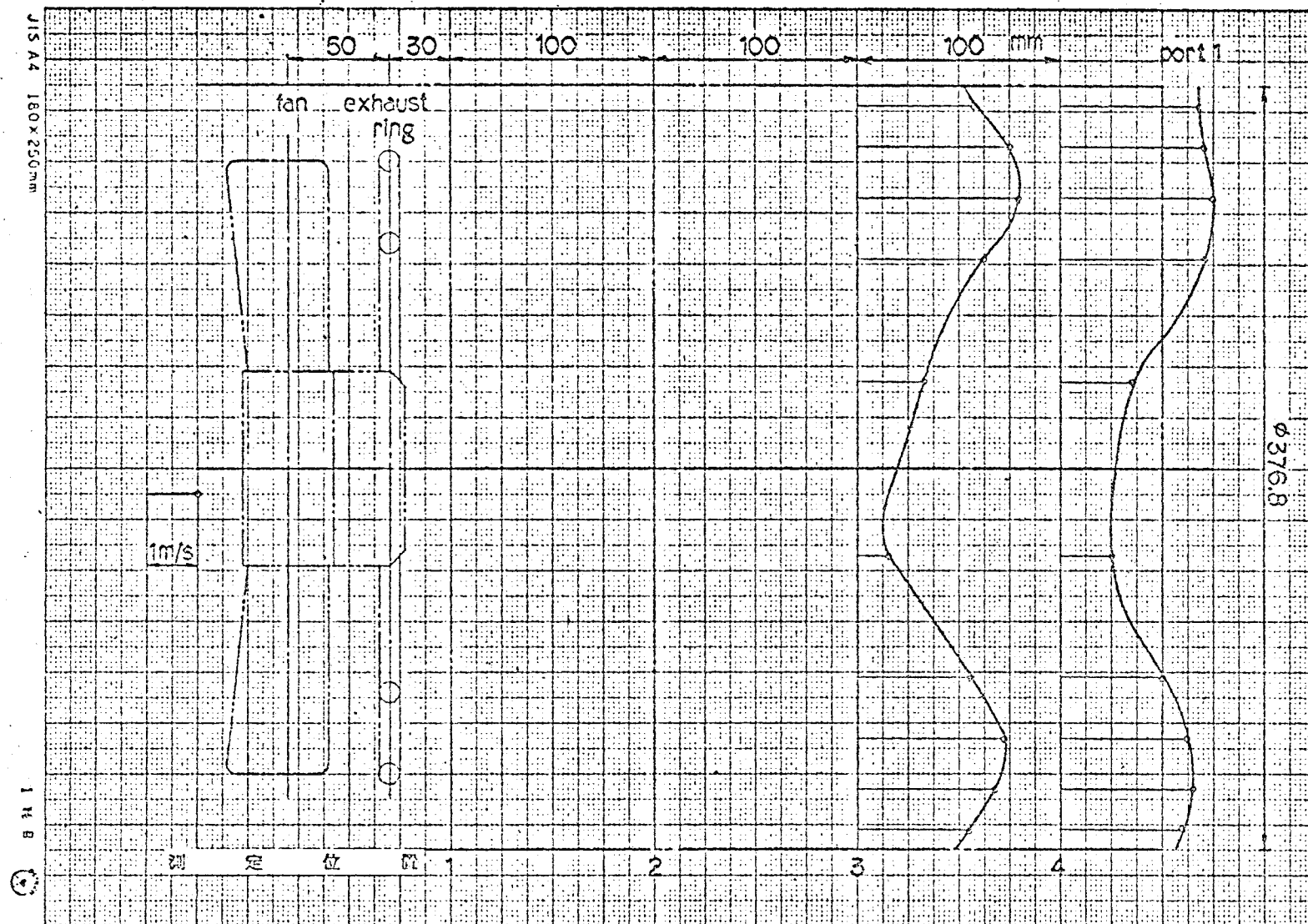


図 2.15 水素駆動時の風速分布 (20 atg, port 1)

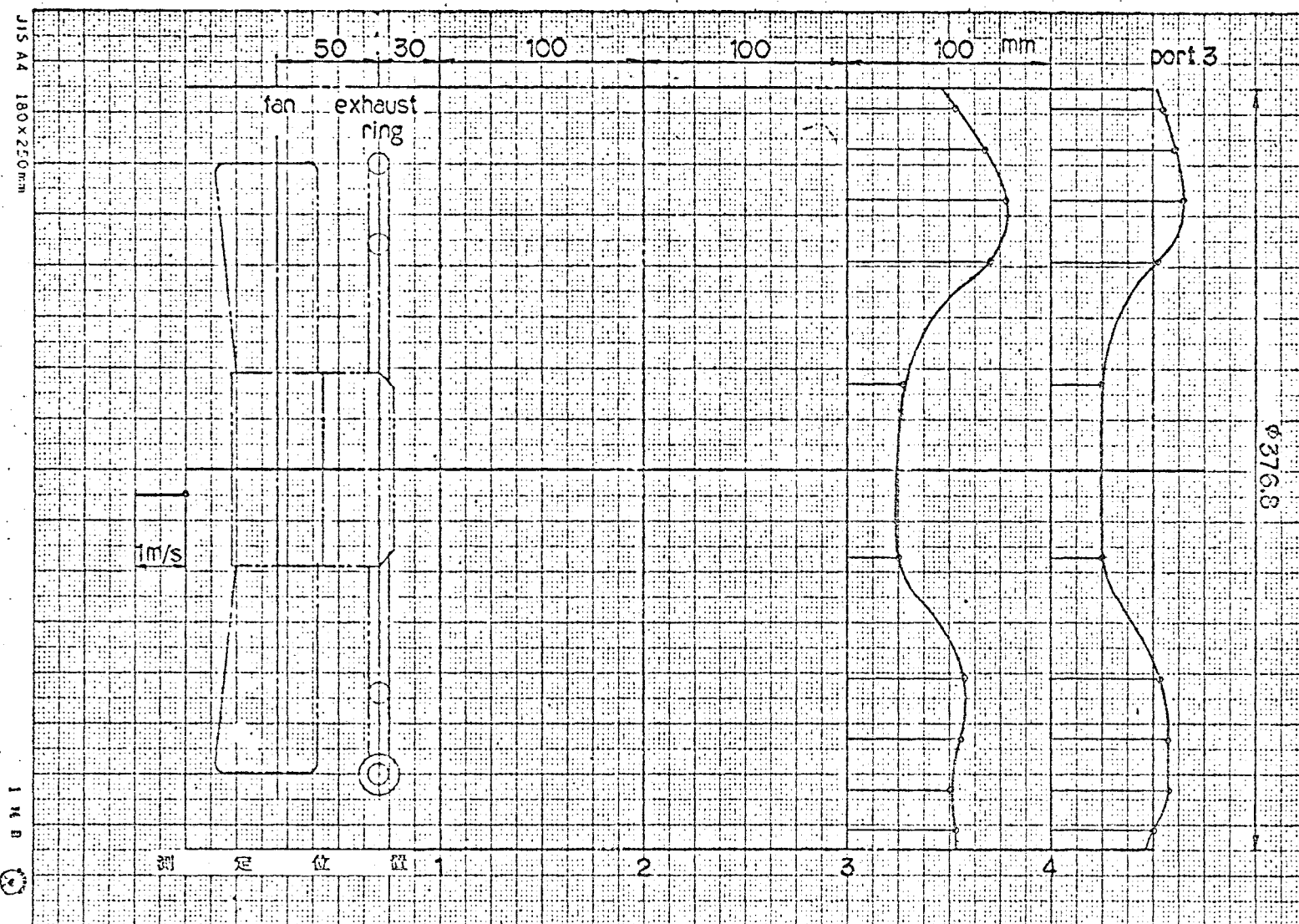


図 2.16 水素駆動時の風速分布 (20atg, port 3)

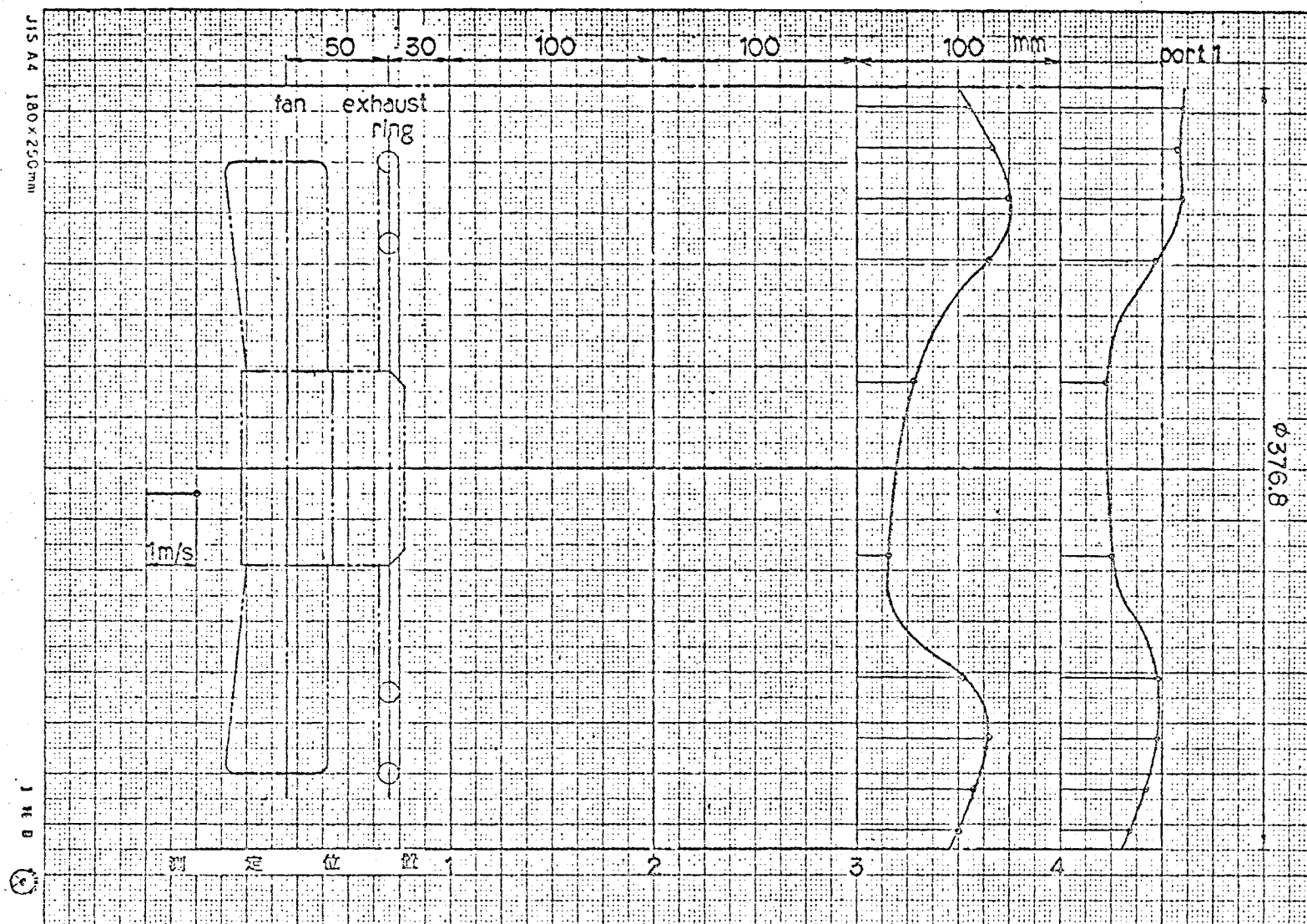


図 2.17 水素駆動時の風速分布 (15atg. port 1)

