

火力発電所用脱気器性能に関する考察

Consideration on the Capacity of Deaerator for Thermal Power Station

鈴木 一 男*
Kazuo Suzuki

植 西 晃**
Akira Uenishi

橋 本 淳 一***
Jun'ichi Hashimoto

内 容 梗 概

ボイラ水管および付属設備の腐食防止に、脱気器の果たす役割は大きい。最近火力発電所の高温高圧化に伴い、この脱気性能に対して特に関心を払う必要があり、容量が増大する最近の傾向に対してはまたその経済性も十分考慮されねばならない。

本文は、これら脱気器の計画、取扱いの参考として、まず性能の理論的取扱方法を解説し、ついで脱気効果に及ぼす各種因子の影響に関する実験結果ならびに脱気機構を紹介論述して、脱気器の経済的構成のあり方に対する指針を与えたものである。

1. 緒 言

ボイラ給水中に溶存する酸素の金属に対する腐食性は、炭酸ガスのその約10倍程度であり、また高温高圧においては常温時の約200倍以上に達するから、高温高圧ボイラでは特に脱気器の性能が問題視される。脱気器出口における溶存酸素量については、前述の理由から極微量が好ましいが一般にその保証値を0.005 cc/l以下と規定している。

一般の機械的方法による脱気器の脱気理論は、周知のようにHenryおよびDaltonの法則とともに水中における酸素の拡散法則に立脚したものであるが、いま水中より溶存ガスを分離するに必要な条件をあげると、

- (1) ガスの溶解度を最小にするため、脱気器内の圧力に相当する飽和温度まで水を加熱する。
- (2) 脱気器の最終段階において、溶存ガスの全部を放出するため酸素の分圧を零に近づける。
- (3) ガス放出を有効にするため、水に最大の表面積を与え、かつ拡散距離を最短にし、放出ガスをすみやかに水面から分離する。
- (4) 純度の高い加熱蒸気により水を洗浄かくはんし、ガスの放出を促進する。

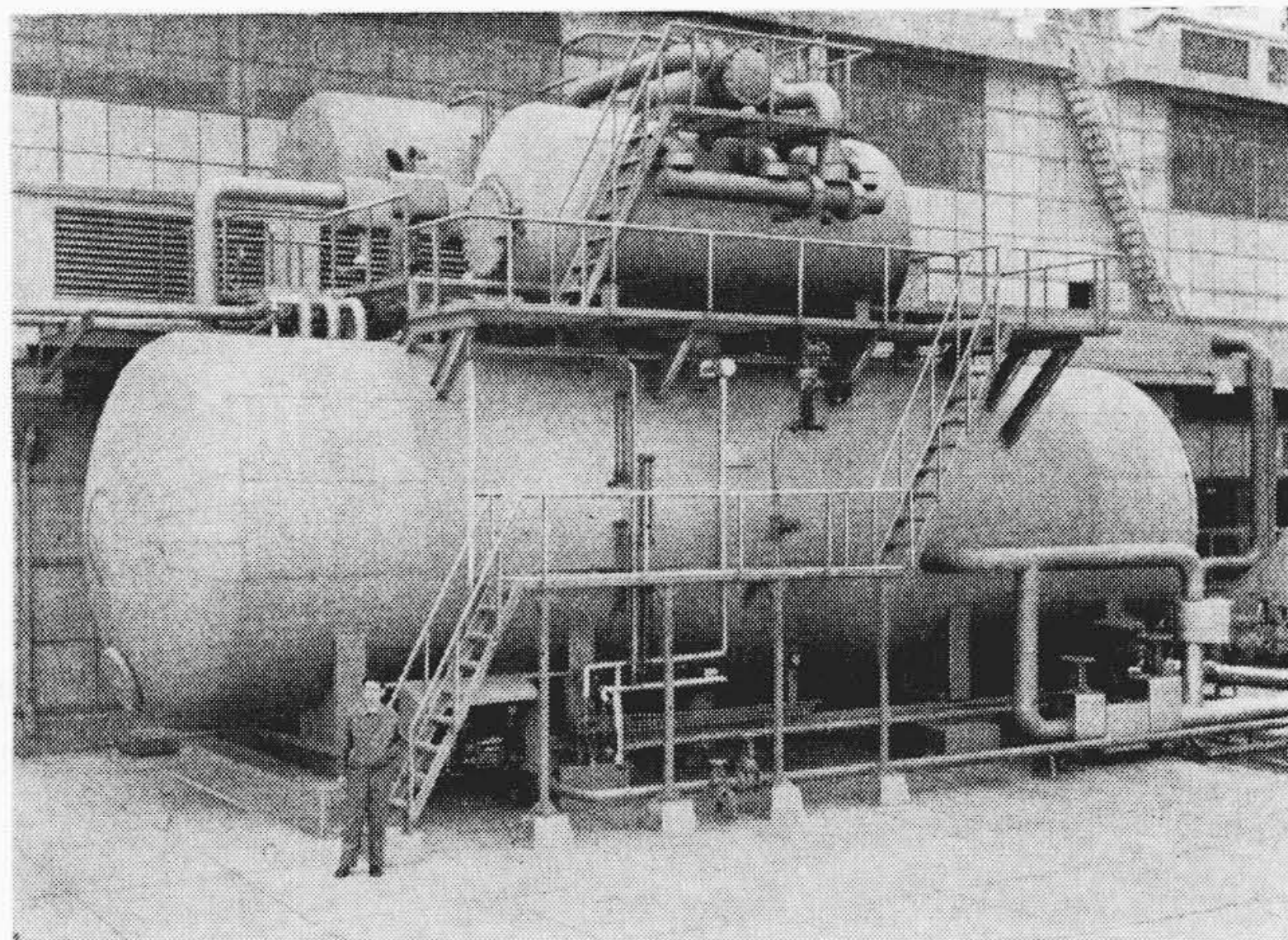
などであり、さらにまた脱気器の性能に影響する要素としては、

- (1) トレイの形状とその段数
- (2) 給水量
- (3) ベントレイト (Vent rate)
- (4) 脱気器器内圧力
- (5) スプレイの孔径と落下距離
- (6) 給水の入口酸素量

などが考えられる。

したがって、各種使用条件に対して常に所期の脱気性能を発揮できるものをうるためには、上述の必要条件を満足させることはもちろん、各影響要素の実体をはあく解析する要があり、これによって経済的な設計も可能となるが、従来この観点からなされた公表の研究は数多くない。

日立製作所においては多数の基礎的な研究によって、すでにその設計方針を確立しており、本文はこれら研究成果を要約して脱気器性能の理論的取扱方法および脱気の機構、さらに前記各要素の影響などを解明論述し、今後この種の機器の設計に対する一指針を与えんとするものである。



第1図 事業用脱気器外観図

2. 脱気器の理論的取扱い

脱気器の機構を考える場合、給水と蒸気を向流接触させて水中の溶存酸素を分離するもので、化学工学における精溜、ガス吸収などの充てん塔および泡鐘塔のような段塔の作用と同様に考えられる。この充てん塔や段塔における取扱いは、操作線と平衡線によって塔の高さを求める方法、移動単位数、H. T. U. (Height per Transfer Unit) および段塔効率などによってその解析法が確立されている。

一般に二流体が接触する場合その拡散抵抗は流体の双方に存在するが、酸素を水中から放散または吸収させる場合には液境膜抵抗が主となり、ガス境膜抵抗は無視できるものである。したがって脱気器においては酸素側を無視し、給水側の総括移動単位数およびH. T. U.などを考えることができる。

2.1 物質収支

脱気器の高さを求める前提として物質収支を考える必要がある。精溜塔および吸収塔の場合にも、平衡線と物質収支に基づく操作線とが段数決定に必要なものであると同様に、脱気器においても段数を求めるための基礎となる。

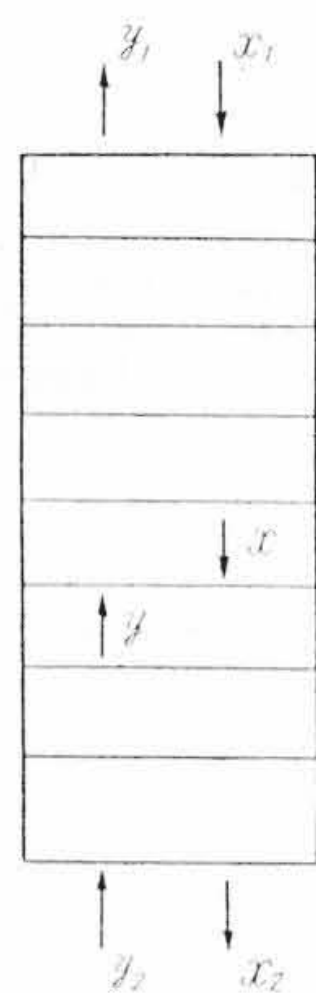
第2図において、蒸気は酸素濃度 y_2 ではいり y_1 でベントオリフィスより放出され、給水は酸素濃度 x_1 ではいり x_2 まで脱気された場合を考える。

いま脱気器内の任意の段の蒸気中の酸素濃度を y 、給水中の酸素濃度を x とし、また単位面積当りの器内を流れる蒸気および給水の量をそれぞれ G 、 L とすれば、任意の段までの物質収支は次式で表わされる。

