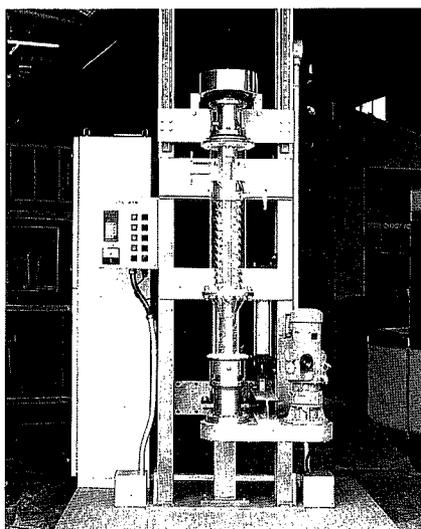


## 目 次

## CONTENTS

= 特別講演抄録 =		
1	分 級	The Classification
8	CFDによる攪拌槽内流動解析	Flow Analysis for a Stirred Tank by Computational Fluid Dynamics (CFD)
15	PMX-98 化学プラントへの適用例	PMX-98 Application to The Chemical Plant
22	静電気によるGLの損傷とその対策	Troubles of Glass Lined Equipments by Static Electricity and Countermeasures against It
28	内部ジャケット付リアクターの溶接技術	Welding Engineering in Reactor with Inner Jacket
32	高粘度液用薄膜蒸発機「エクセバ」の蒸発性能	The Evaporating Performance of The Thin Film Evaporator "EXEVA" for High Viscous Products
37	イオンスクラバー実装置紹介	Full Size Ion Scrubber
40	新型球状充填材の開発	Aptitude Tests of Newly Developed Spherical Media at Anaerobic Bio Reactor (AB Reactor)
44	深層曝気装置による貯水池の水質改善	Improvement of Impounded Water Results Achieved by Use of Hypolimnetic Aerator
49	エマルジョン型高分子凝集剤	Application of New Emulsion Type Synthetic Flocculants
52	社内ニュース	TOPICS



### (写真説明)

ポリマーの高品質化、高機能化が進む高分子化学工業界では高粘度化、高温化する製品の処理に適した経済的で高性能な機器へのニーズが高まっています。

このようなユーザーズに応じて当社が開発した高粘度液用薄膜蒸発機EXEVA（エクセバ）は、超高粘度物質の脱溶剤、脱モノマー、脱揮を可能とした新しいタイプの薄膜蒸発機です。

In the polymer chemistry where development of higher quality and performance polymer is booming, there is a growing demand for more economical and higher efficient equipment suitable for processing more highly viscous and higher temperature products. To meet such users' needs, Shinko Pantec has developed the "EXEVA," the new type of film evaporator for handling such highly viscous liquids. The "EXEVA" is capable of removing solvent, monomer and volatile products from liquids having ultrahigh viscosity

# 分 級

## — The Classification —



講師 東京大学生産技術研究所  
助教授 工学博士  
山本 英夫  
Dr. Hideo Yamamoto



抄録：(化) 製品開発課  
田村 俊彦  
Toshihiko Tamura

This is the abridgement of the lecture given by Dr. H. Yamamoto.

To estimate a classifier or to confirm the sharpness of particle size distribution, it is required to measure particle size. The wrong way of measurement leads to the scattering of products however.

On this abridgement, principles of classification are introduced and then the estimation of classifier and the measurement of particle size are explained.

### まえがき

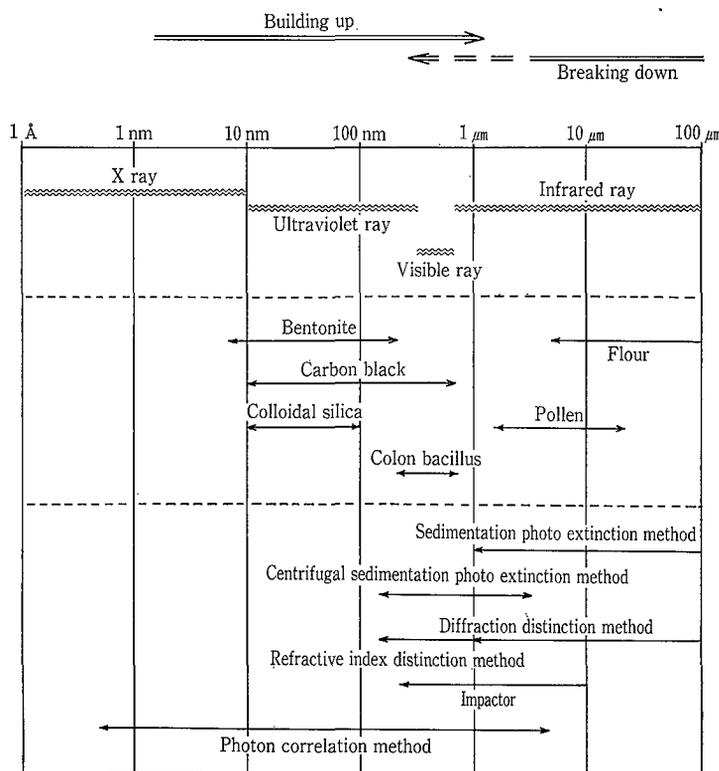
粒子の大きさが本当に揃っているのかどうか、あるいはこの粒子を揃える機械は性能がいいのかという評価をするためには、粒子の粒度分布を測定しなければなりません。この粒度分布の測定方法を間違えると製品が非常にばらつき、品質に対する信頼度が薄いものになってしまいます。本講演では、まず分級原理の解説を行い、分級結果の評価方法と粒子の粒度について説明を行います。