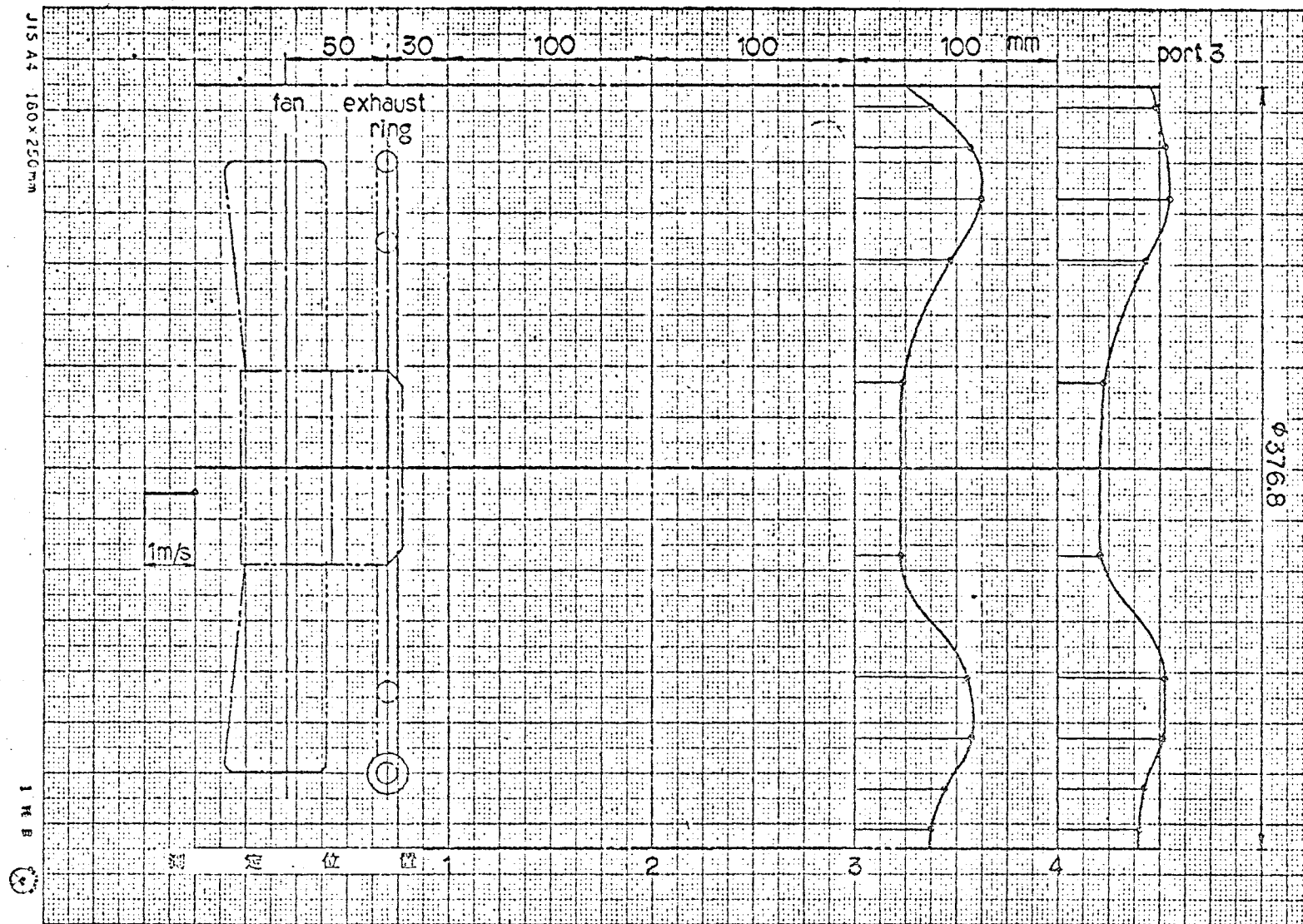


図 2.18 水素駆動時の風速分布 (15 atg. port 3)

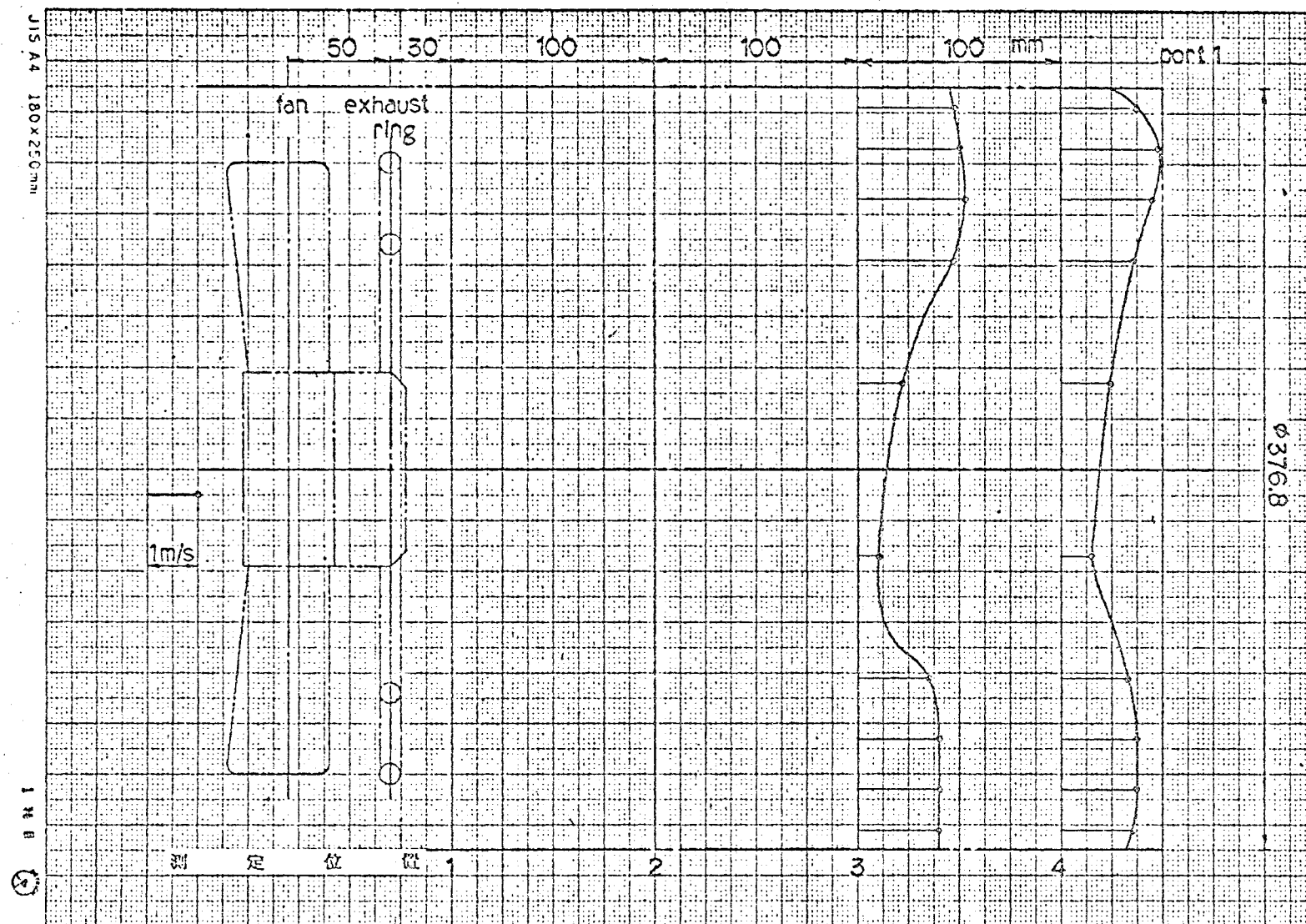


図 219 水素駆動時の風速分布 (10atg. port 1)

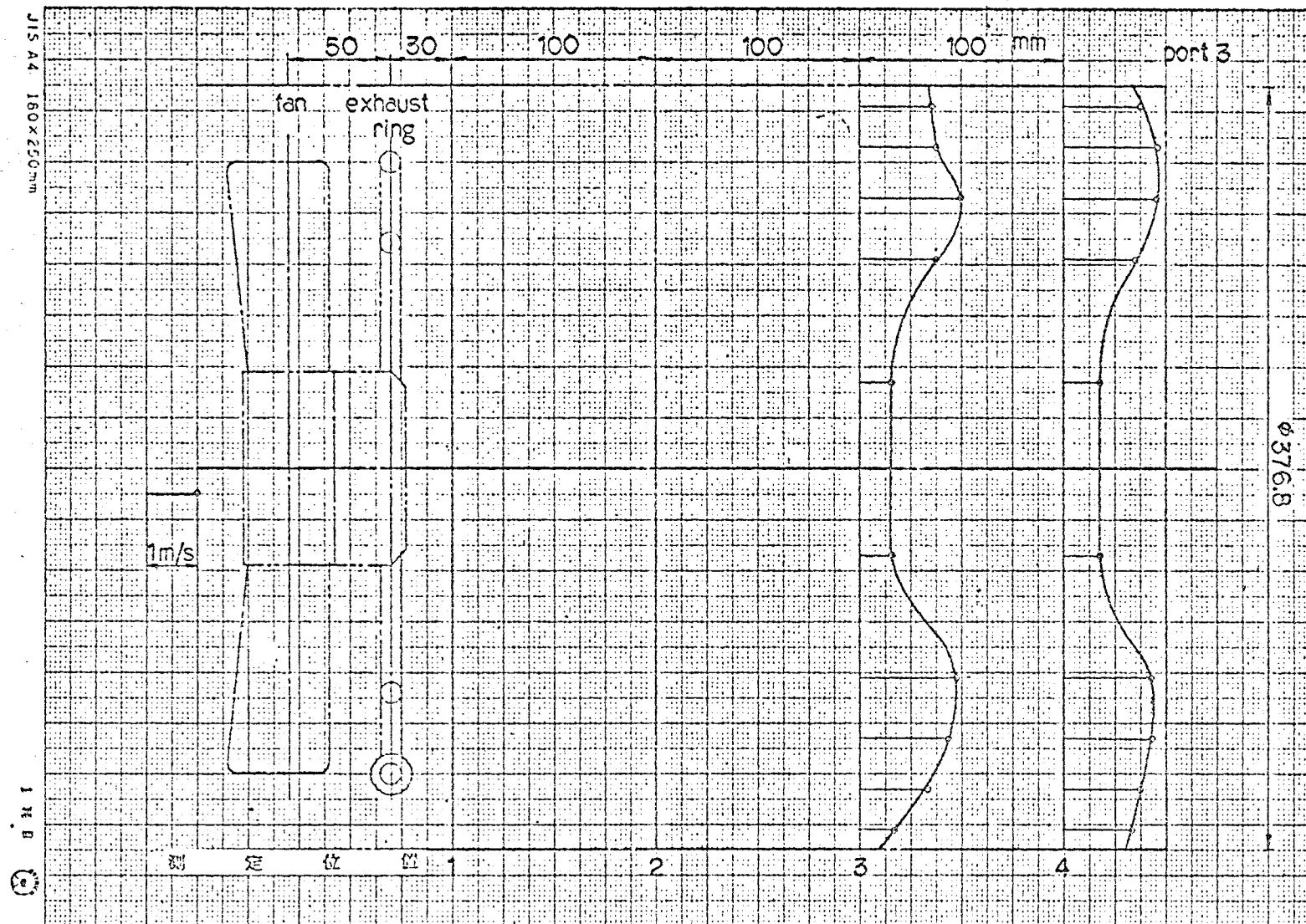


図 2.20 水素駆動時の風速分布 (10atg. port 3)