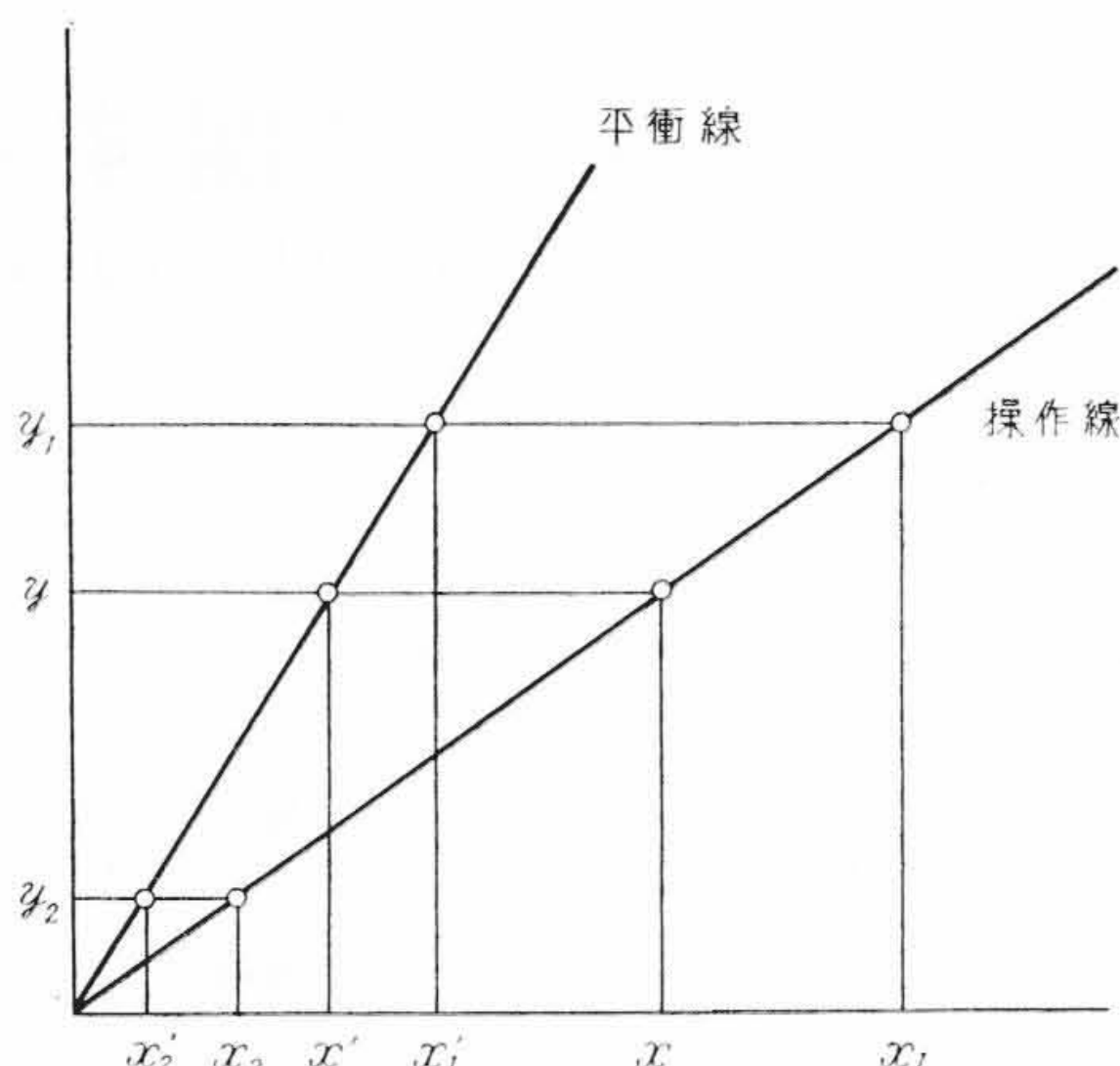
* 日立製作所日立工場

** 日立製作所日立研究所

***日立エンジニアリング株式会社



第2図 物質収支



第3図 操作線と平衡線

$$G\left(\frac{y}{1-y}-\frac{y_2}{1-y_2}\right)=L\left(\frac{x}{1-x}-\frac{x_2}{1-x_2}\right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

x, y は濃度が稀薄であるため、分母は 1 に等しいと見なして

$$G(y-y_2)=L(x-x_2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

と置くことができる。

ここで $L/G=R$ を操作線の傾斜といい、 G, L が一定であれば操作線は直線となる。

2.2 水に対する酸素の溶解度

気体が液体に溶解する場合には前述の Henry および Dalton の法則に従う。なお、溶解した気体の量を容積で表わしたものに Bunsen の吸収係数などがある。しかしこれらの係数は 0~100°C の範囲で求められており、温度が高い場合の溶解度は Zoss⁽²⁾ または Pray⁽³⁾ などの圧力 2,000 psia、温度 77~625 F の範囲で測定したものをを用いねばならない。

分圧が高くなると必ずしも Henry の法則に従わないが、脱気器においては 150°C 程度の温度で分圧も低いところであるため Henry の法則に従うとみてよい。

いま溶解酸素濃度を x' 、分圧を p とすれば

$$x'=ap \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。 a は温度により変る係数である。

$y_2=0$ とおき (2) 式は

$$y=L/G(x-x_2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。

脱気器内の圧力を P とすれば yP が酸素濃度 x のときの y の分圧となり、また ayP が y に平衡な酸素の溶解量となり、(3) 式は

$$x'=ayP=aL/G(x-x_2)P \quad \dots\dots\dots (5)$$

したがって

$$y/x'=\frac{1}{aP}=m \quad \dots\dots\dots (6)$$

で表わされ、 m を平衡線の傾斜という。ある圧力、温度では aP が一定であるため m も一定となり平衡線は直線となる。操作線と平衡線の間隔を第 3 図に示す。

2.3 総括の移動単位数と H. T. U.

高さ(段数)を Z 、総括移動単位数を N_L 、総括 H. T. U. を H_L とすれば

$$Z=N_L H_L \quad \dots\dots\dots (7)$$

と定義する。

移動単位数が 1.0 のときの高さを H. T. U. といい、移動単位数は次式で定義される。

$$N_L=\int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x-x'} \\ =\frac{x_1-x_2}{(x_1-x_1')-(x_2-x_2')} \ln \frac{x_1-x_1'}{x_2-x_2'} \quad \dots\dots\dots (8)$$

x : 溶存酸素濃度

x' : 溶存酸素濃度 x のとき周囲酸素濃度 y に平衡な水中溶存酸素濃度

(8) 式は操作線と平衡線が直線るとき成立する。

このように移動単位数は濃度変化を推進力の対数平均値で除した商として与えられ、H. T. U. を知ることにより高さ(段数)が求められる。

以上のように操作線、平衡線が得られ、さらに総括移動単位数と H. T. U. が得られて脱気器の性能が解析できるものである。

3. 脱 気 の 機 構

脱気の根本問題である水中酸素の拡散による濃度分布の変化の状態を解析すると、吸収あるいは脱気理論としては液体と気体の境界面では瞬間に平衡が成立し、拡散法則に従って外部より内部、または内部より外部へ気体が拡散する⁽⁵⁾。液体中の酸素ガスの濃度を x 、その位置 α, β, γ 、時間 t との間には

$$\frac{\partial x}{\partial t}=D\left(\frac{\partial^2 x}{\partial \alpha^2}+\frac{\partial^2 x}{\partial \beta^2}+\frac{\partial^2 x}{\partial \gamma^2}\right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

の関係が成立する。 D は酸素ガス分子の水中内の拡散係数である。

もっとも簡単な一次元拡散とすれば

$$\frac{\partial x}{\partial t}=D \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha^2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