### 1. 分級の目的と分級原理

粒子を分けることを一般に分級と呼んでいますが、はじめに分級の定義を明確にしておきたいと思います。分級とは、字のごとく級(クラス)に分けることを意味します。特性が連続的に異なる粒子群から、目的とする特性範囲だけに区切って、いくつかの集団に分けていく操作を一般に分級と呼んでいます。特性としては、粒子の大きさだけでなく、粒子の形状、粒子の密度、電気的な性質、化学的な組成の違いや色の違いもあります。こういった特性が連続的に異なり広い幅を持った粒子の集合体の中から、ある特殊な範囲だけを選びだして区切っていくという操作を分級といいます。ただし多くの場合、単に分級といえ、主に粒子の大きさに注目してある種の大きさの幅に区切って行くこと、いわゆる粒度分級を意味します。それでは、現在のどのくらいまで粒度分級が可能かといえますと、だいたいミクロンオーダーくらいまでは技術が確立しているといえます。しかし1 μm以下のものについては大変難しいといわざるを

えません。

第1図は、種々の粒子の大きさを比較したものです。100 μm から 1 Å までの範囲で粒子の大きさを比較しています。また、粒子を作る方法として、粉碎法いわゆるブレイクダウン法と粒子を合成して作るビルディングアップ法を用いた場合の粒子製造の限界、並びに各粒子測定方法の

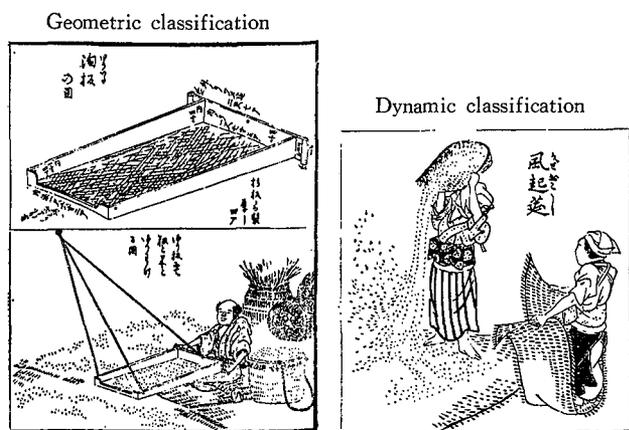


第1図 粒子径と測定方法  
Fig. 1 Particle sizes and measurement methods

第 1 表 材料と粒径範囲

Table 1 Materials and spheres of particle size

Materials	Spheres of particle size
Powder metallurgy	500~ 10 $\mu\text{m}$
Fine ceramic	1~ 0.1 $\mu\text{m}$
Toner for electrophotography	15~ 5 $\mu\text{m}$
Resistance, dielectric substance	5~ 0.5 $\mu\text{m}$
Magnetic substance for sintering	5~ 0.05 $\mu\text{m}$
Material for membrane	1~ 0.01 $\mu\text{m}$
Carrier for electrophotography	0.1~ 0.01 $\mu\text{m}$
CVD	0.8~0.005 $\mu\text{m}$
Ultra-fine metal catalyst	0.05~0.005 $\mu\text{m}$
Magnetic fluid	0.01~0.001 $\mu\text{m}$



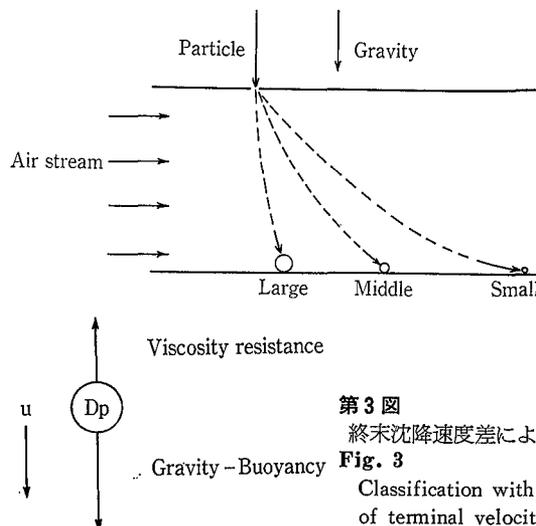
第 2 図 古典的粒度調整法  
Fig. 2 Classical methods to regulate particle size

測定可能範囲も示しております。第 1 表に、実際に工業的規模で使われている粒子の大きさを示します。最近注目を浴びているファインセラミックスは、1~0.1  $\mu\text{m}$  程度いわゆるサブミクロン領域にあります。焼結性が良くなることから、さらに小さい粒子が望まれているのが現実ですが、ハンドリングが困難なため 0.1  $\mu\text{m}$  が限界となっています。ただし、非常に粒度幅が狭い、粒の大きさの揃った粒子が望まれております。金属超微粒子触媒など非常に細かい粒子が用いられていますが、実際に粒度を揃えるのは非常に難しいことです。

第 2 図に示しますように、分級はその分級原理により、大きく、幾何学的分級と動力的分級に分けられます。幾何学的方法とは篩分けのことであり、動力的方法とは、風起しに代表される粒子の大きさにより生じる運動速度の差を利用して行う分級のことです。

動力的分級の原理は、粒子と流体との間に相対運動を起こさせ、その相対運動の差により分級を行うものです。粒子と流体との間に起こる相対運動の原因には、粒子自身の動力的性質である慣性力、ブラウン運動力とエネルギー勾配場による重力、遠心力、静電気力、熱泳動力などが考えられます。基本的な原理はいずれの場合も同様ですので、ここでは第 3 図を用い、重力による場合を例に説明します。