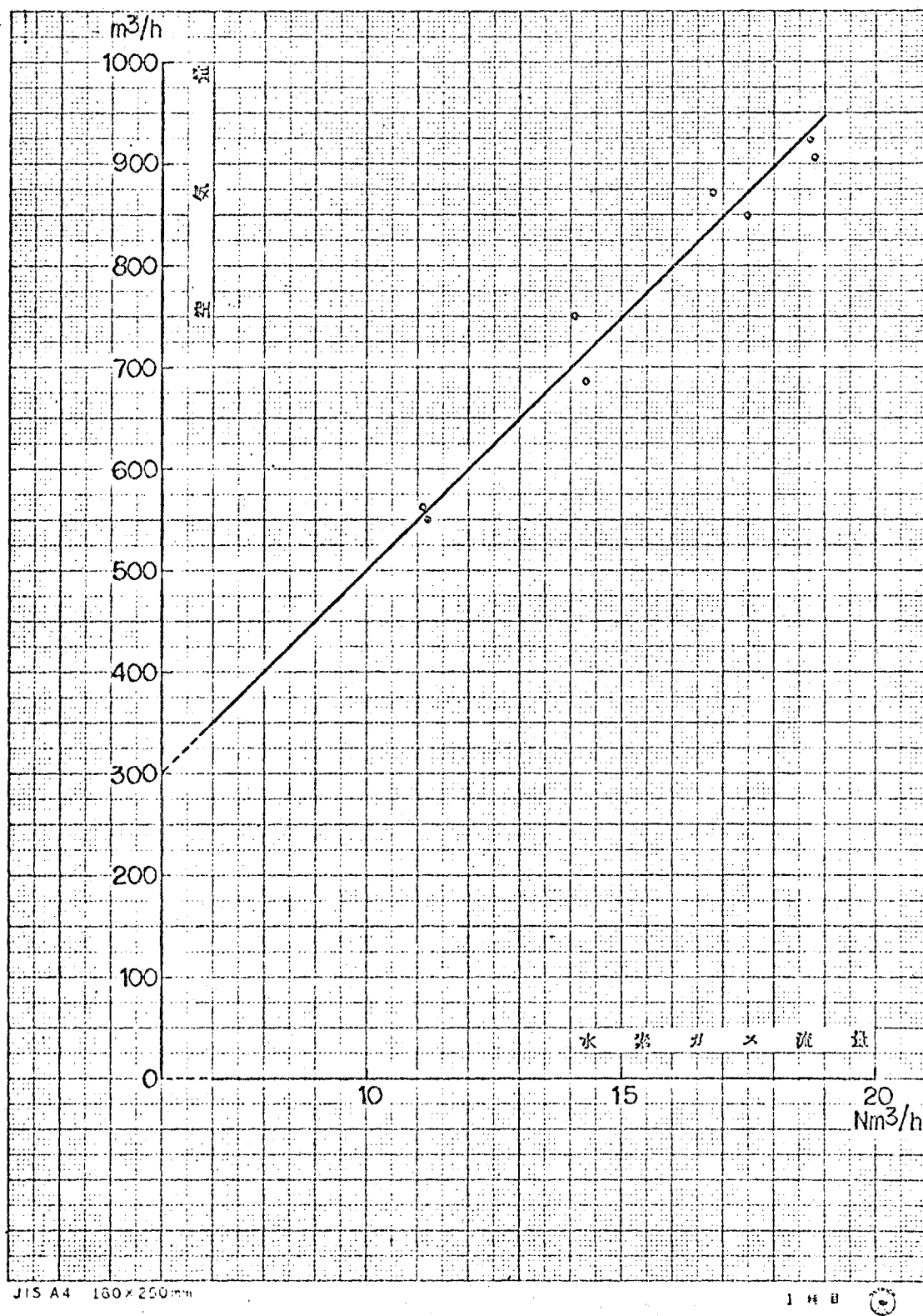


図 2.21 水素流量とファン風量の関係

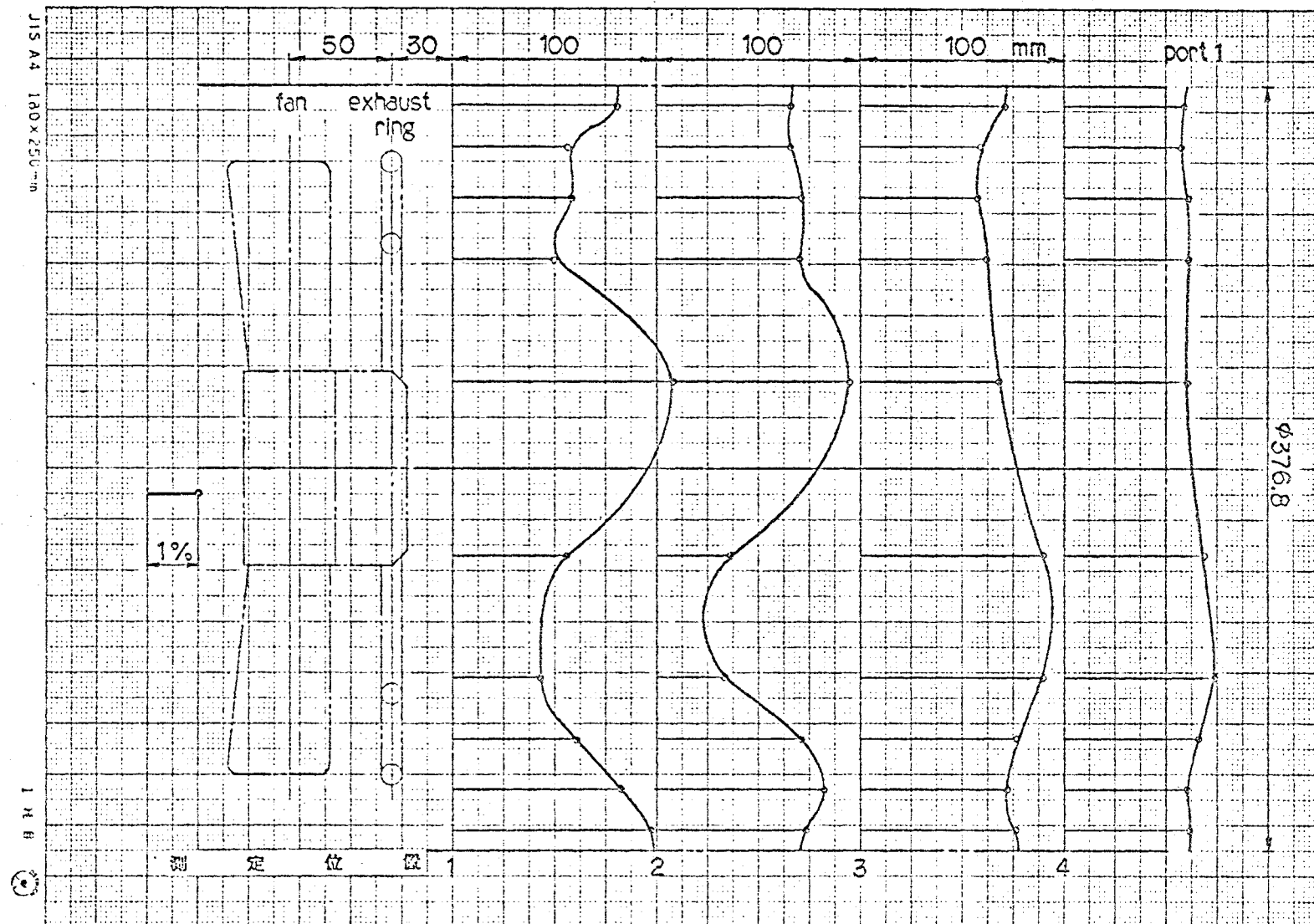


图 2.22 水素濃度分布 (25 atg, port 1)