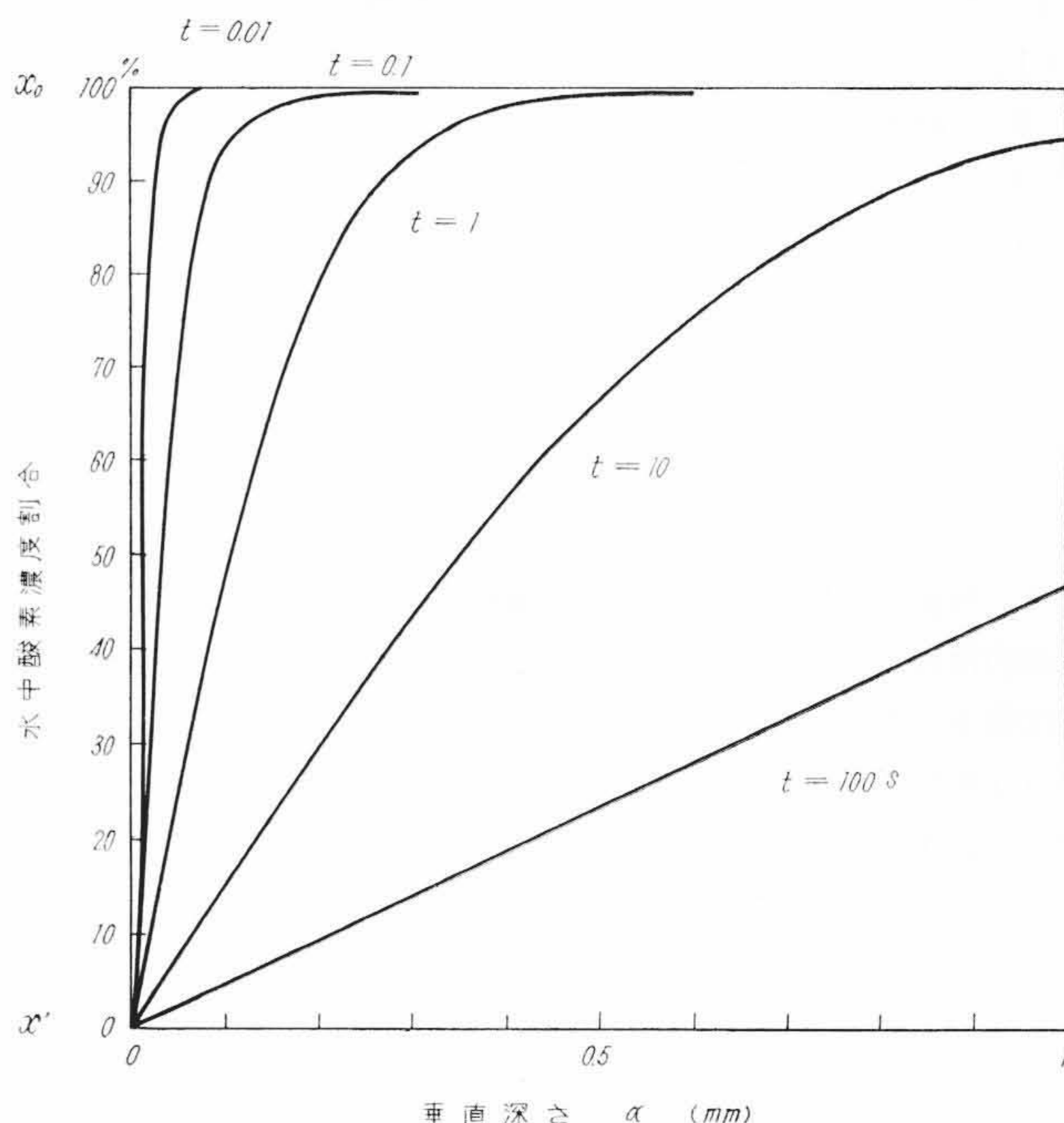
α は液面よりの垂直深さを示す。

境界条件は液面で平衡関係が成立することにより $\alpha=0$ において

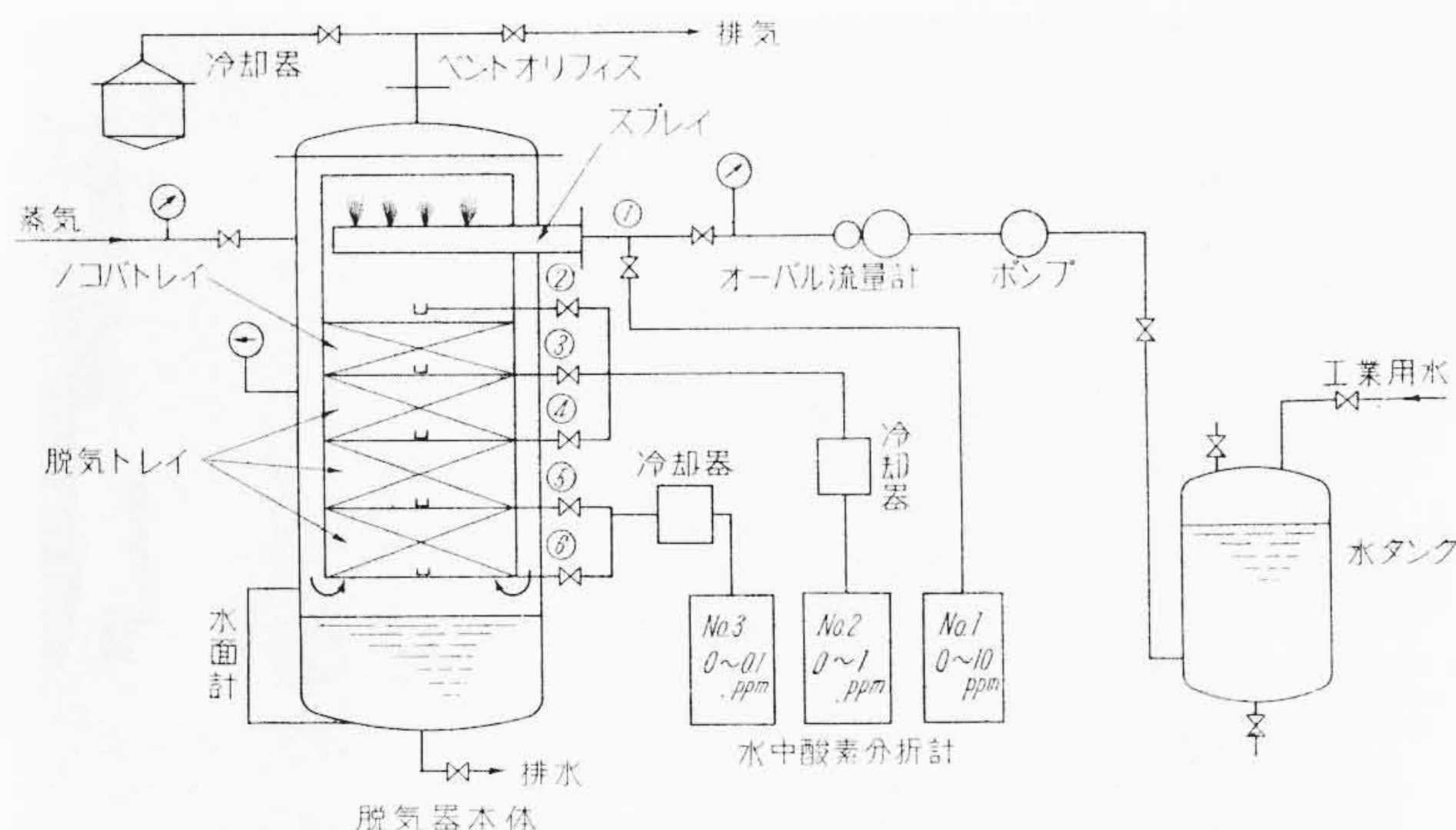
$$x=x' \quad \dots\dots\dots (11)$$

x' は Henry の法則で示される気体との平衡濃度を示す。

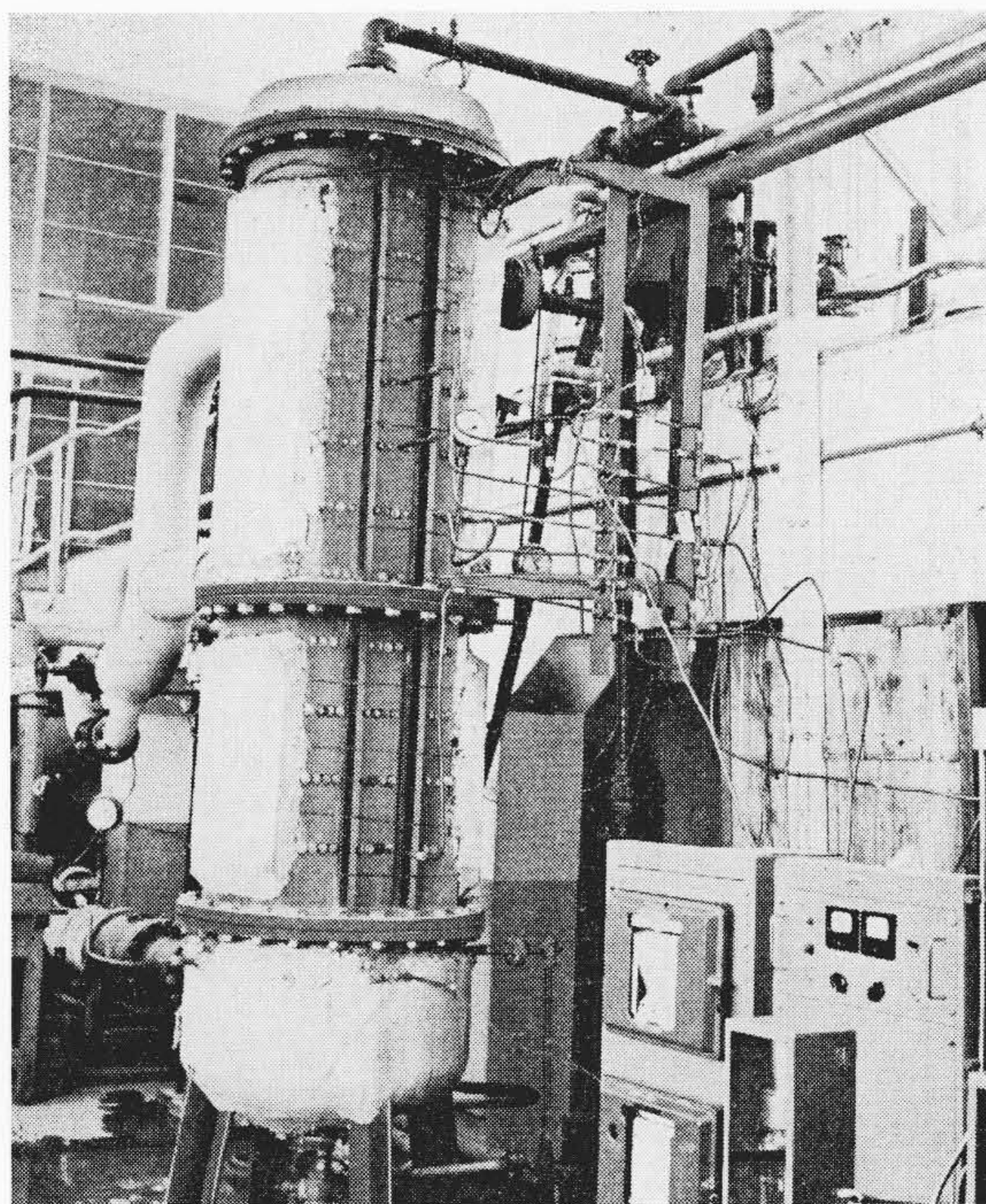
初期条件として水中酸素の濃度が x_0 である場合 $t=0$ において



第4図 水中酸素の濃度分布



第5図 実験装置系統図



第6図 実験用脱気器

$$x = x_0 \dots\dots\dots (12)$$

であり、(11)、(12)式より(10)式を解けば

$$x = (x_0 - x') \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\alpha}{2\sqrt{Dt}}} e^{-\beta^2} d\beta \right] + x' \dots\dots\dots (13)$$

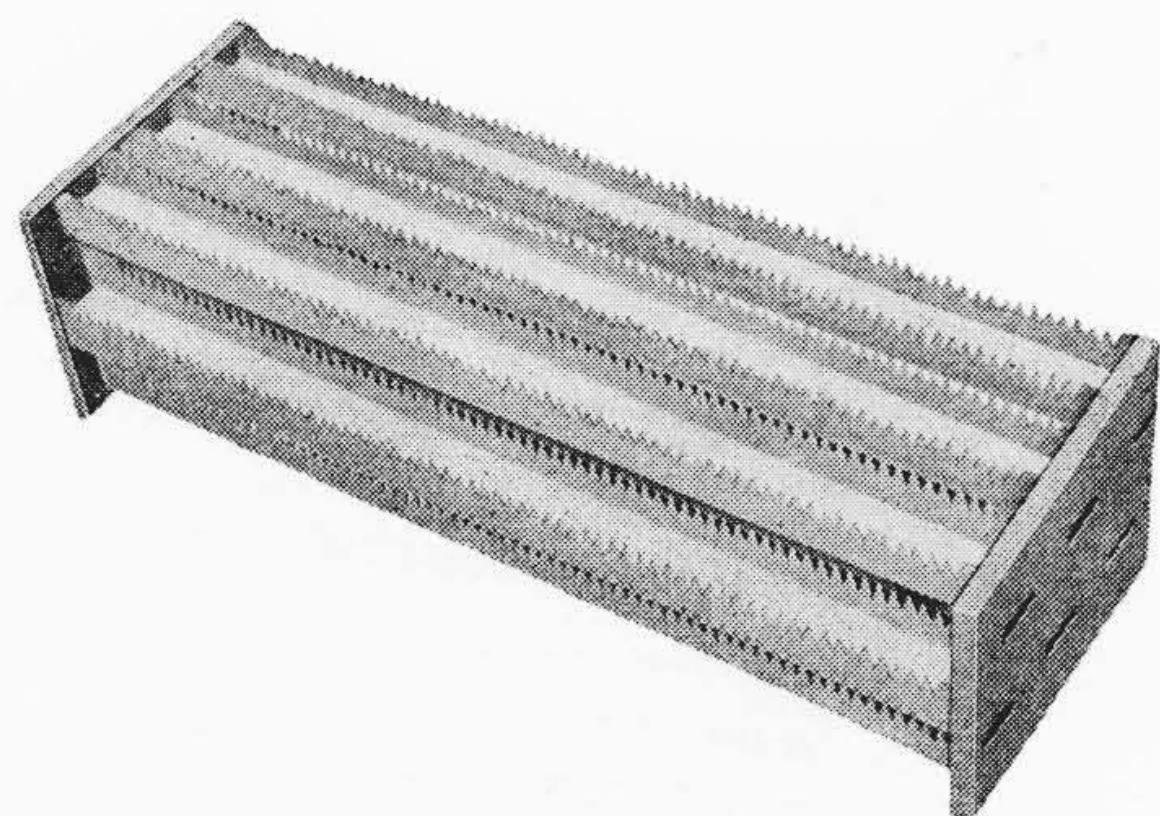
となり、液面よりの垂直深さ α における接触開始後 t 時間の濃度 x が求められる。