平行平板状のダクト内に気流を流しておき、粒子を上部より気流中に導入しますと、粒子には重力が働き、気流中に沈降し始めます。粒子が沈降始めると空気より粘性抵

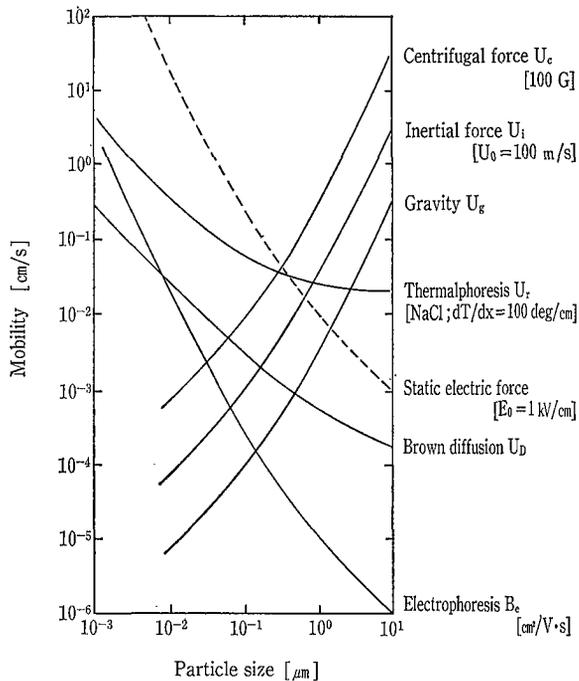


第 3 図  
終末沈降速度差による分級

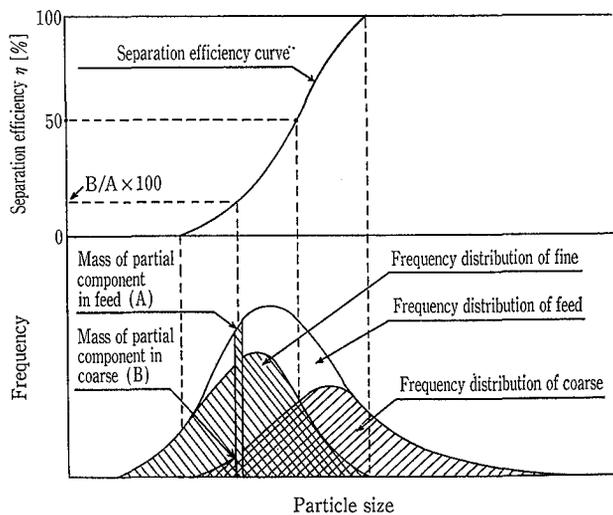
Fig. 3  
Classification with difference of terminal velocity

抗を受け始め、粒子の沈降速度とともに粘性抵抗は増大し、重力と粘性抵抗がつり合う点で沈降速度は一定となります。このことは、雨粒が地表に到達するとき、一定の速度で落ちてくることを思い浮かべて頂ければ理解しやすいと思います。この一定で沈降する際の沈降速度は、粒径  $D_p$  の関数となり、大きい粒径のものほど沈降速度も大きくなります。今、気流が左から右に流れているところに粒子を落としますと、粒子は気流に乗り右側に運動しますが、同時に重力により下方にも沈降しますので、第 3 図の破線に沿った方向に運動します。ところが下に向かう速度すなわち沈降速度は、粒子が大きいほど大きくなりますから、大きい粒子は短い時間で下面まで到達し、気流に乗りながら比較的近い場所に位置することになります。一方、小さい粒子は非常に沈降速度が遅いため、この気流に乗って遠くまで運ばれた後、下面に沈降することになります。このように粒子の大きさにより下面に到達する距離が異なりますので、各々個別に回収することにより分級が行われることとなります。これが分級の基本原理であり、こういった原理に基づき大きさ別に効率良く分ける装置が種々開発されております。

粒子と流体の間に相対速度を発生させるための力として、重力と遠心力が容易に想像できるわけですが、この他に慣性力があげられます。慣性力とは、粒子が流体とともに流れている場合に、流体の急激な変化に追従しないで同方向の運動を持続し続けようとする力です。これは、自動車がカーブする際の体の揺れを想像すると理解しやすいと思います。このようにある大きさを持った物体が運動をしているときには、必ず慣性力が存在します。慣性力の大きさは粒子の大きさによって異なりますので、この慣性力を利用して粒子を分けることもできます。第 4 図は、粒径と慣性力や重力、遠心力などによる移動速度を表したものです。例えば、1  $\mu\text{m}$  の粒子の沈降速度は 0.1 mm/sec 以下であることが読み取れます。移動速度が大きいほど分級が容易となりますので、粒子が大きいほど分級が容易であり、逆にサブミクロン領域では、100 G の遠心力でさえ 1 秒間に 1 mm しか移動しなくなり、重力は利用が不可能な領域となります。



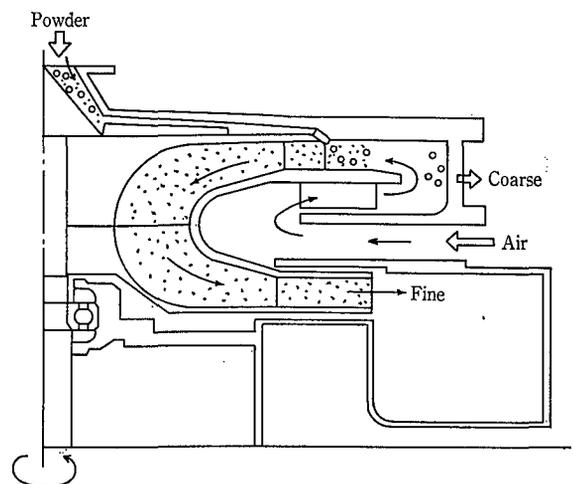
第4図 粒子径と移動速度  
Fig. 4 Particle size and mobility



第5図 部分分離効率曲線  
Fig. 5 Partial separation efficiency curve

## 2. 分級の評価と分級効率

実際に分級を行った場合の分級の評価方法として、分級効率を考えなければなりません。ある分級機に原料を入れて大きい粒子と小さい粒子に分けた際に、どのような状態に分かれているのか、本当に大きい粒子と小さい粒子に分かれているのかを評価する必要があります。原料粒子の粒度分布が第5図に示す<sup>2)</sup>ような分布の場合に、分級機に要求されていることは、ある大きさから右の部分(大きい粒子)と左の部分(小さい粒子)に分けることですが、実際には斜線に示すような分布になります。粗粉側に取り出された粒子は、大きい粒度分布を持ち、微粉側に取り出された粒子は、小さい粒度分布を持つといった状態となり、ある大