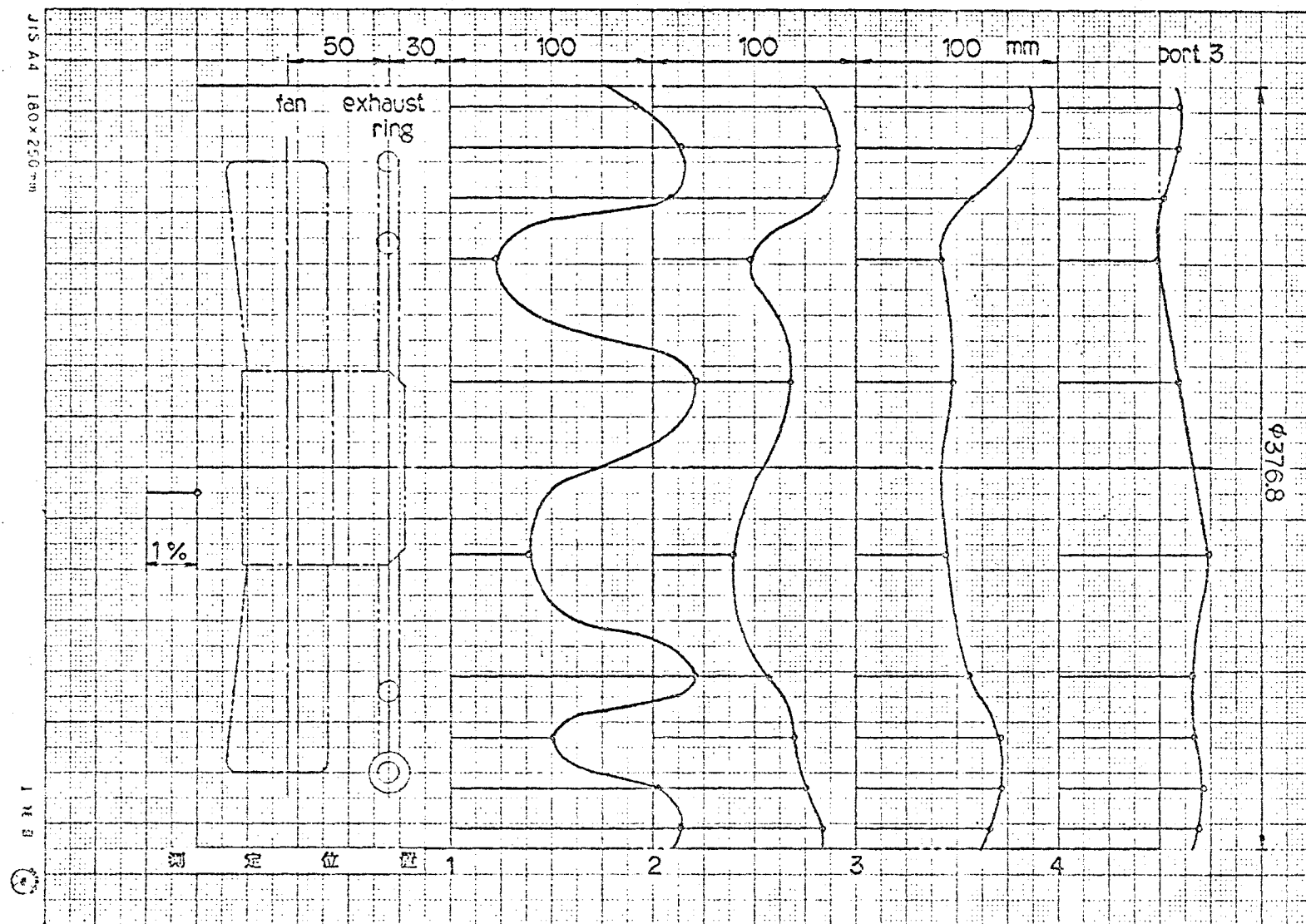


図 2.23 水素濃度分布 (25 atg, port 3)

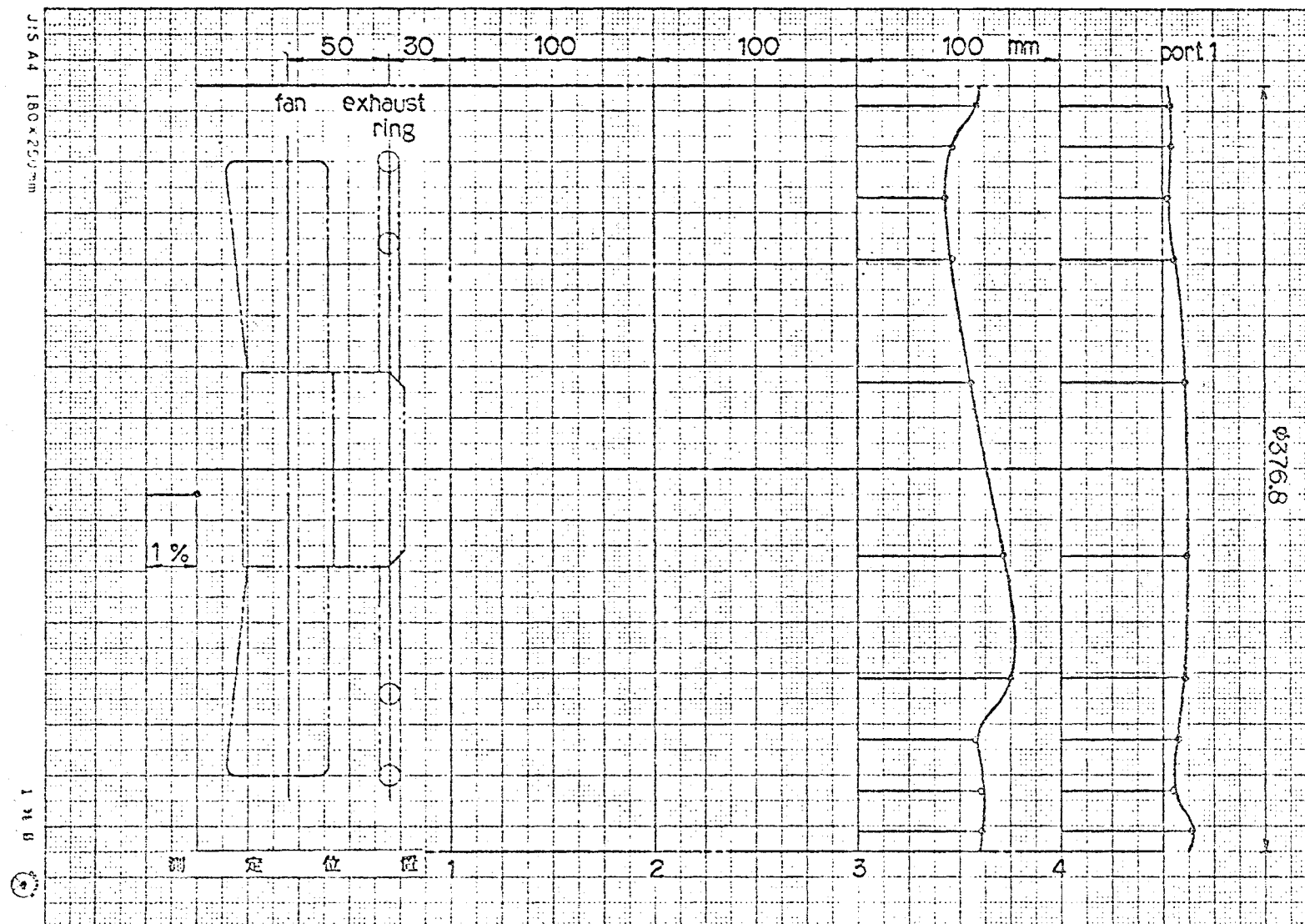


図 224 水素濃度分布 (20 atg, port 1)

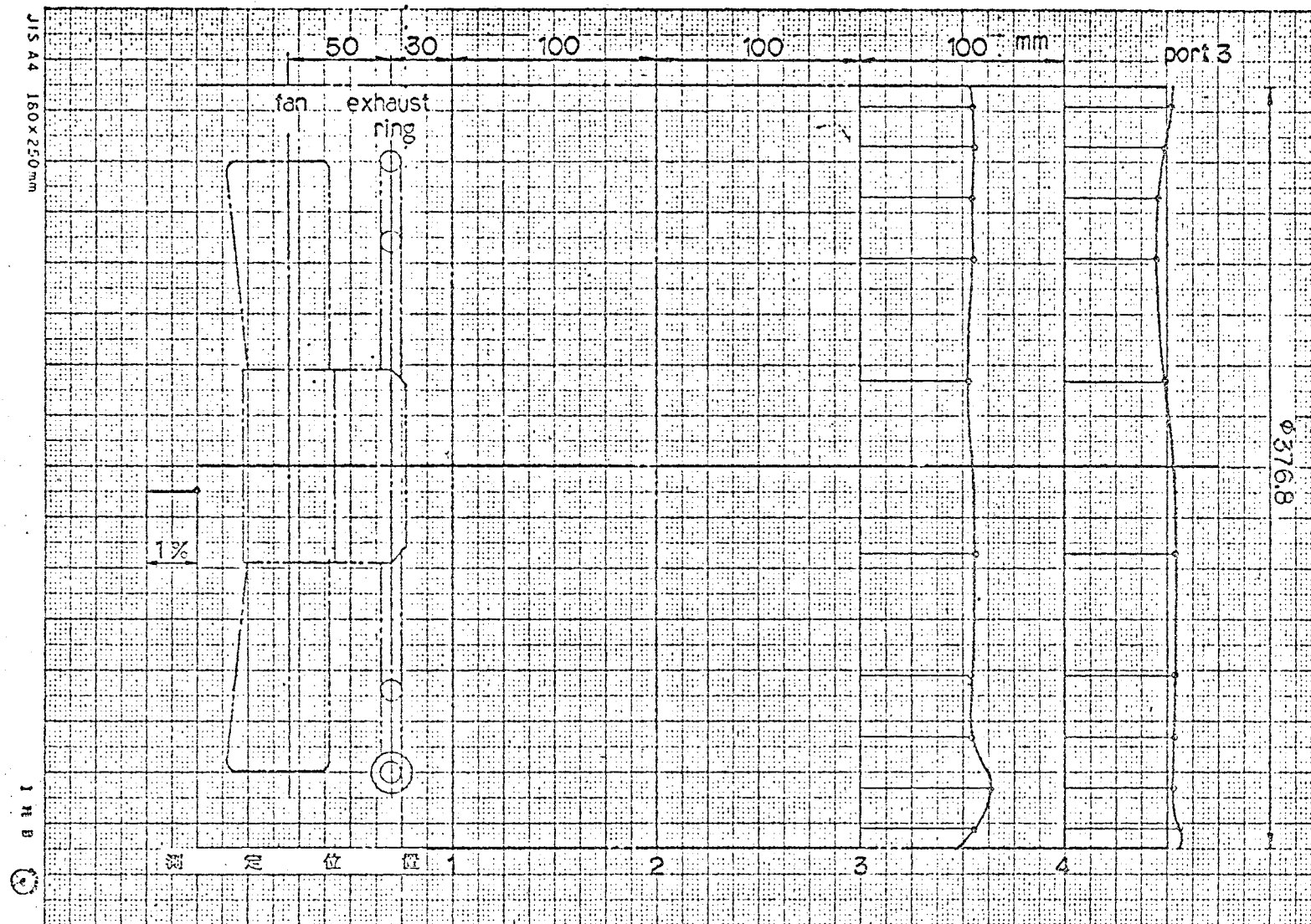


図 2.25 水素濃度分布 (20 atg, port 3)