(13)式を誤差関数表より求めると第4図のようになり、横軸に垂直深さ α を mm で表わし、縦軸に濃度割合を示す。100% とは初期濃度 x_0 cc/l であり、0 とは平衡濃度 x' cc/l である。

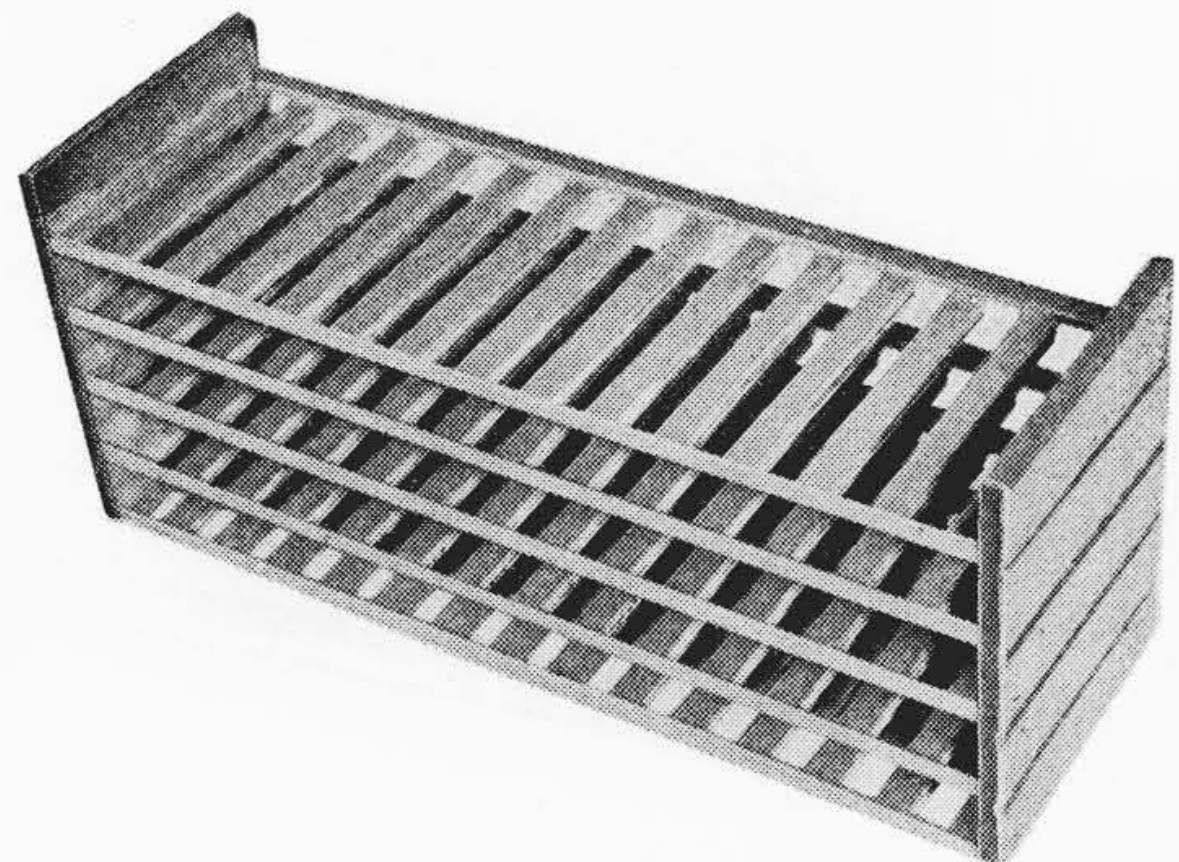
計算には 120°C の場合の $D = 1.33 \times 10^{-4}$ cm²/s を用いた。

第3図で明らかなように接触開始後1秒以内に急激に濃度分布が変わり、垂直深さ α が 0.04mm の位置では1秒後に80%、0.02mm では0.1秒後に70%程度脱気される。これに対し10秒後でも0.1mmの深さの位置では85%程度である。

このように脱気の条件としては平衡濃度が重要なものであり、また垂直深さの浅いところではきわめて短時間に相当程度脱気されることが明らかになった。したがって平衡濃度を可能な限り小さくすることはもちろんのこと、給水を十分かくはんして、その表面積を常に新鮮に保つことが有効である。



第7図(a) A形トレイ



第7図(b) A形トレイ

4. 脱気効果に及ぼす各種要因とその影響

スプレーパイプによりスプレーされた給水は衝撃板に当たって落下の状態になるまでにほぼ飽和温度まで加熱され、第1段階の脱気が行われる。第2段階の脱気はノコバトレイに落下かくはんされる場合に行われる。この際は周囲の酸素濃度が低く推進力は大である。以下脱気トレイに分散し、洗浄かくはんされつつ第3段階の脱気が行われここで最後の仕上げが行われる。

4.1 実験の方法

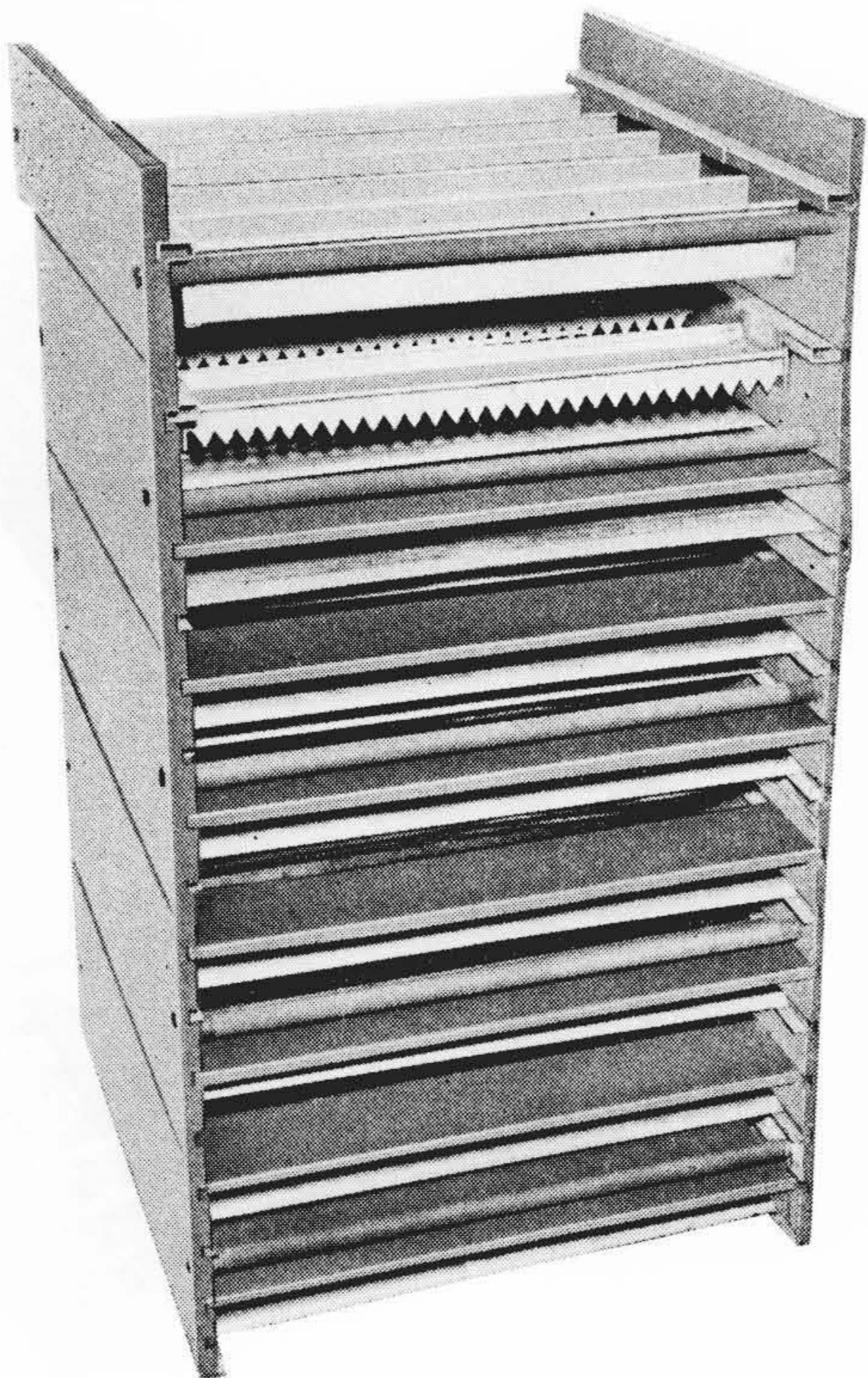
実験装置は脱気器本体、水中酸素分析計および加熱蒸気ならびに給水系統の諸設備などよりなる。第5図に装置の系統図を示し、脱気器本体の外観を第6図に示す。本脱気器の標準処理水量は 5 t/h で、ベンチオリフィス、スプレーパイプの交換をはじめ、脱気トレイの段数を3段から6段まで増減できるよう考慮し、かつトレイは各種形状のもの数種類について実験した。そのうちの代表的なA形およびB形トレイの外観を第7、8図に、日立製作所製品の水中酸素分析計³⁾を第9図に示す。これらの測定範囲はそれぞれ0~10ppm, 0~1 ppm, 0~0.1 ppm であり数点切替記録可能なものである。本実験には水中酸素分析計の精度を化学分析により確認してある。