第6図 ターボクラシファイア構造断面図  
Fig. 6 Structural cross section of TURBO CLASSIFIER

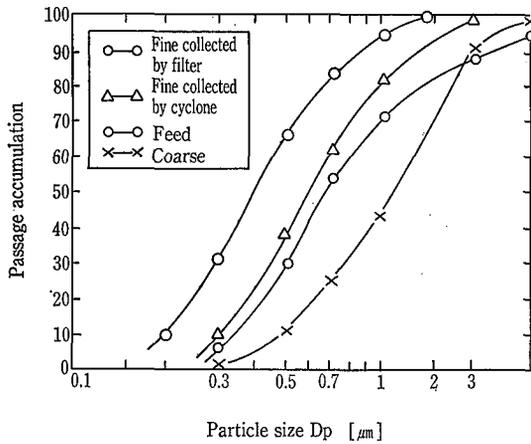
きさから大きい粒子と小さい粒子に分かれることにはなりません。したがって、この分級機の性能をどうして評価するかが問題となりますが、結局はそれぞれの大きさの粒子が、どのような割合で粗粉側と微粉側に分けられたかにより評価するしか方法がありません。

その評価の方法は、原料中のそれぞれの大きさの粒子の分かれ方に着目し、粗粉側に回収された粒子の割合をそれぞれの粒子の大きさに対して計算し、部分分離効率曲線なるものを求めて評価を行います。かりに、ある大きさの粒子を境に完全に粗粉と微粉に分かれた場合には、この曲線は垂直に立ち上がります。したがって、分級機の性能はこの部分分離効率曲線の立ち上がり方により評価できます。この曲線が寝ていれば寝ているほど分級の精度は悪くなっていると評価されます。分級後の粒度分布が原料と同じものであった場合には、この部分分離効率曲線はどの粒子径においても同じ値を示し、もはや分級機ではなく分割機ともいわざるをえない状態となります。

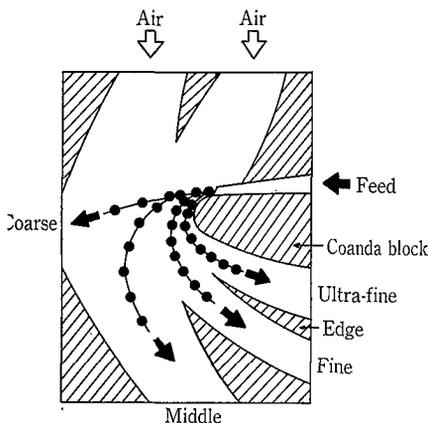
それではこの部分分離効率曲線がどの程度立ってくればよいのかといいますと、目的によって違いはありますが、非常にシャープといわれる分級機の場合には、部分分離効率曲線で25%の粒径と75%の粒径の比が1.2~1.4くらいとなり、通常のもので2.0くらいまでの値を示すようです。

## 3. 分級機の実例

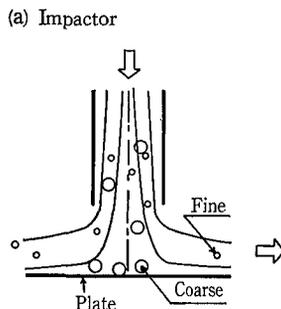
分級機は、湿式分級と乾式分級に分けられます。湿式分級とは水中で分級を行うことであり、乾式分級とは水を使わないで空気中で分級を行うことです。乾式分級はさらに篩分け、重力分級、慣性力分級、遠心力分級に分類できますが、なるべく小さい粒子を分級するためには遠心力を使うこととなります。第6図は、この一例であるターボクラシファイア(日清エンジニアリング製)の構造断面図です<sup>3)</sup>。高速回転をしている分級ロータにより空気が本体内部に導入され、粒子と混じり合いながら気流を形成します。気流は分級ロータと共に高速にて回転していますので、同時に遠心力が働きます。大きい粒子には大きい遠心力が働きますので、気流に対抗して逆方向(半径から遠い方向)に移動します。ところが小さい粒子には小さい遠心



第7図 分級後粒度分布  
Fig. 7 Classified particle size distribution

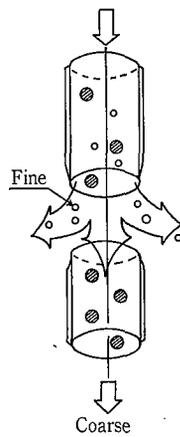


第8図 エルボージェット構造断面図  
Fig. 8 Structural cross section of ELBOW JET

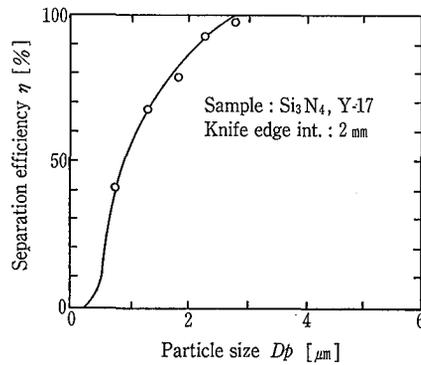
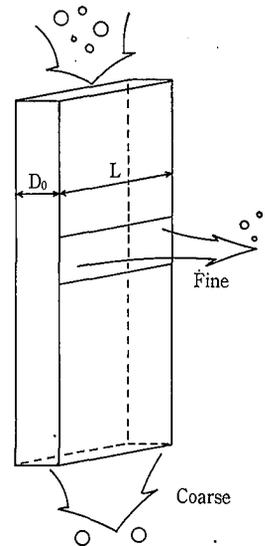