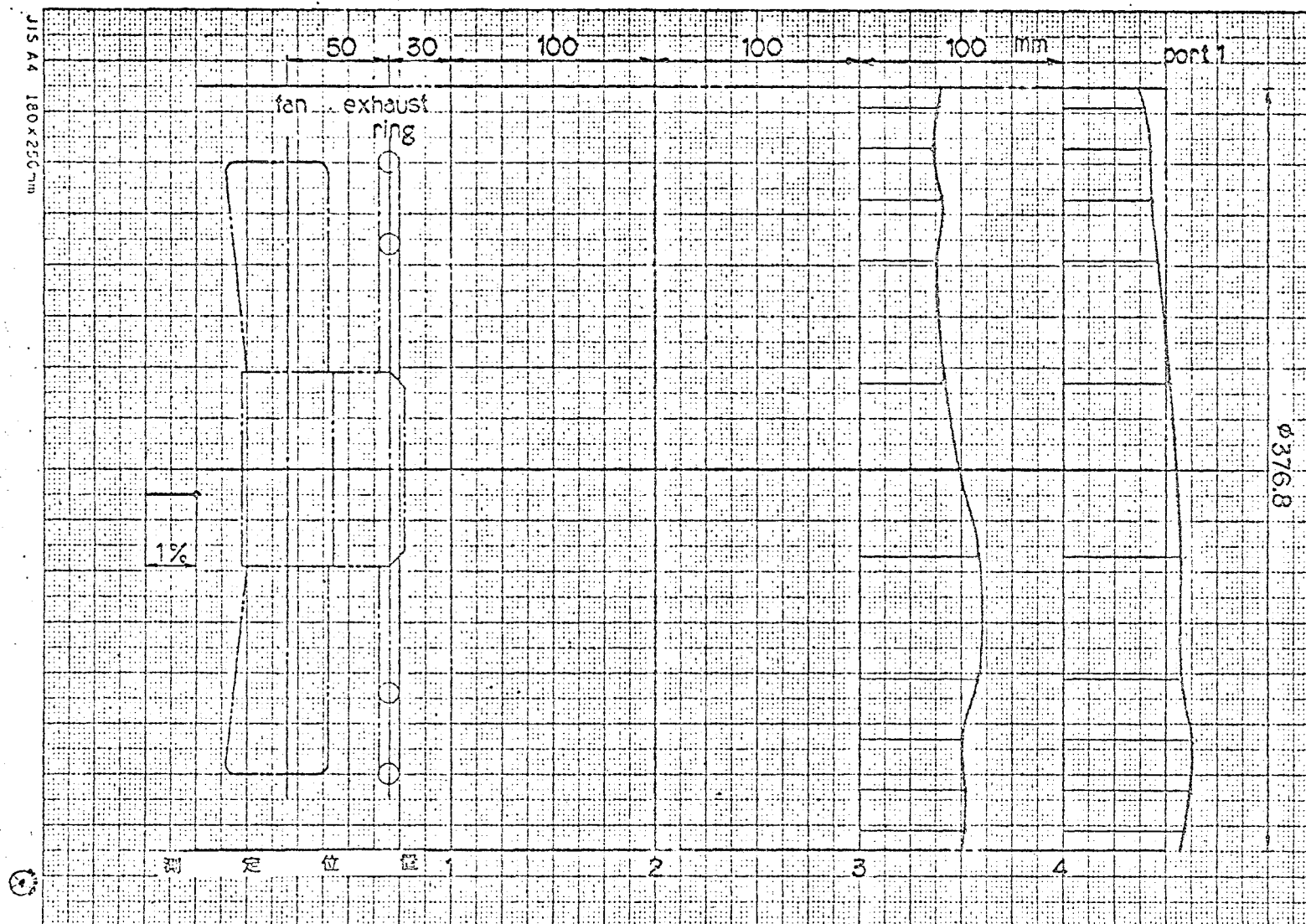


図 226 水素濃度分布 (15 atg · port 1)

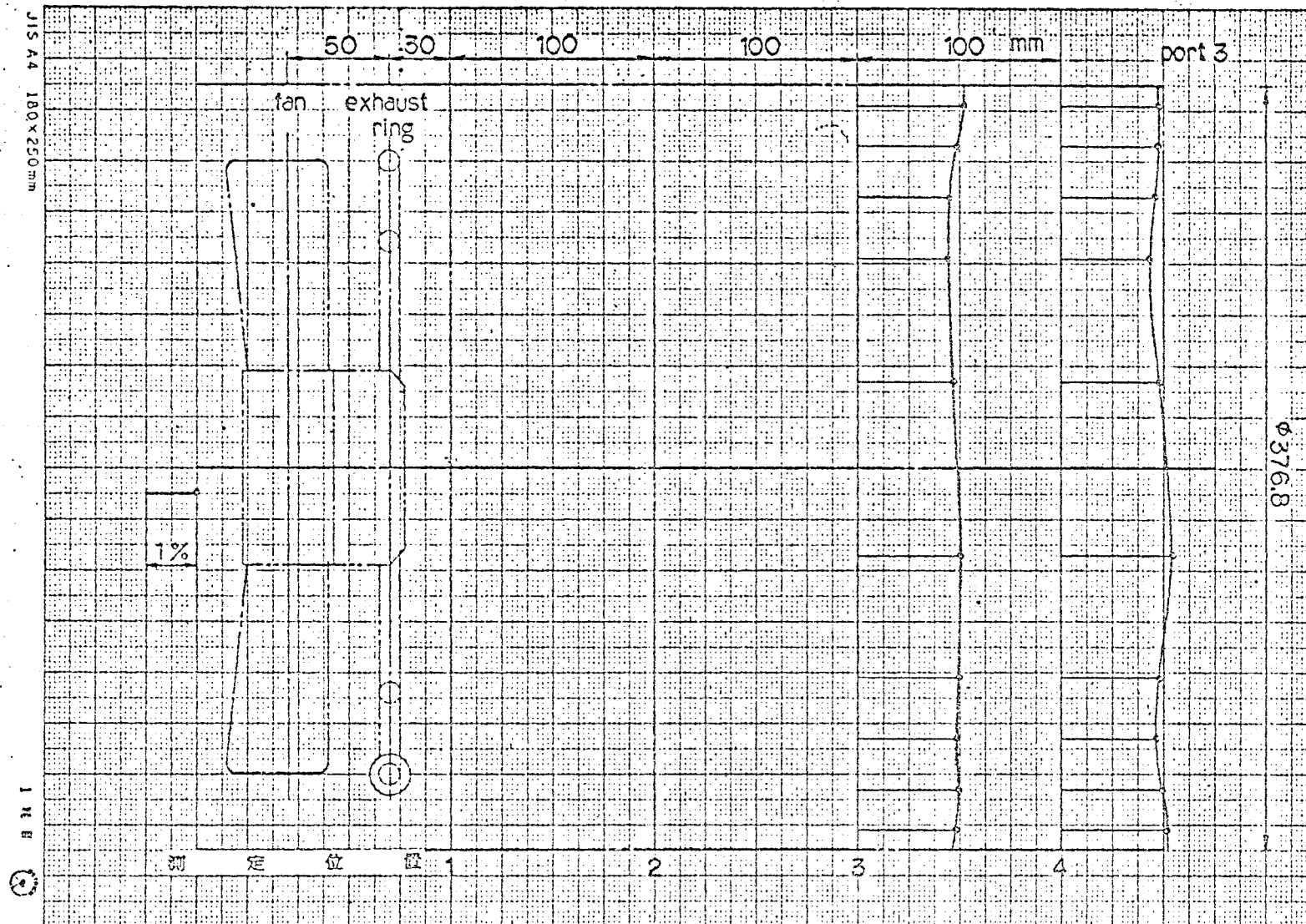


図 2.27 水素濃度分布 (15 atg, port 3)

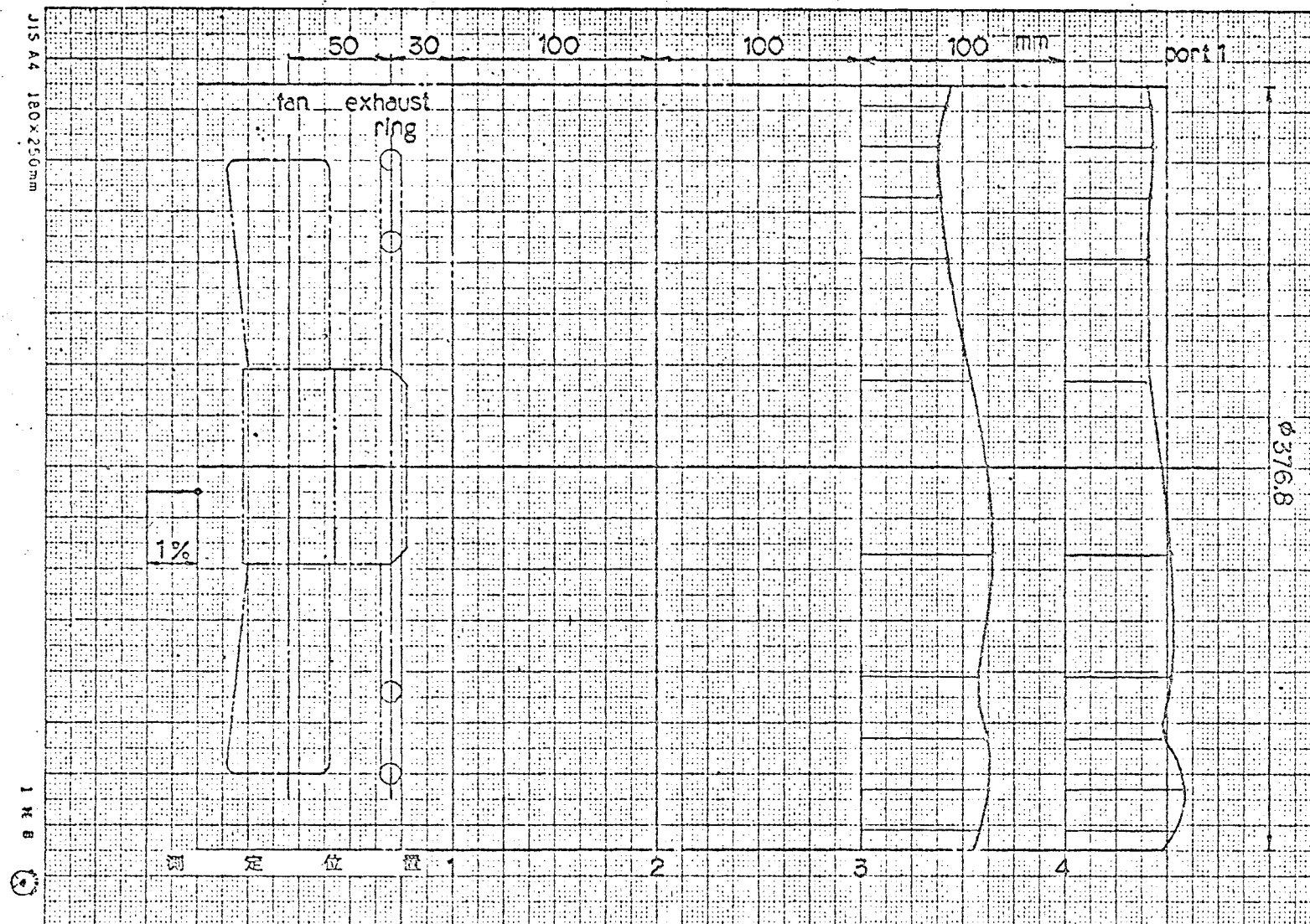


図 228 水素濃度分布 (10 atg, port 1)