4.2 トレイの効果と流量の影響

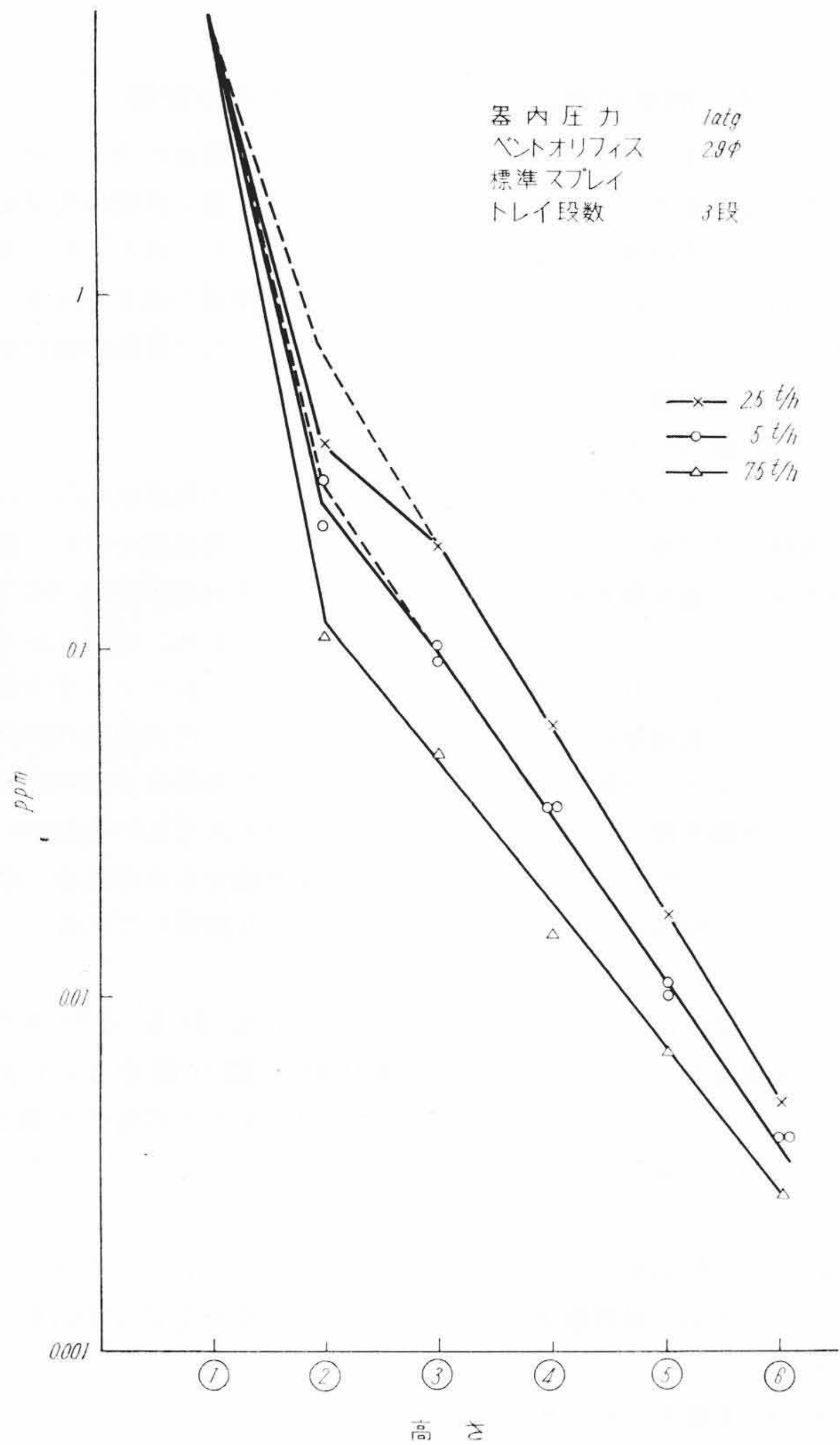
本実験の条件は器内圧力 1 atg, 給水量 2.5 t/h, 5 t/h, 7.5 t/h で入口給水酸素濃度 6.1 ppm である。第10図と第11図にA形およびB形トレイの実験結果を示す。横軸には高さを取り各数字は第5図に示す測定位置を表わし、縦軸は水中酸素量を ppm で表わす。この結果よりトレイ部分の脱気効果は直線で表わされ、流量の変化はこの直線の傾斜を変えることが判明し、なおスプレーの効果が大いなる要素を占め、最終酸素含有量にまでその影響を及ぼしていることがわかる。

4.3 A, B形トレイのH.T.U.

前述のように H.T.U. は移動単位数 1.0 のときの塔の高さをいうものであり、給水量の影響、すなわち第10、11図の、こう配の変化を H.T.U. で表わす場合は非常に便利である。化学工学においてはラシヒリングやサドルなどについて H.T.U. が求められてあり、

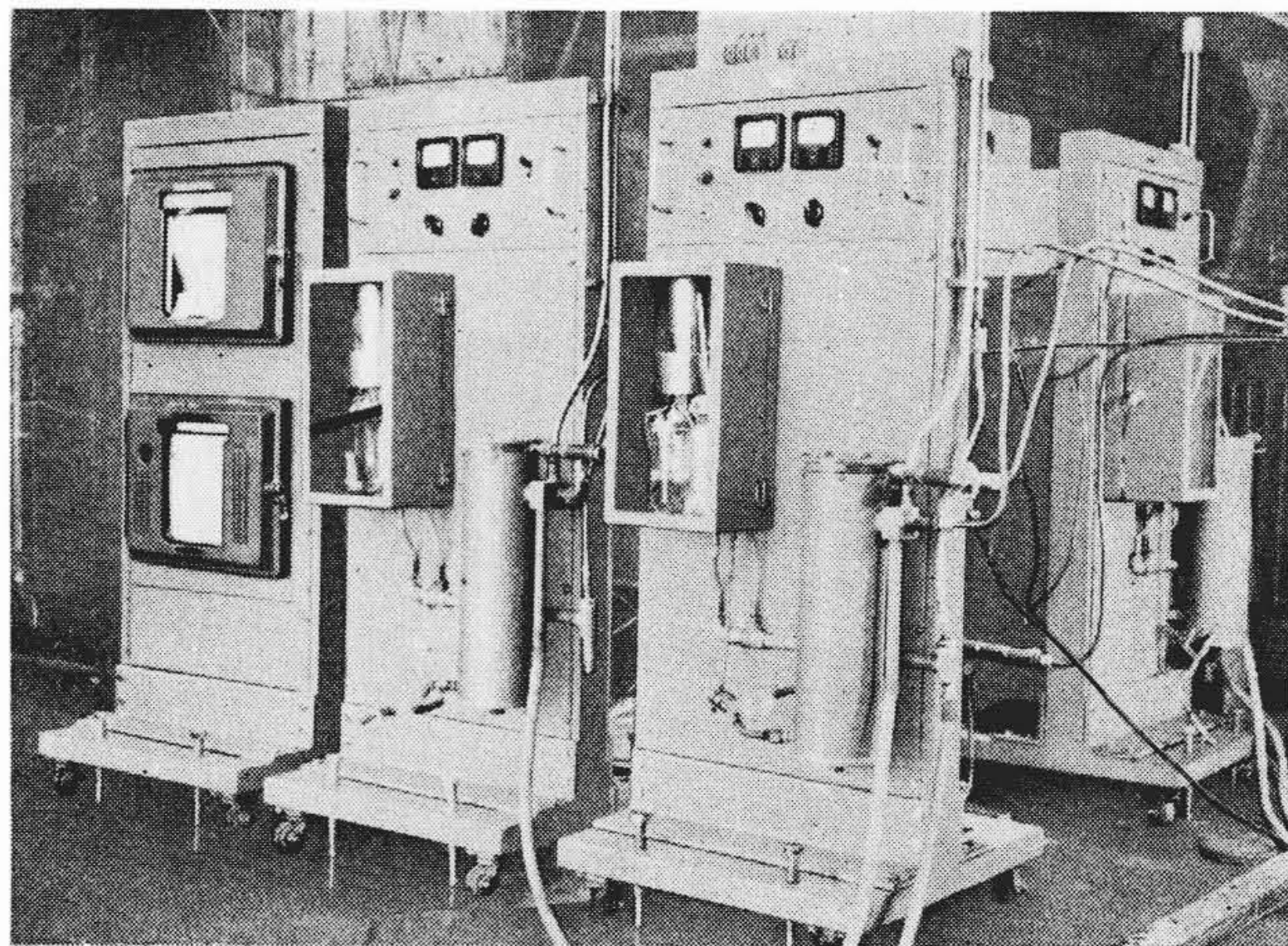


第 8 図 B 形 ト レ イ

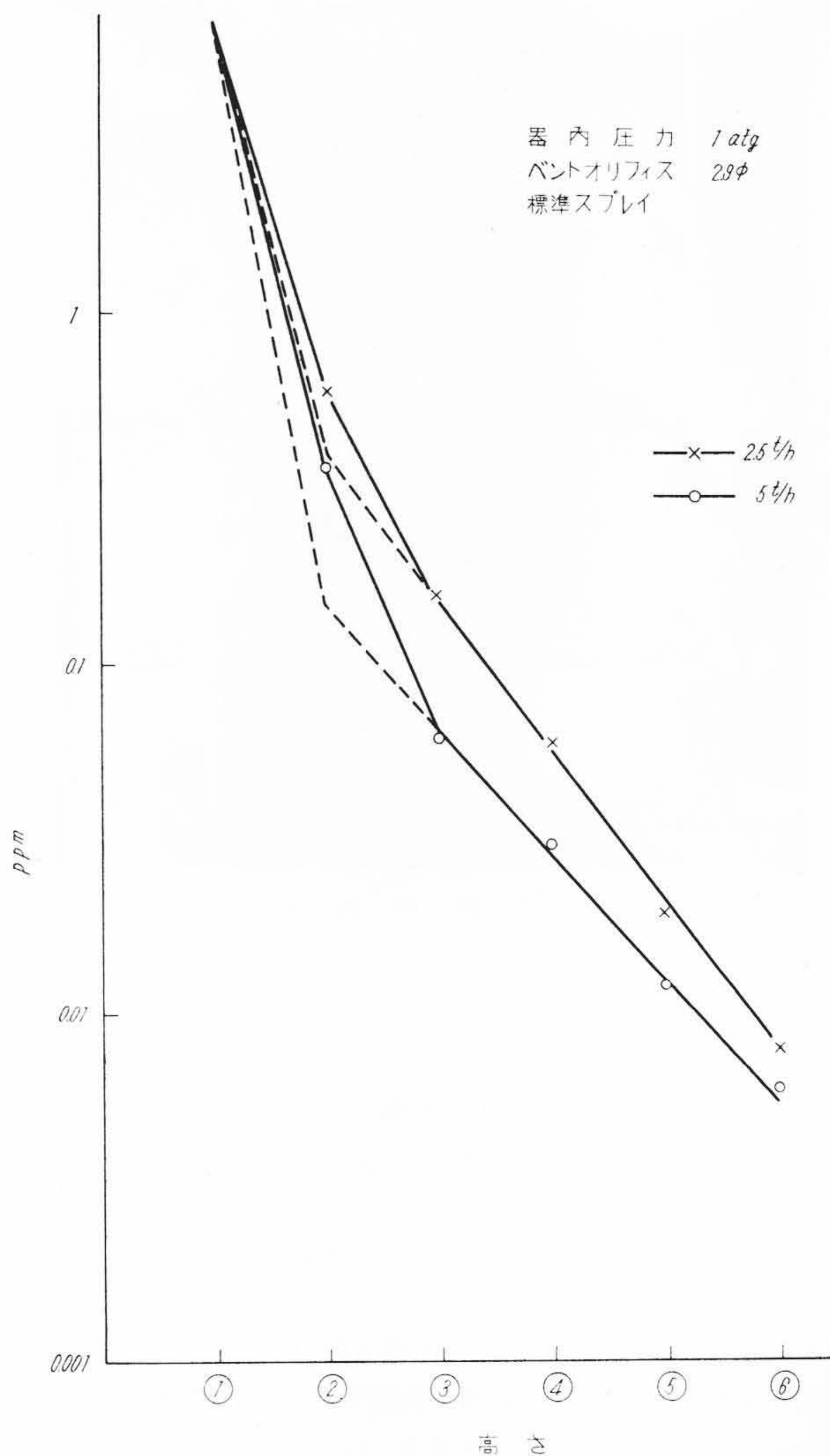


第 10 図 トレイの効果と給水量の影響 (A形トレイ)