第10図 パーチュアルインパクト概要図  
Fig. 10 Schematic view of virtual impactor

(b) Virtual impactor round nozzle



(c) Slit nozzle



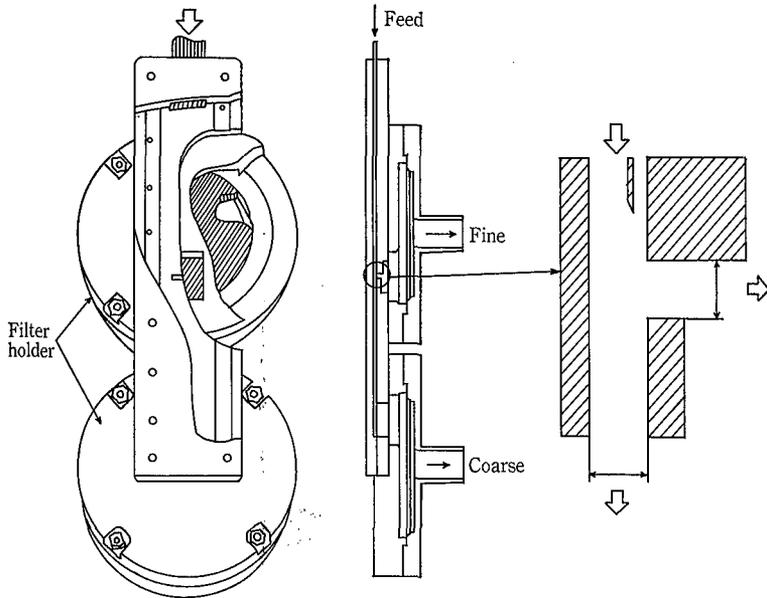
第9図  
部分分級効率曲線  
Fig. 9  
Partial separation efficiency curve

りしか働きませんので、気流に取り込まれてしまいます。最終的には、大きい粒子は粗粉取出口から、小さい粒子は分級ロータ内を通過して渦巻ケーシングから取り出されます。粗粉側から回収された粉体並びに微粉側から回収された粉体をサイクロンにて捕集したもの、さらにサイクロンで捕集しきれなかったものをバグフィルターにて捕集したものの粒度分布を示したものが第7図です<sup>4)</sup>。最初50%粒径が0.7 μm程度であったものが、この分級機にて処理することにより、粗粉側で50%粒径がだいたい1.0 μm、微粉側で0.6 μm以下のものに分けることができます。これは、かなり優秀な分級機であると考えられます。

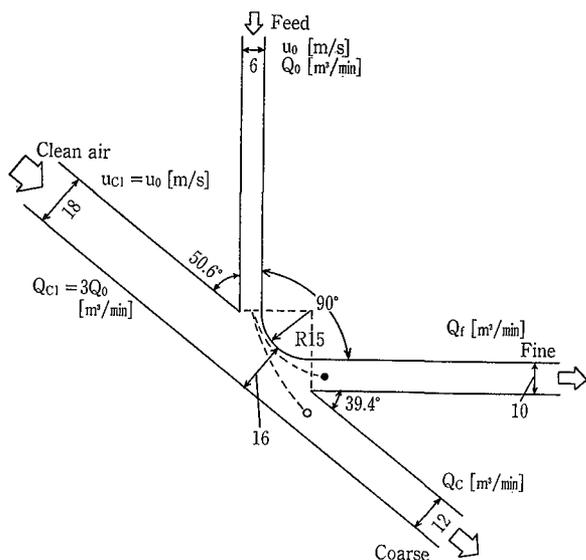
また、第8、9図は、慣性力を利用した分級機であるエルボージェット（日鉄鉱業製）の構造断面図および窒化珪酸分級の部分分離効率曲線です<sup>5)</sup>。2カ所から空気が高速で供給され気流を形成し、気流に向けて供給ノズルから立ち上る非常に高速で供給します。気流が形成されていない場合には粒子は直進しますが、慣性力の小さい粒子すなわち粒径の小さい粒子は、この気流により進路を大きく曲げられます。中粉は半ば進路を曲げられ、粗粉は慣性力が大きいために気流を通過します。そして、それぞれの場所に回収口を設けることにより分級を行います。

第10図は、私共が開発したものであり、インパクト形式のものを工業的規模に発展させた慣性力式の分級機です。(a)は、インパクトの模式図です。ノズルから勢いよく吹き出した気流の正面に邪魔板を置いておきますと、気流は大きく曲げられますが、大きい粒子は慣性力により気流に追従できずに邪魔板にぶつかります。ここに粘着剤を置いておきますと大きい粒子を回収することができます。一方小さい粒子は、慣性力が小さいために気流に追従し流れ出て、分級が行われるという原理です。しかし、粒子が多くなりますと邪魔板上に粒子がたくさん堆積し粒子の再飛散が始まりますので、処理量が非常に少なくなるという欠点があります。

そこで、堆積する粒子を連続的に排出する方法として考案されたのが(b)の方法です。邪魔板の代わりにノズルを設置し、ごく一部の気流を下方向に流します。大部分の気流は横方向に流れますので、原理的には(a)のインパクトと同様の効果を有し、大きい粒子は慣性力によりノズル内に飛び込みます。粗粒子はノズル内のごくわずかの気流により、取り出すことができます。これは粒子が実際には板に衝突（インパクト）しない、つまり仮想的なインパクトで「バーチュアルインパクト」と呼ばれています。



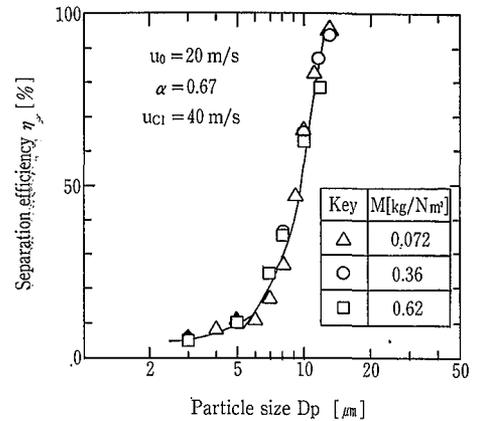
第11図 実験装置概要図  
Fig. 11 Schematic view of experimental equipment