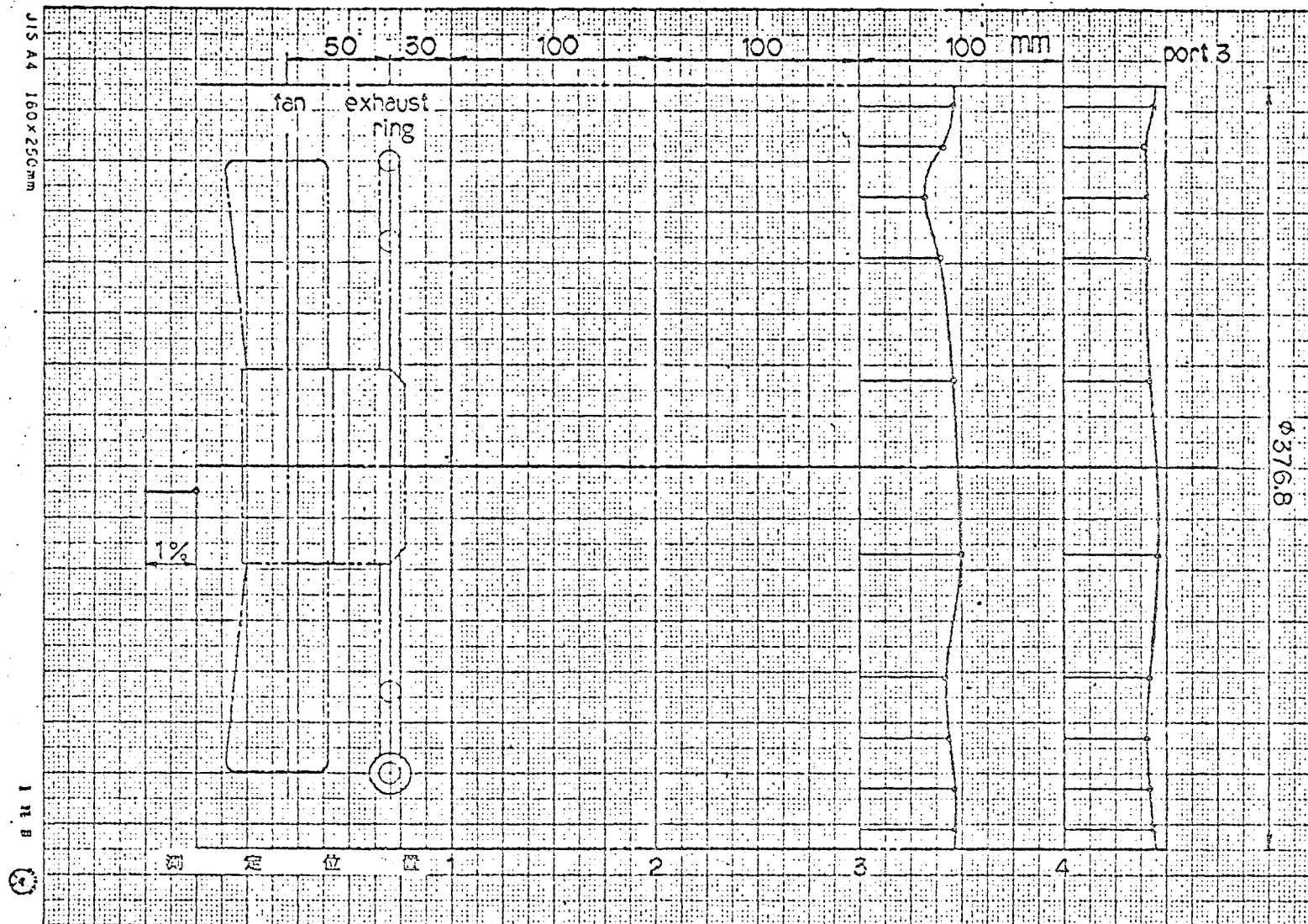


图 229 水素濃度分布 (10 atg. port 3)