また Kittredge はトレイ一段当りの H. T. U. という表示の仕方で表わしている。同様な考え方より給水量に対する A 形および B 形の



第 9 図 水 中 酸 素 分 析 計



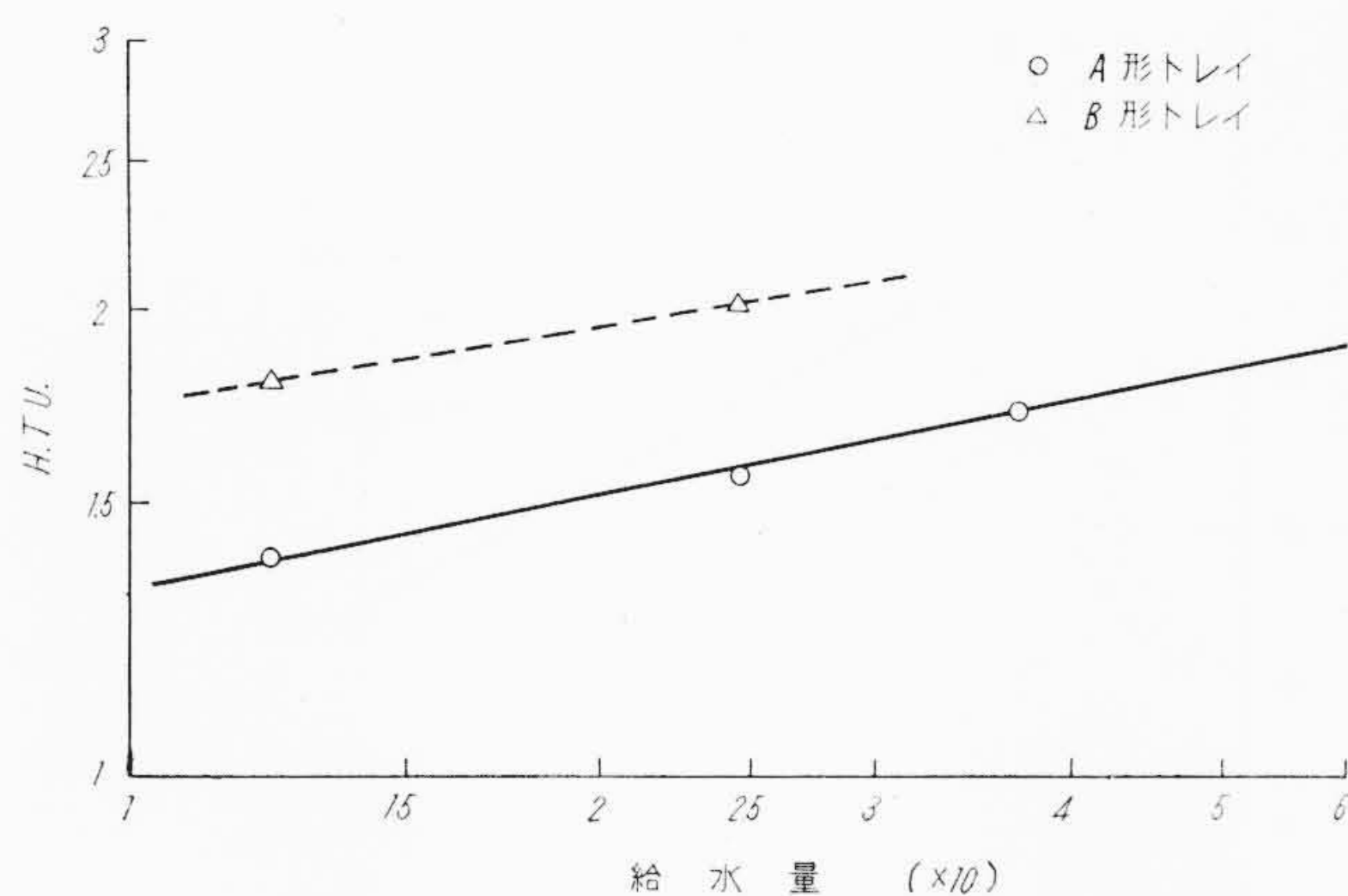
第 11 図 トレイの効果と給水量の影響 (B形トレイ)

H. T. U. を(7)式より求めると 第 12 図 となる。横軸にトレイの負荷をとり、縦軸に H. T. U. を m で表わす。

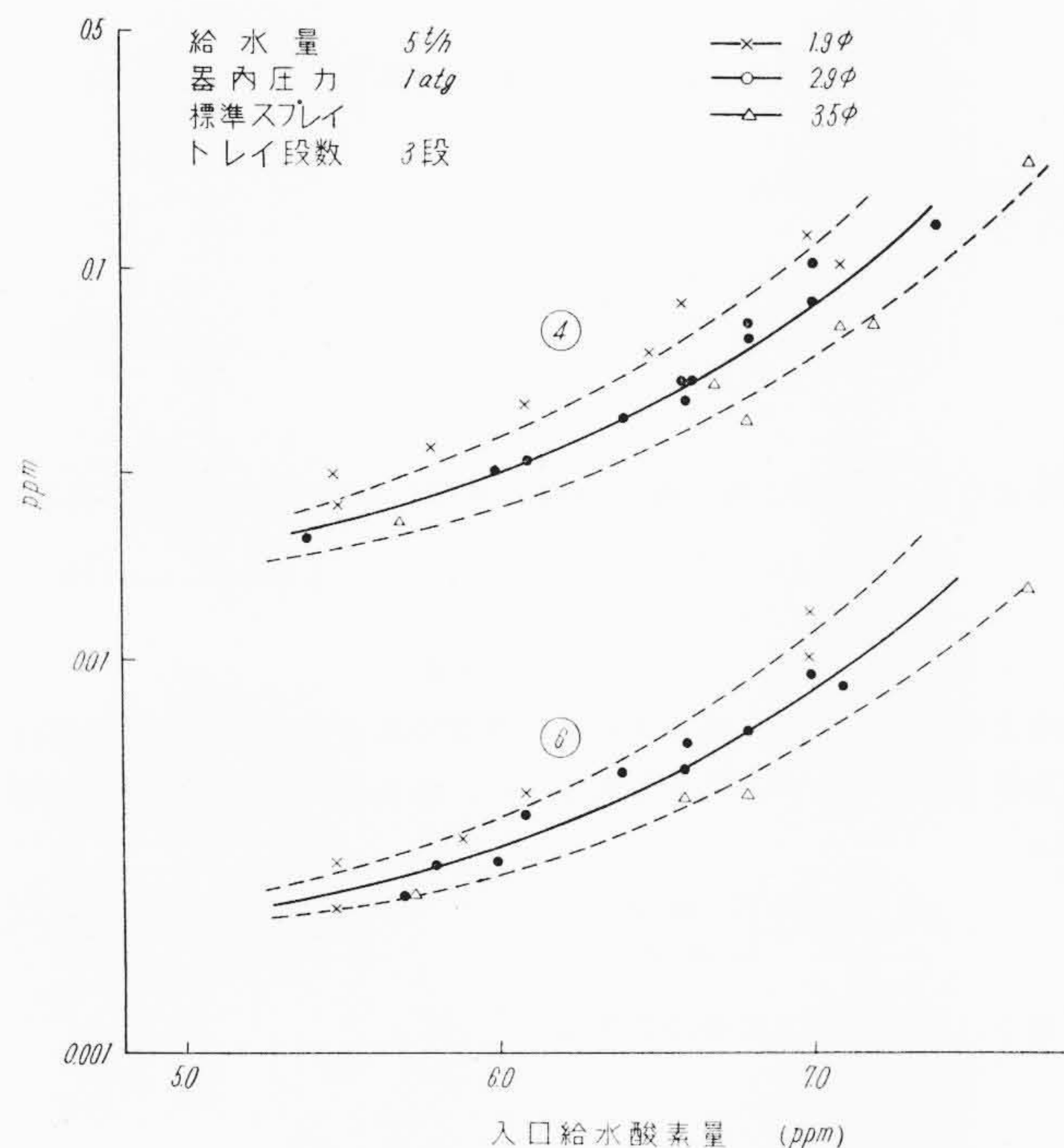
Sherwood⁽⁴⁾ らは充てん塔について H. T. U. の実験式として次のものを求めている。

$$H_L = A \left(\frac{L}{\mu} \right)^\alpha \left(\frac{\mu}{\rho D_L} \right)^{0.5} \dots \dots \dots (14)$$