第12図 K型分級機概要図  
Fig. 12 Schematic view of K-type classifier

ところが、このバーチャルインパクトにも円型ノズル使用による処理量の限界が問題としてあります。このインパクトの分離性に影響を及ぼす因子はノズルの直径であるために、これを大きくすることは分離性能を悪くすることになります。したがって、処理量を大きくするためにはこのような円筒状では好ましくないこととなります。そこで(c)のスリットノズルタイプを考案しました。分離性能はノズルの直径に影響されますので、ノズルの直径と同じ幅でL方向に延ばされたダクトを作成します。この場合、粒子の分離性能はダクト幅に影響されることとなりますので、(b)の方法と同様の分離性能で、なおかつ処理量を増やすことが可能となります。

実際の実験装置を第11図に示します。分級部形状を拡大

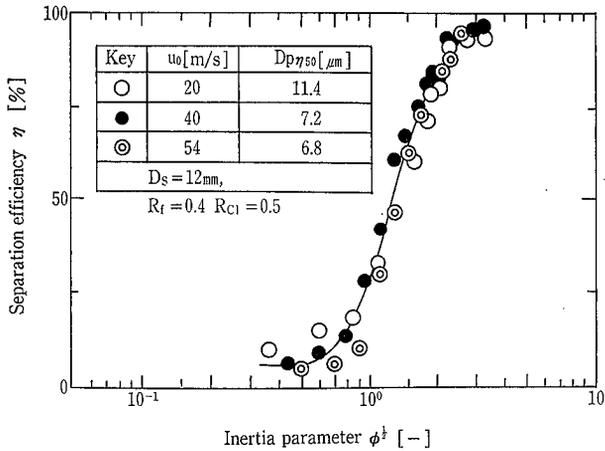


第13図 部分分級効率曲線  
Fig. 13 Partial separation efficiency curve

したものが右側の図です。粒子は気流と共に上部より分級部に至り、ごく一部の気流のみ下側に流れます。気流の大部分は右側に流れますので、小さい粒子は気流に沿って右側に至り、大きい粒子は下側に回収されます。この装置を用いることにより、ミクロンオーダーの分級が可能となります。ところが実際には、このままではシャープな分離が行えません。なぜなら、この形のままでは分級のカットサイズ（分級粒径）は下がりますが、気流が曲がる際にエッジの部分に気流の乱れを生じ、渦が発生します。渦が発生すると粒子は気流に乱されて、きれいな分級ができなくなります。

きれいな気流の流れをつくるために実際に拡大模型を作成し、煙による気流の可視化を行い、渦ができないような形に改良したものが第12図の分級機です<sup>6)</sup>。供給口から原料を気流と共に供給し、別途粒子の入っていないきれいな気流を供給します。2つの気流を分級部にて合流させた後、全流量の大部分を微粉側に流し、ごく少量の気流を粗粉側に流します。供給された粒子のうち、大きい粒子は気流の流れに追従できずに粗粉側に回収され、小さい粒子は気流の流れに沿って微粉側に流れてきます。この装置を使った分級実験の結果は非常に良く、第13図のように、部分分離効率曲線が非常に立った状態となっています。

いま、分級部での流速が20 m/secの場合において8~9 μmの50%分離径が得られていますが、この流速を速くすればさらに小さな分離径が得られます。流速を速くすれば、カットポイントは小さくなるわけですが、流速が変わると慣性力も変わることになりますので、一つの部分分離効率曲線として表現するためには、粒子の慣性力を表すファクター（慣性パラメータ）で表現する必要があります。慣性パラメータで表示しますと流速が変わった場合においても、第14図に示すように一つの部分分離効率曲線として表すことができます。実際に分級部での気流流速が20 m/secの時に11.4 μmの分離径が得られ、54 m/secの時に6.8 μmの分離径が得られましたので、100 m/secの時には4 μm、200 m/secの時には2 μmの分離径に達することが期待されます。この分級機は大変有望な分級機と考えら



第14図 慣性パラメータと部分分級効率との関係  
Fig. 14 Relationship between inertia parameter and separation efficiency

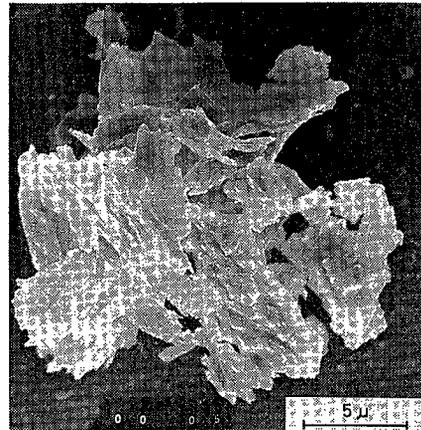
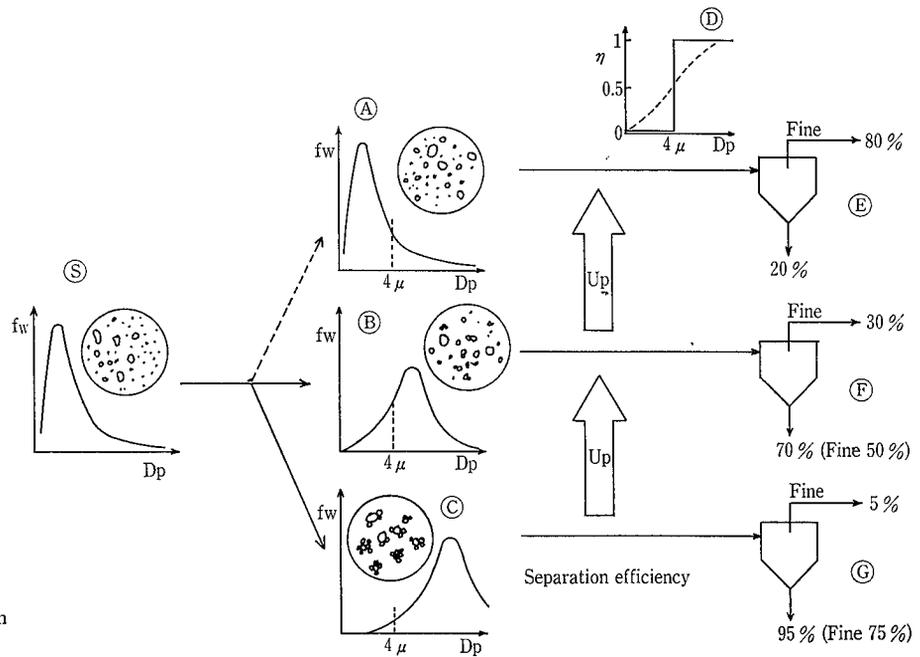