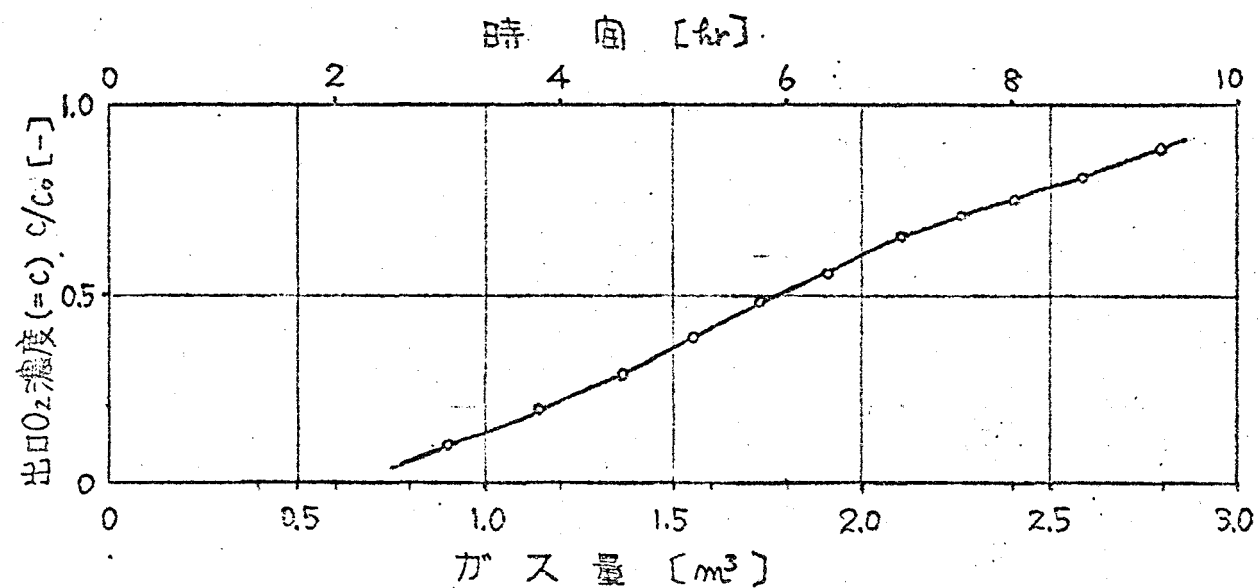


図3.1 水素中の酸素の吸着破過曲線

吸着剤 モレキュラーシーブ5A 27g

吸着器寸法 2.2φ×10^Hcm, 原料ガス(H₂ベース)中のO₂濃度

c₀=0.10%, ガス流量 5 ℓ/min, 吸着温度 -196℃,

吸着圧力 0.2 atg, 見掛ガス速度 6 m/min

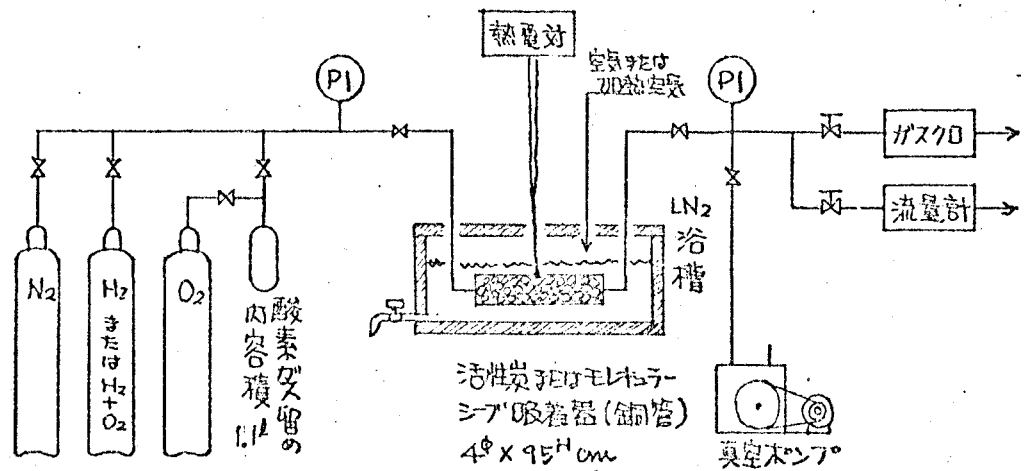


図 3.2 実験装置の概要

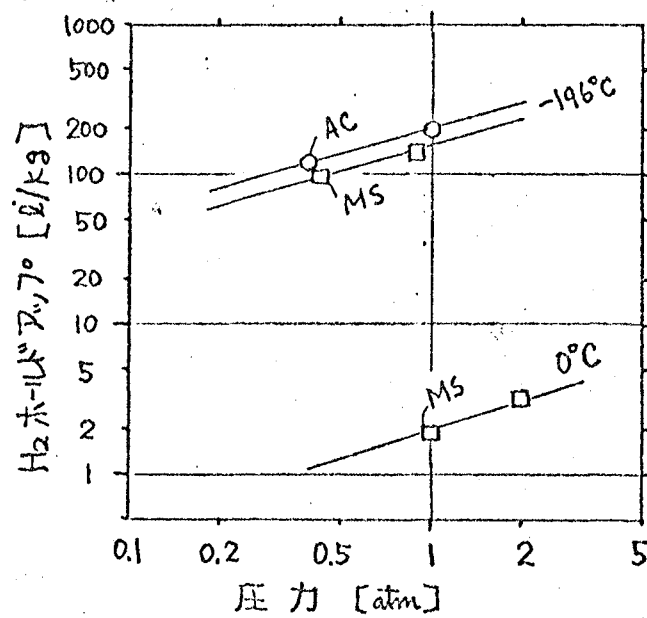


図 3.3 吸着器の H₂ ホールドアップ

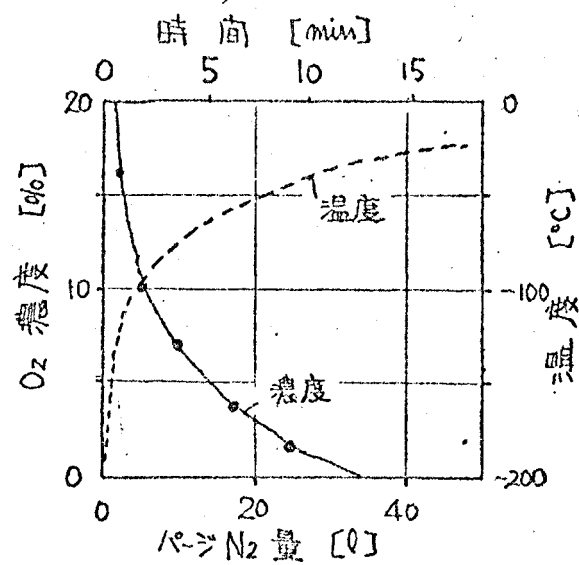


図 3.4 N₂ パージによる O₂ 排出

活性炭, O₂ = 2.9 l, N₂ パージ流量 2.7 l/min
 パージ圧 0.2 atg

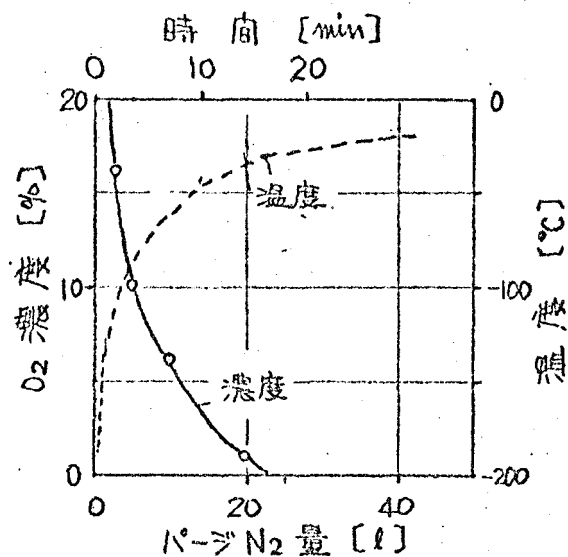


図 3.5 N₂ パージによる O₂ の排出

モレキュラーシーブ, O₂ = 2.9 l, N₂ パージ流量 1.4 l/min
 パージ圧 0.2 atg

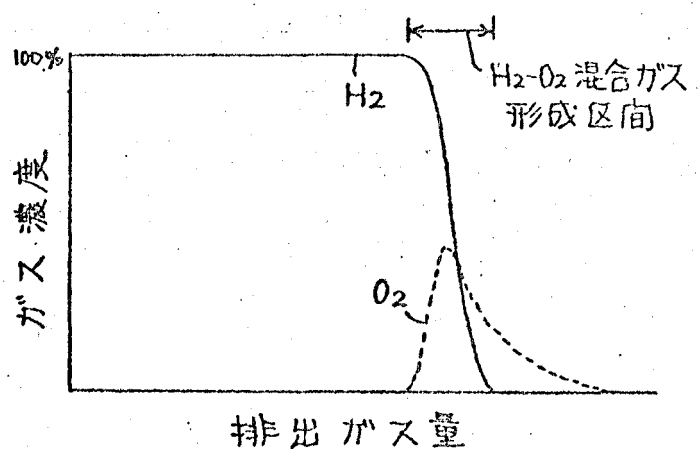


図 3.6 実際操作の O_2 排出 パターン予想

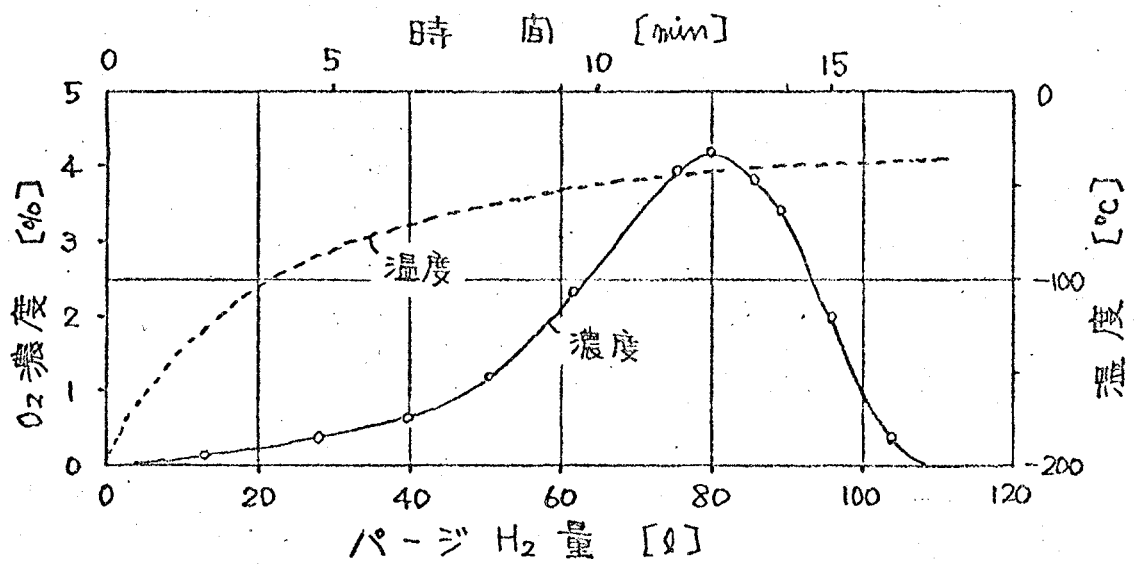


図 3.7 H₂ パージによる O₂ の排出 (活性炭, O₂ = 1.8 l)
 H₂ パージ流量 6.5 $\frac{\text{l}}{\text{min}}$ (平均), パージ圧 0.2 atg

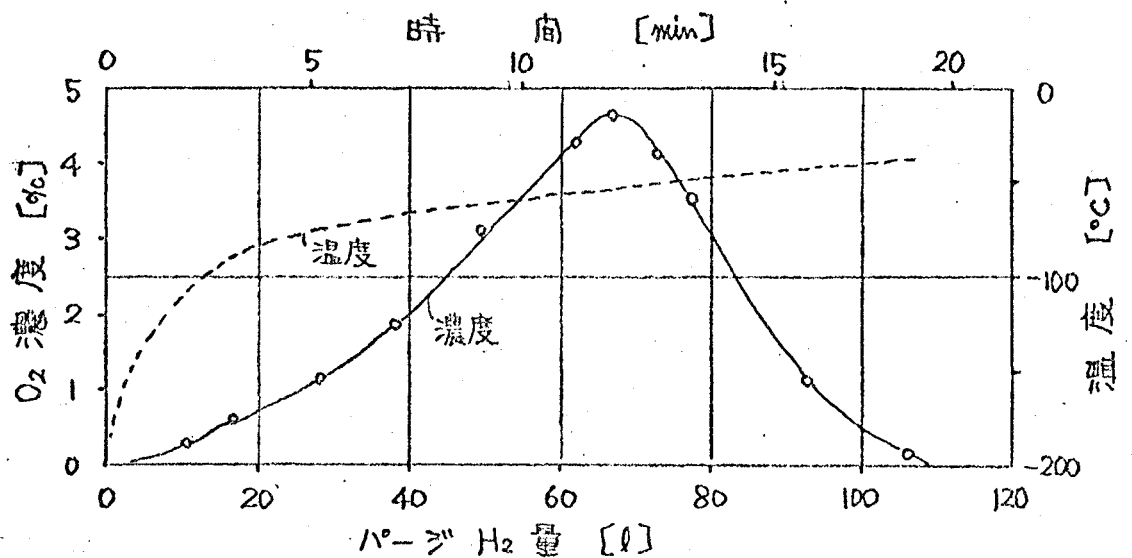


図 3.8 H₂ パージによる O₂ の排出 (モレキュラーシーブ, O₂ = 2.9 l)
 H₂ パージ流量 5.7 $\frac{\text{l}}{\text{min}}$ (平均), パージ圧 0.2 atg

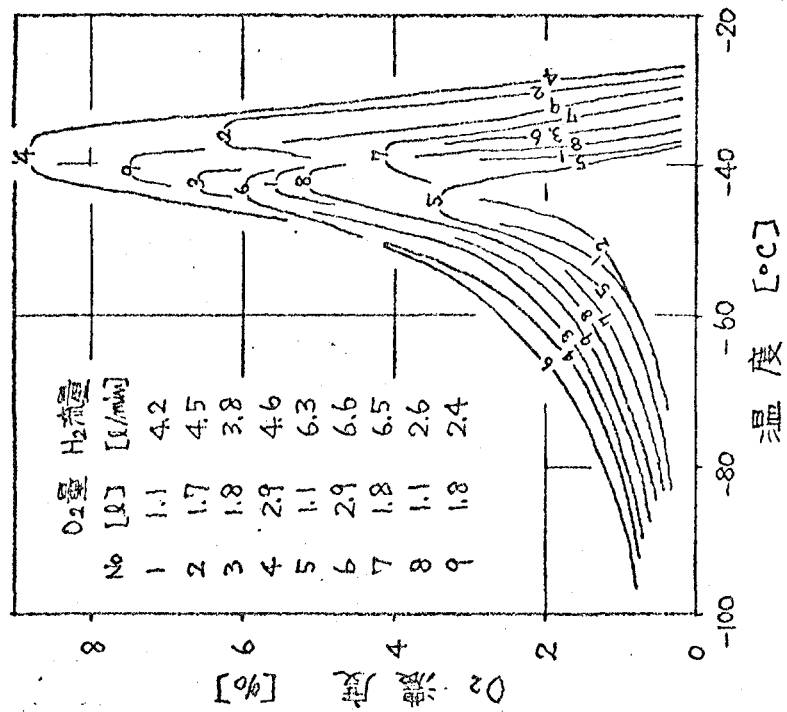


図 3.9 排出 O₂ と温度の関係 (活性炭)

バージ圧 0.2 atg

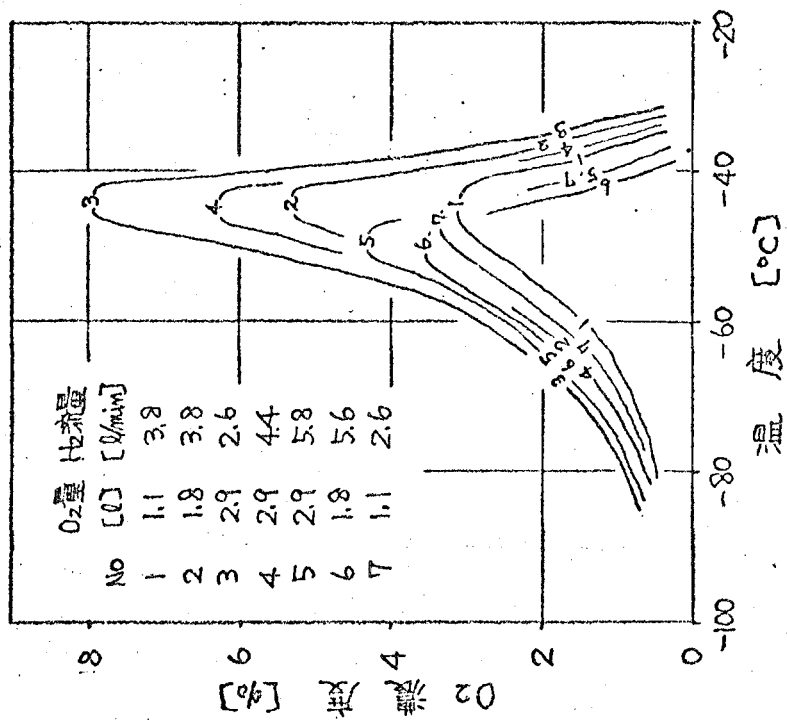


図 3.10 排出 O₂ と温度の関係 (モレキュラシーブ)