L : 給水量
 μ : 粘性係数



第12図 給水量とH.T.U.の関係



第13図 ベントレイトの影響

ρ : 密度
 D_L : 拡散係数
 α : 充てん塔に固有な係数
 A : 常数

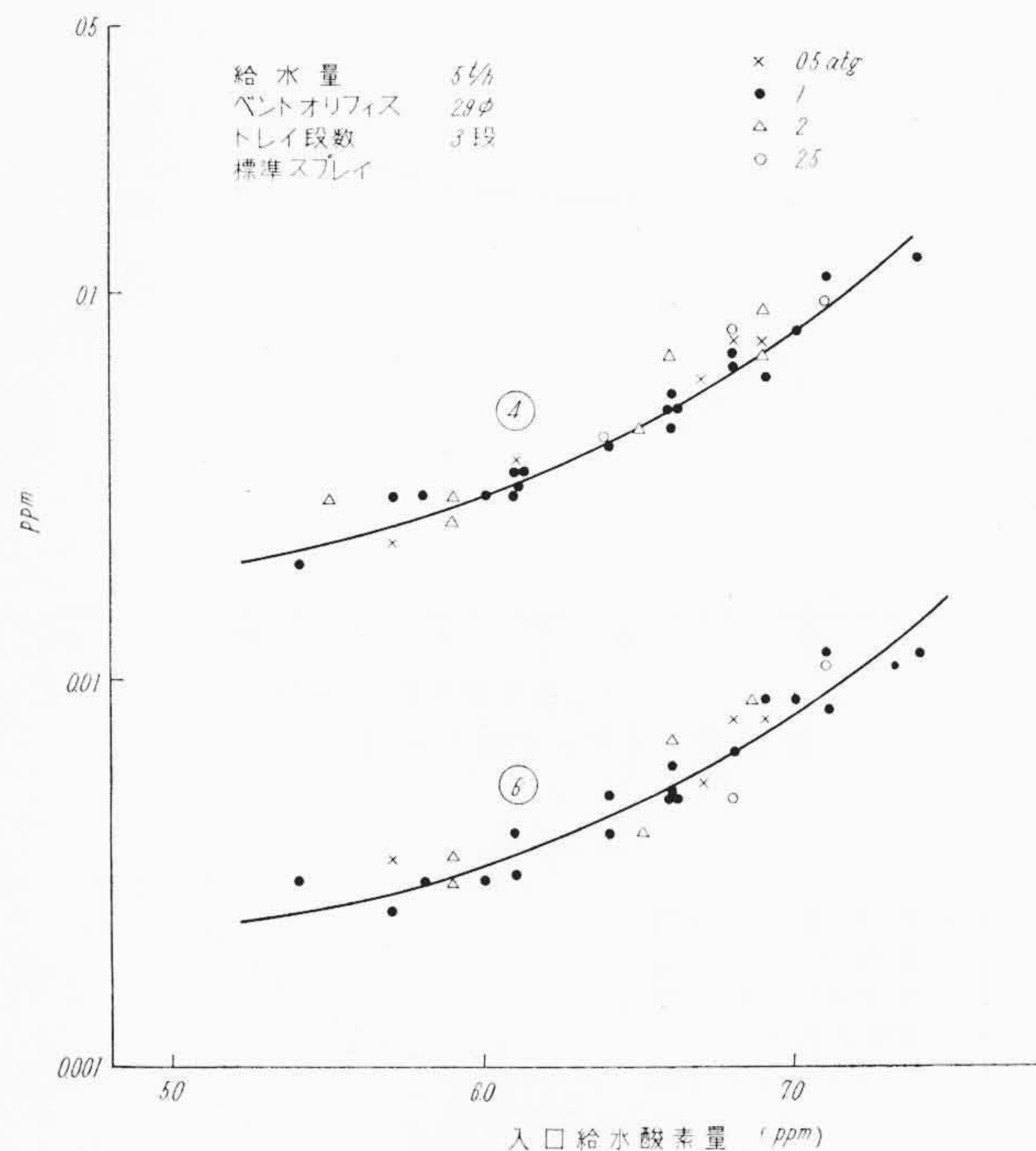
(14)式の A と α を求めれば各圧力、温度における H_L の近似値が得られる。第12図よりB形トレイの A および α を求めるとそれぞれ 2.86×10^{-4} 、0.22となる。

4.4 ベントレイトの影響

ベントレイトを大きくとれば排出される酸素量が多くなって、給水の周囲の酸素濃度が低くなり推進力が増大し脱気性能も向上されるものと考えられるが、給水量5 t/h、器内圧力1 atgの場合のベントレイトの影響は第13図に示すようにトレイ段数を増減できるほどには影響を及ぼさないことがわかる。

4.5 脱気器器内圧力の影響

器内圧力の影響はベントレイトの影響との関連もあるが、給水量5 t/h、オリフィス直径2.9φ、標準スプレイを使用しトレイ3段の場合に器内圧力0.5、1.0、2.5 atgのおおのについて実験を試み、第14図に示す結果を得た。これより器内圧力が0.5~2.5 atgの範囲ではほとんど影響がないものと推定される。しかし第14図より、計算で比較検討すれば第1表のように器内圧力の変化の影響は圧力の高いほどH.T.U.がわずかながら小さくなる傾向を示している。



第14図 器内圧力の影響

第1表 器内圧力の影響

圧力 (atg)	平衡線のこう配 (m)	ベント量 (kg/h)	L/G	x_1' (cc/l)	移動単位数 (N_L)	H.T.U. (H_L)
0.5	42.6	5.1	0.872	0.0091	4.60	0.156
1	29.3	6.8	0.865	0.0132	4.60	0.156
2	18.04	10.2	0.850	0.0211	4.68	0.154
4	(9.08)	16.95	0.845	0.0417	4.88	0.147

圧力を高くすればベント量は増加するが、平衡濃度が大きくなるため増加分を相殺しているものと考えられる。

4.6 トレイ段数の影響

トレイの段数を増加した場合、もしトレイのH.T.U.が変化するものと仮定すれば

- (1) 給水の落下距離が長くなることによりトレイ上下間の圧力差に相異を生ずるための影響
- (2) 加熱蒸気の随伴する酸素量が相異することとなり、推進力に変化をきたすために生ずる影響

などがあげられる。

給水量2.5、5.0、7.5 t/hの場合について実験した結果を総合すると、段数の影響はトレイのH.T.U.には変化を及ぼさないことが判明した。すなわち段数を増加することにより給水中の酸素はほとんど完全に脱気できることとなる。

4.7 入口給水酸素量の影響

4.7.1 スプレイ部分

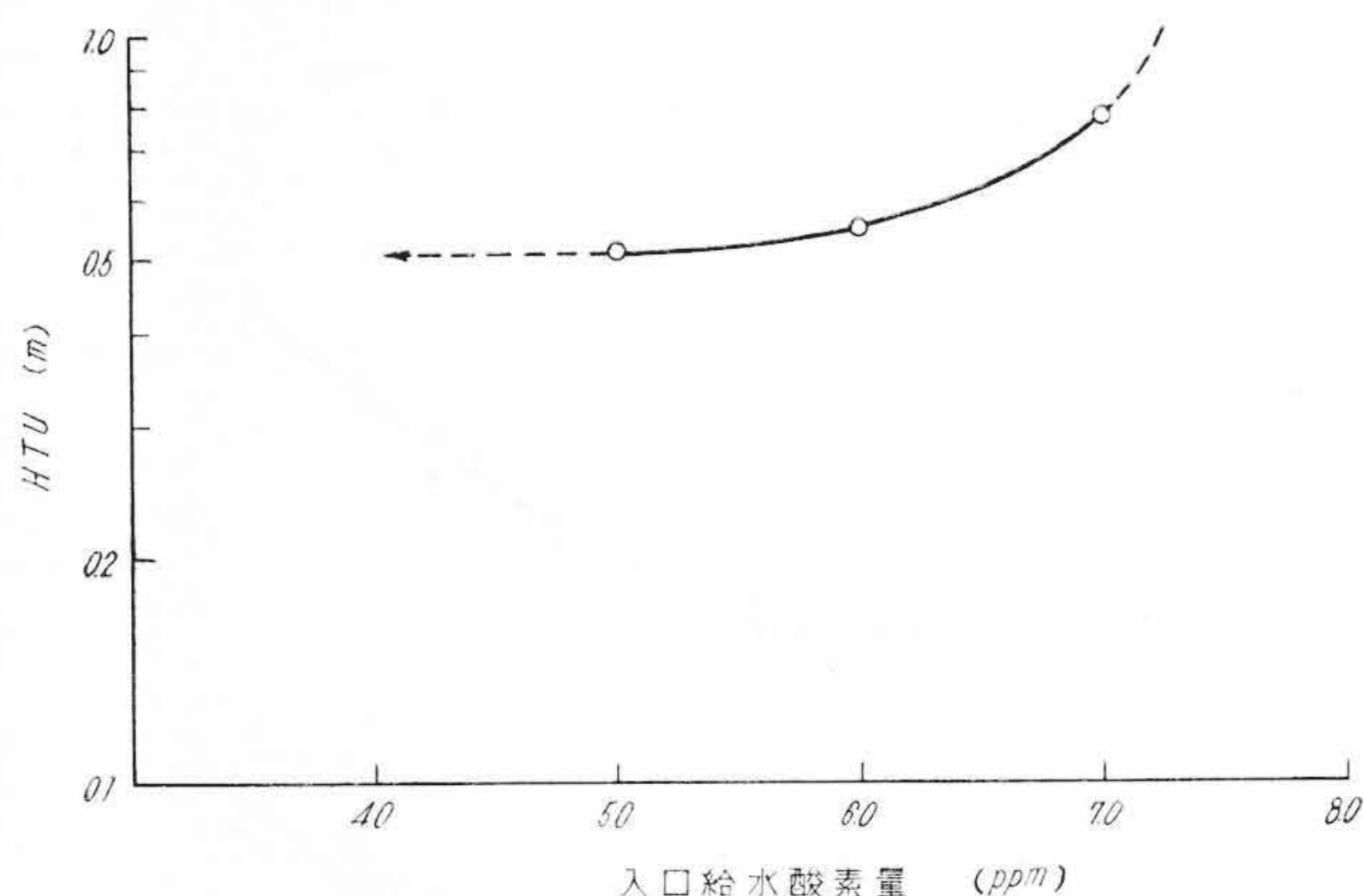
スプレイ部分についてのH.T.U.を実験結果より求めると第15図となり、入口給水の酸素濃度5 ppm以下においてはH.T.U.はほとんど一定と見なされる。