写真1 凝集体走査電子顕微鏡写真  
Photo. 1 Scanning electron micrograph of agglomerated particle



第15図 分離効率の低下例  
Fig. 15 Example of deterioration in separation efficiency

れましたので、分級機の形状からK型分級機と名付け、現在実用機として完成させることを考えております。

乾式分級機と比較して湿式の微粉分級機は現在あまり存在しません。現在湿式分級機として市販されているものは、重力沈降式、遠心式などいくつかありますが、実際の分級粒径は10~100  $\mu\text{m}$  のものしか分級できないのが現状です。

#### 4. 粒子の分散と分級性能

分級の粒度とともに重要な要因が分級精度、すなわち分級のシャープさであります。分級精度を良くするために、まず分級性能を低下させる要因を考え、その問題を解決する方法を考えることが必要です。一番の問題として粒子の凝集現象があり、原料をいかに均一に分散させて供給することができるかが、分級精度に大きく影響するといえます。また、分級機内における気流の乱れの問題も大切であり、このほか反復分級、多段分級により分級精度を向上することも考えられます。

第15図は、粒子の凝集現象による分級精度低下の例を示したものです。粒子というものは一個ずつ単独に存在するのではなく、ある集団の状態で存在しています。それを分級機に入れても一個一個の粒子になることはありません。分級機にばらばらに入った場合でも、分級機内でお互いがぶつかり合って、大きい粒子いわゆる凝集粒子になることがあります。このような場合には、いくら優秀な分級機でも精度の著しい低下が避けられません。

いま、第15図において⑤の粒度分布を持った粉体があるものとします。この粒度分布は粒子が一個一個ばらばらな状態のものであります。ところが実際に分級機に入る時には、このような状態ではなく、写真1に示すような凝集体として分級機に入り、この凝集体が単一の粒子として振舞います。したがって実際に観測される凝集体の粒度分布は、第15図⑥または⑦の粒度分布となり、一次粒子の粒度分布より大きい粒度分布となります。これをカットサイズ4  $\mu\text{m}$  の非常に優秀な分級機に掛けて分級を行ったとしますと、

本来、粒子が完全に分散されている場合には、微粉側に80%、粗粉側に20%回収されなければならないものが、㊸の場合には微粉側に30%、粗粉側に70%、さらに㊹の場合においては微粉側にわずか5%、粗粉側に95%回収されることとなります。粗粉側の95%の粒子の中には、微粉側に回収されるべき粒子が多量に混入していますので、もはや分級精度が保てなくなります。このように分級機の性能を評価する場合には、粒子がいかに分散された状態で供給されているかを確認することが重要となります。

## 5. 粒子の粒度と粒度分布測定

分級機の性能評価を行うためには、粒子を分散状態にて供給するとともに、分級された粒子の粒度分布を正確に測定する必要があります。第3章で述べましたように、部分分離効率曲線は分級機の性能を評価する一つの方法ですが、この部分分離効率曲線を求めるためには、少なくとも原料の粒度分布と粗粒側の粒度分布を測定する必要があります。この粒度分布の測定の仕方を間違えますと分級機を正確に評価することができませんので、粒度分布をいかに正確に測定するかが問題となります。世の中には種々の粒度分布測定装置がありますが、2つとして同じ結果を出すものがないといえる程粒度測定方法に問題があるのが現状です。粒度分布測定原理というものは、基本的には分級原理と同じです。つまり、粒度分布測定とは大きさ別にどの程度の数量の粒子があるかを知ることですので、大きさ別に分けること自体分級と全く同じ訳です。

粒度分布測定装置には、重力沈降式、遠心沈降式、慣性力式、静電気力式のほか、顕微鏡によるもの、コールターカウンター法や最近脚光を浴びています光散乱法などがあります。粉体になじみのない方からは、粒子の大きさを測定するには、顕微鏡と物差しによる測定で十分ではないかという意見をよく耳にしますが、顕微鏡により測定できるのは球形粒子の場合であり、実際の粒子の場合どこを粒子直径とするかの判断を下すことが困難です。

粒子の大きさとは何かということを考えてみたいと思います。直径100 $\mu\text{m}$ の球形粒子と一辺が80 $\mu\text{m}$ の立方体の粒子のいずれの粒子が大きいかを質問すると、直径100 $\mu\text{m}$ の球形粒子の方が大きいと答える人が多いでしょう。ところが、通過できる円孔の直径を比較しますと、直径100 $\mu\text{m}$ の球形粒子は直径100 $\mu\text{m}$ の円の穴を通過できますが、一辺80 $\mu\text{m}$ の立方体は通過することができません。

一方、通過できるスリット幅を比較しますと、直径100 $\mu\text{m}$ の球形粒子は、幅80 $\mu\text{m}$ のスリットを通過できませんが、一辺80 $\mu\text{m}$ の立方体は通過できます。また、投影面積、体積については、100 $\mu\text{m}$ の球形粒子の方が大きくなり、表面積については80 $\mu\text{m}$ の立方体の方が大きくなります。したがって何をもちて大小を比較するのが問題となりますが、結果的には粒子の大きさを利用する目的により、比較のための基準を決める必要があることとなります。ふるいを利用する場合には、立方体の方を大きい粒子と扱い、スリットを利用する場合には、球形粒子の方を大きい粒子と扱う、つまり、粒子の使い方により粒子の大きさの定義を変えることが要求されます。すなわち、その目的に応じて、体積や面積などの幾何学的量、あるいは沈降速度などの物理量で、粒子の大きさ(粒度)を表現すべきであります。便宜的にこれらを一次元の粒径に換算して用いているわけです。長さの単位で表現した方がわかりやすいように見えるからです。流体分級機においては、流体中を流れる運動速度が問題となりますから、沈降速度径なるものを定義し、粒子がある等速沈降速度で沈降する場合には、その速度で沈降する球形粒子の大きさで代表させます。このように、われわれが粒子の大きさを測定する場合には、粒子の目的に応じて粒子の大きさを定義し、粒子の測定方法を選択しなければなりません。