バージ圧 0.2 atg

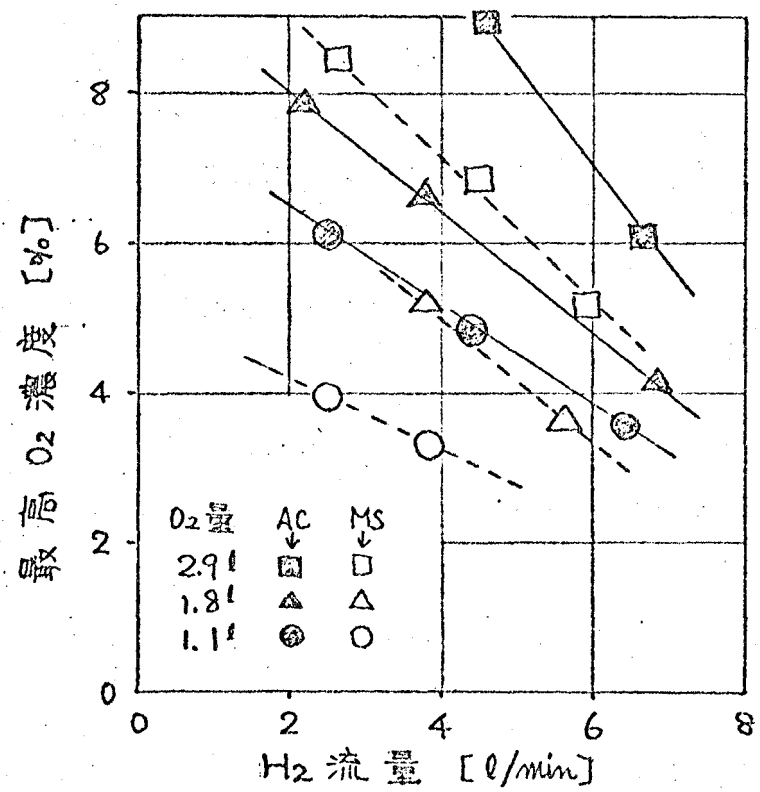


図 3.11 最高 O₂ 濃度と H₂ パージ流量の関係
パージ圧 0.2 atg

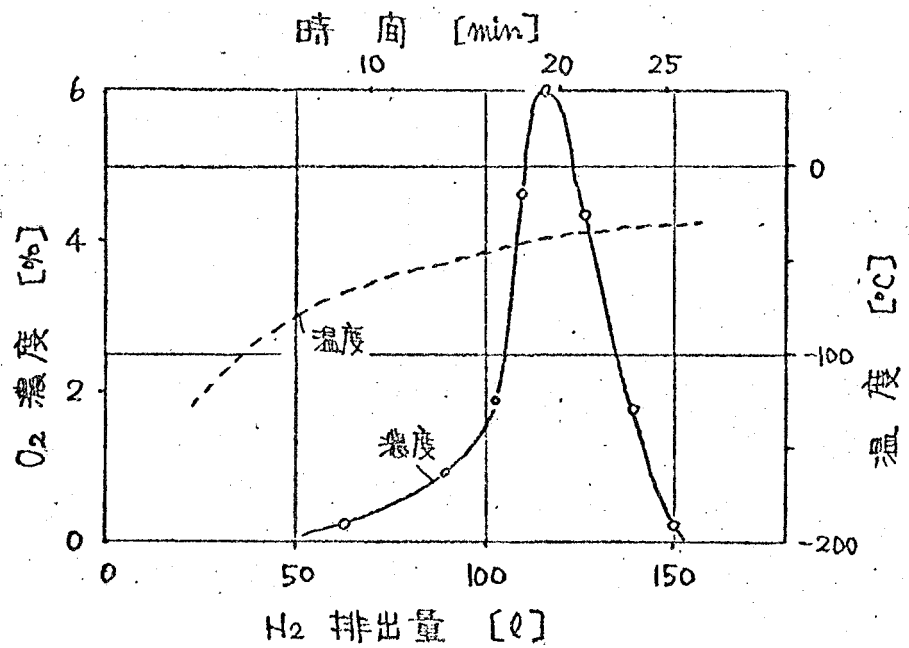


図 3.12 実際操作に似せた H_2 パージによる O_2 の排出
活性炭。 $O_2 = 1.7 \text{ l}$

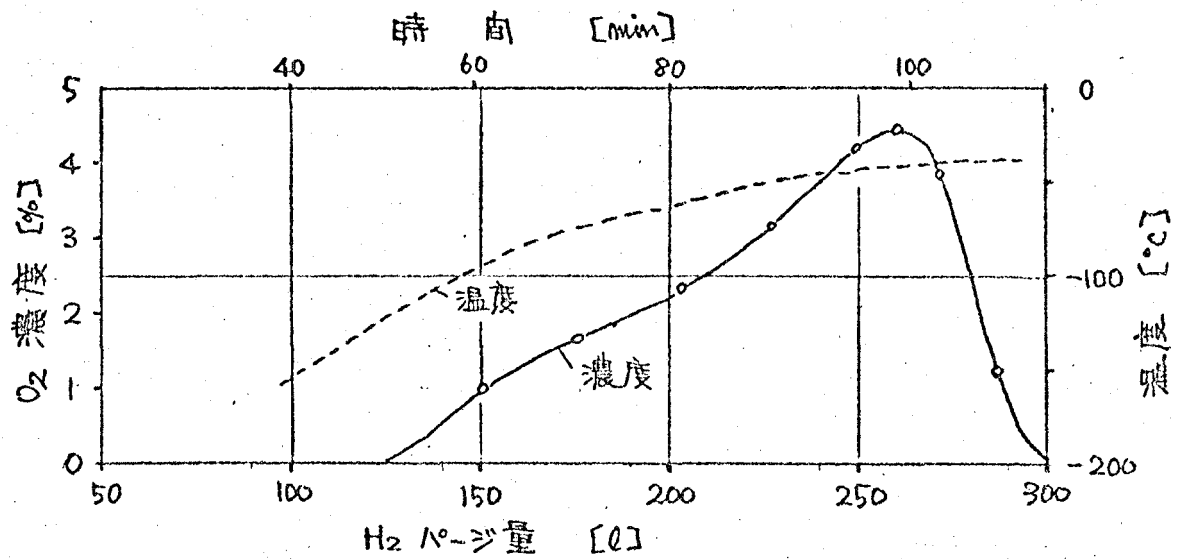


図 3.13 ゆつくり昇温した場合の H_2 パージによる O_2 排出
モレキュラーシーブ。 $O_2 = 4.6 \text{ l}$

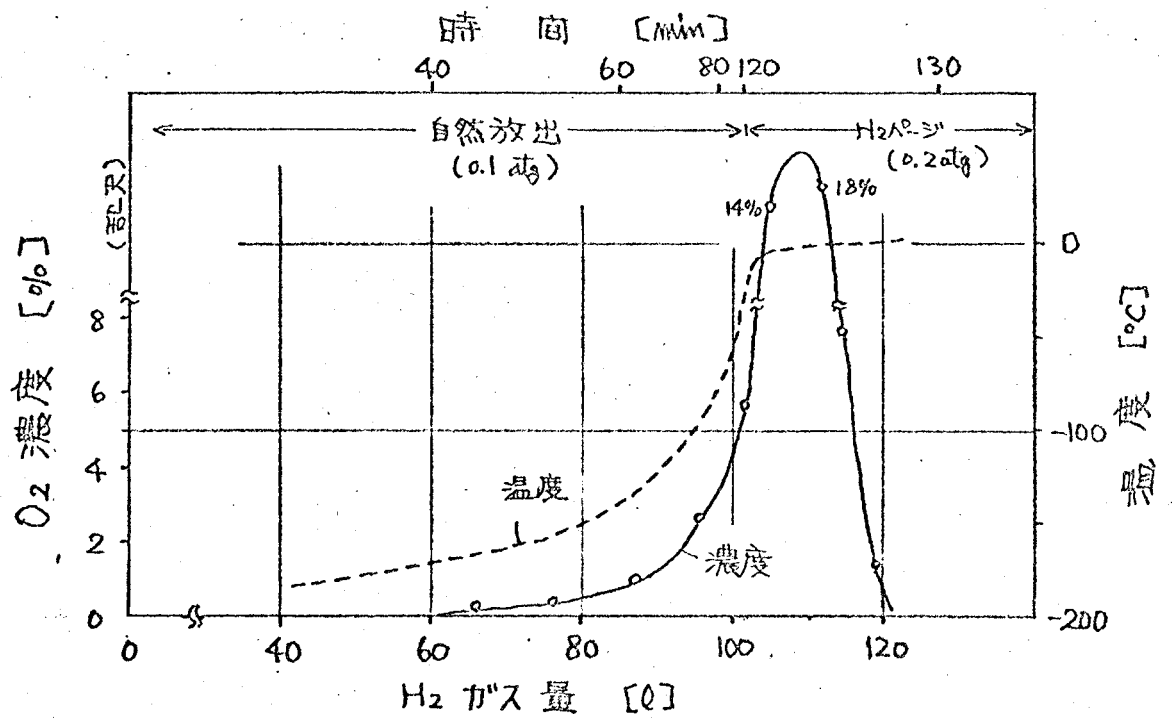


図 3.14 加温昇圧による自然放出の際の O_2 排出
活性炭, $O_2 = 1.8 \text{ l}$

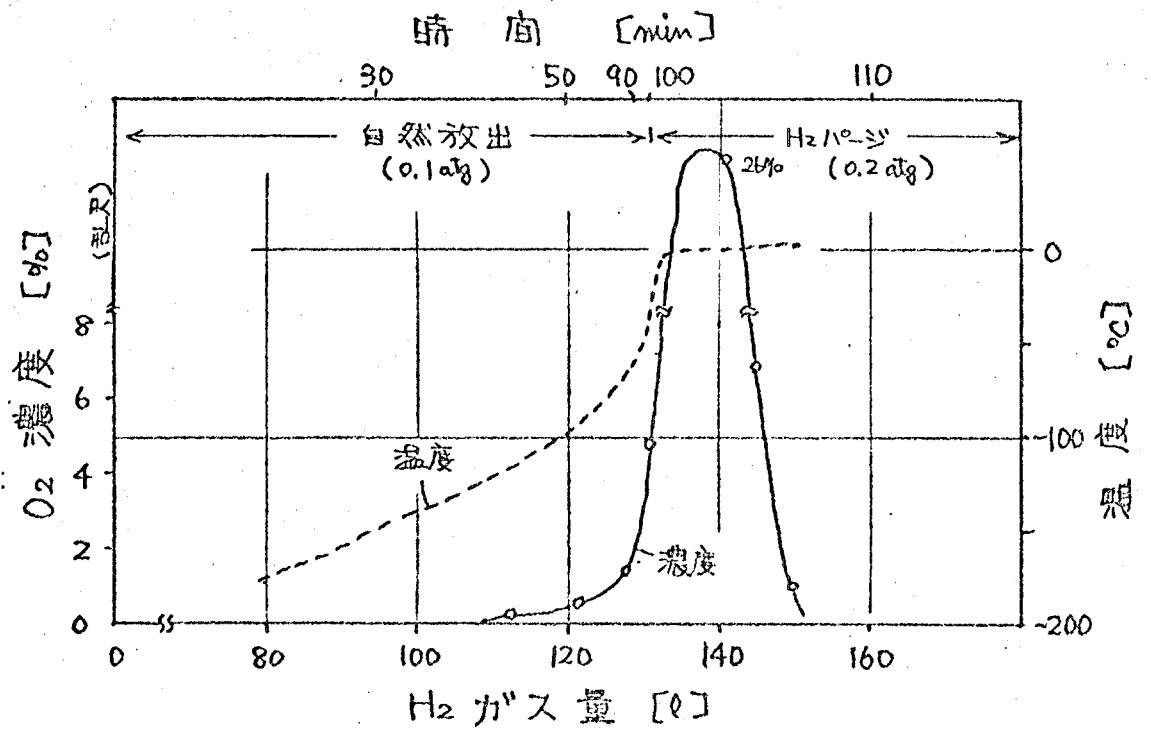


図 3.15 加温昇圧による自然放出の際の O_2 排出
モレキュラージープ, $O_2 = 1.8 \text{ l}$

JN0040257