4.7.2 トレイ部分

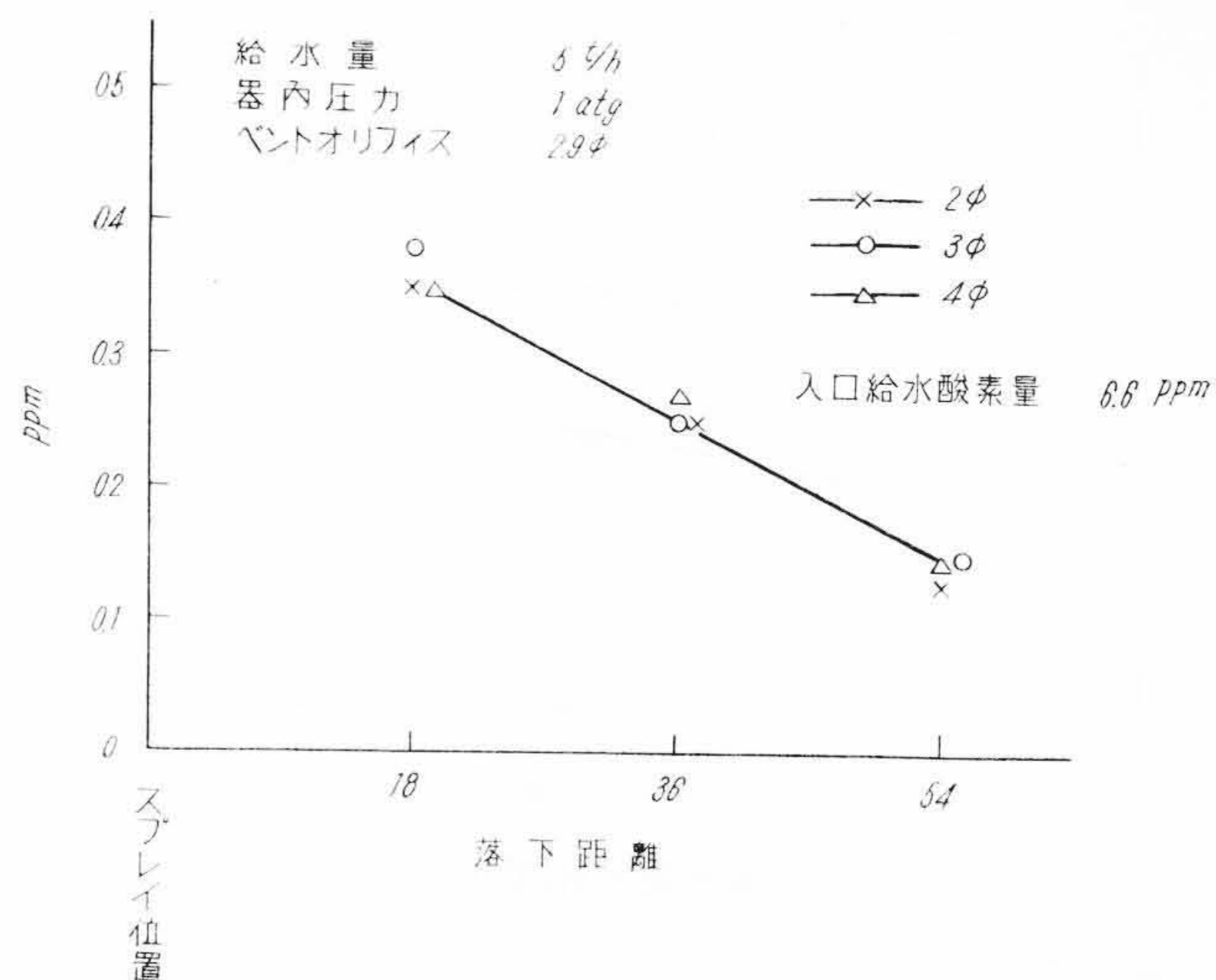
給水量5 t/hの場合における入口給水酸素量の影響について試みた実験結果は第16図に示すように、入口酸素量の変化はトレイ部分のH.T.U.にも変化を与えない。

4.8 スプレイの孔径と落下距離の影響

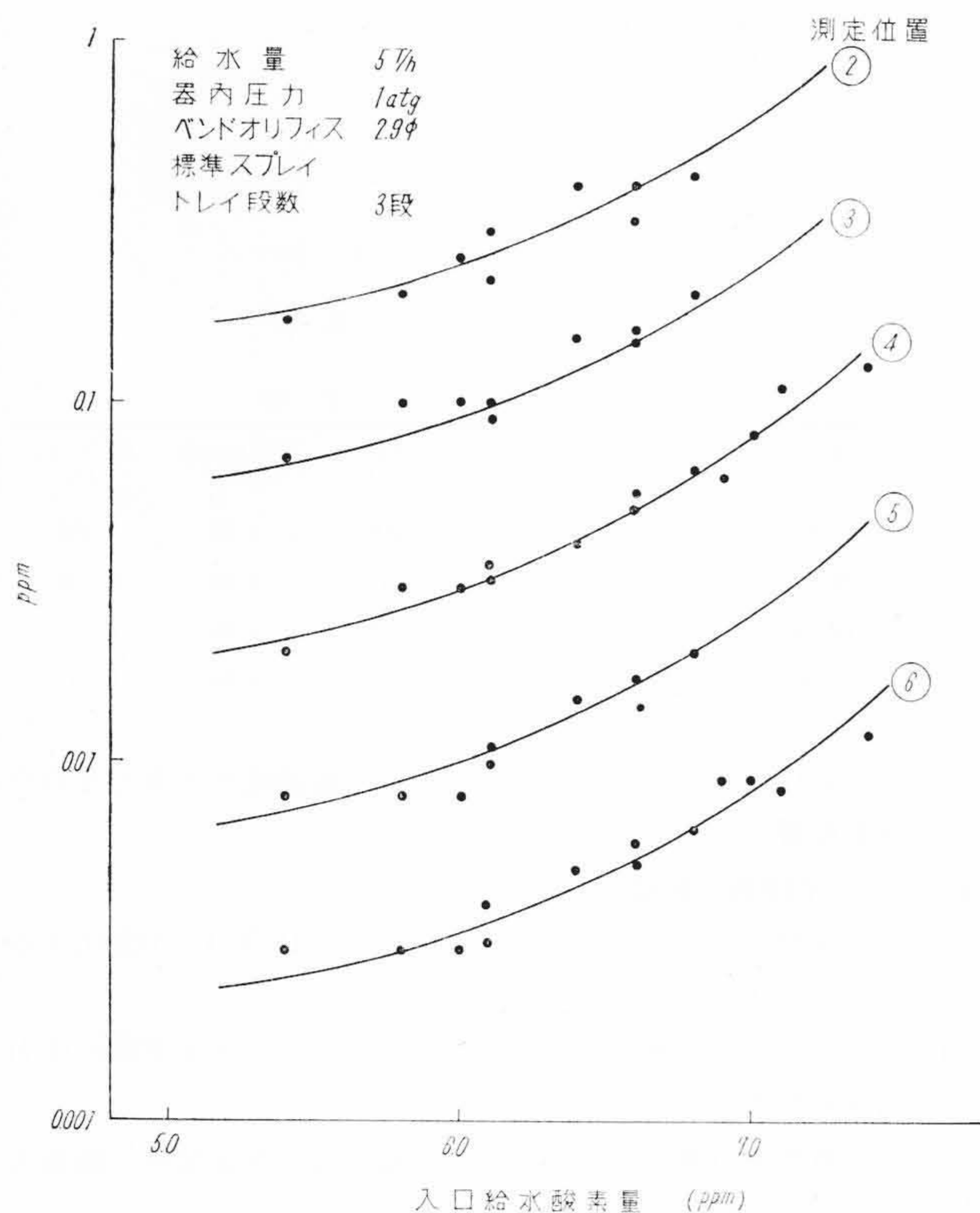
スプレイパイプの孔径を変化した場合は、粒子の表面積が増減しかつ温度の伝達速度も変化するもので、これが脱気性能に、どのように影響をもたらすか試みた結果は第17図のようになる。実験条件はトレイを抜き去りスプレイのみとし、給水量5 t/h、器内圧力1 atg、



第 15 図 スプレイ部の H. T. U.



第 17 図 スプレイの孔径および落下距離の影響



第 16 図 入口給水酸素量の影響

ベントオリフィス 2.9φ の場合でスプレイ面積は同一である。この結果より、この程度の孔径変化に対してはほとんど影響ないものと判定され、また脱気性能は落下距離に、ほぼ直線的な変化をすることが確認された。このように脱気は、落下距離に比例して進行するがトレイの効果に比較するときわめて小さく、トレイにおけるかはんおよび洗浄が H. T. U. に及ぼす影響が非常に有効であるとともにスプレイの衝撃粉碎の効果もゆるがせにできないことがわかる。

5. トレイ段数の求め方

スプレイを併用する脱気器の所要段数は今までに述べた実験結果より簡単に求められる。またスプレイを併用しない場合でも入口給水の酸素濃度を知れば計算により求めることができる。すなわち入口給水の酸素濃度を x 、器内圧力、ベントレイトを与えれば x' は求められ、トレイ下段の最終酸素濃度を保償するための総括移動単位数 N_L が算出できる。今、ある段上において接触する二相が完全に平衡に達し、しかも両相の組成が各所で均一であると仮定した理想

塔の理論的段数を N_T とすれば

$$N_T = \frac{\ln \frac{x_1 - x_1'}{x_2 - x_2'}}{\ln \frac{x_1 - x_2}{x_1' - x_2'}} \dots \dots \dots (15)$$

で与えられ、平衡線と操作線を直線と見做した場合次の関係がある。

$$\ln(1 - E_p) = -N_L \frac{R}{m} \dots \dots \dots (16)$$

E_p : トレイの部分効率

段上の給水が十分に混合され均一濃度であるとすれば部分効率は段効率 E_M に等しいと考えられるため、塔全体に対する総括塔効率 E は

$$E = \frac{\ln[1 + E_p(m/R - 1)]}{\ln m/R} \dots \dots \dots (17)$$

となり、したがって必要段数 N は

$$N = \frac{N_T}{E} \dots \dots \dots (18)$$

で求めることができる。

6. 結 言

以上脱気器の理論的取扱い、脱気機構および脱気効果に及ぼす各種要因の影響を述べたが、結局脱気器において平衡濃度に影響するものはベントレイト、器内圧力、入口給水酸素量であり、かくはんに対してはスプレイ、トレイおよび流量などで時間に対してはトレイの段数に関係ある点などが解明でき、多数の実績が示すように使用条件に最適にして、経済的な設計が容易に得られ、斯界の要望に十分そえるものと思う。本報告は定常運転状態における性能に関するものであるが、さらに各種運転状態についての解析研究も重要であり、今後もプラント全体の経済性あるいは運転性能を向上させるための努力をつづけ、火力発電所の発展に寄与したい。

参 考 文 献

- (1) Kittredge: Power April (1958)
- (2) Zoss, Suci & Sibbit: ASME 76, (1954)
- (3) Pray, Schweickert & Minnich: Ind. Eng. Chem., 44 (1952)
- (4) Shewood & Holloway: Trans. A. I. Ch. E., 36, (1940)
- (5) 松山卓蔵: 化学機械 14 (1950)
- (6) 化学工学便覧
- (7) 藤田重文: 化学工学 (I)
- (8) 岩淵芳雄: 日立評論 41, 258 (昭 34-2)