## む す び

これまで粉碎や分級について、いろいろ話をさせていただきましたが、粉碎機または分級機の性能を評価する際には、粒度分布測定が一番重要になります。しかし、この粒度分布を測定する装置が現状では完成されたとはいえない状態にありますので、ユーザ側がその装置に精通して、自分の目的に応じた粒度分布測定装置を選択し、使いこなす必要があると考えています。

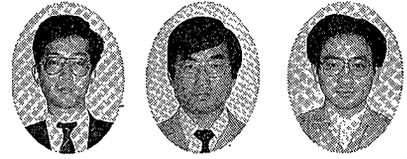
### 〔参考文献〕

- 1) 日本粉体工業技術協会編：分級装置技術便覧(1978)
- 2) 化学工学協会編：化学工学の進歩19, 粉粒体工学(1985)
- 3) 化学工学協会編：化学工学の進歩19, 粉粒体工学(1985)
- 4) 化学工学協会編：化学工学の進歩19, 粉粒体工学(1985)
- 5) 日本粉体工業技術協会編：粉体分級技術マニュアル(1990)
- 6) 山本英夫, 吉江健一, 菅沼彰：化学工学, 第49巻, 第1号(1985), p. 65

注：引用図表の表記方法については本技報にあわせて変更してあります。

# CFDによる攪拌槽内流動解析

## Flow Analysis for a Stirred Tank by Computational Fluid Dynamics (CFD)



技術開発本部

高田 一 貴  
Kazutaka Takata  
佐藤 栄 祐  
Eisuke Sato  
菊池 雅 彦  
Masahiko Kikuchi

The flow structure and mixing mechanism in stirred tank with paddle impeller have been investigated. Navier-Stokes and scalar equations have been numerically solved both in laminar and turbulent flows using finite difference method to obtain the details of the velocity field and concentration distributions. The computed velocity field and mixing process well agree with published data, and they showed that mass transfer between the large scale recirculating flows are suppressed when a number of recirculating flows are generated in the tank. This result suggests that higher mixing efficiency can be attained by controlling the number of circulating flows.

### まえがき

攪拌装置は化学プロセスの中で重合反応機あるいは混合機として広く用いられている。これら攪拌装置内部の流動機構および熱や物質の輸送機構を正確に把握することは装置の最適設計・特性解析・トラブル解析を行ううえで重要である。これら流動機構や輸送機構を解明するには、従来実装置やモデル装置などを用いて実際に流速や温度、濃度を測定する方法がとられているが、攪拌装置内では循環流や逆流を伴う複雑な3次元流となるので、これらの量を正確に把握することは困難となる場合が多い。このような場合には、実験によるよりも数値計算法を用いて流速や物質などの輸送機構を決定する方が有利となり、種々の条件下で計算を繰り返すことにより、流れ場の多くの情報を得ることができると。

近年になって、攪拌装置内部流動を数値シミュレーションによって解いた例が報告されてきている。攪拌槽の層流問題については、上ノ山ら<sup>1)</sup>がタービン翼の攪拌槽における擬塑性流体の流動状態の3次元数値解析を行っている。また、大田ら<sup>2)</sup>はアンカー翼攪拌槽のr-z平面における解析を、平岡ら<sup>3,4)</sup>は、パドル翼攪拌槽の流動解析を行っている。さらに、梅垣<sup>5)</sup>は、境界適合法(BFC)を用いてパドル翼並びに後退翼を用いた攪拌槽内3次元流動解析を行い、攪拌翼の形状の違いが及ぼす流動状態の変化について考察している。一方攪拌槽の乱流問題については、Placekら<sup>6)</sup>がk-εモデルを用いてタービン翼攪拌槽のr-z面における2次元流動解析を行い、流速の計算値を実測値と比較し良好な一致を得ている。また、Harveyら<sup>7)</sup>は、パドル翼攪拌槽のr-z面における2次元流動解析を行っている。さらに、Middletonら<sup>8)</sup>は、汎用流体解析用コードを用いてタービン翼攪拌槽の3次元流動解析を行っている。

このように、攪拌槽内の流動解析は広く行われているものの、その内容は解こうとする流れに適した支配方程式やモデルの妥当性の検討に限られており、攪拌装置の最適設計に有用と考えられる槽内の流れに基づく混合機構の解明は十分になされていない。

本研究では、攪拌装置の最適設計法の確立を最終目的として、まず、パドル翼を用いた攪拌槽内の層流および乱流状態における流動・混合機構を数値計算法を用いて明らかにすることにより、攪拌槽内の混合に及ぼす流れの影響を解明することを試みた。

### 1. 数値計算

#### 1.1 支配方程式

化学装置内で取り扱われる流れのほとんどは、液体であれ気体であれ、非圧縮性流れとみなせる。ここで、攪拌槽内の流れの方程式を考える時、通常の静止した円筒座標系(r, θ, z)でこれを考えるよりも、攪拌翼と同一角速度で回転する回転円筒座標系(r', θ', z')で考えた方が、翼をじかに回転させた時に生じる移動境界問題を避けることができるため、数値計算が容易となる。従って、流れが層流で取り扱う流体がニュートン流体の場合、支配方程式は次の偏微分方程式系で表される。

連続の式

$$\frac{1}{r} \frac{\partial r \cdot u'}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u'}{\partial \theta} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Navier-Stokes 方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u'}{\partial t} + u' \frac{\partial u'}{\partial r} + \frac{v'}{r} \frac{\partial u'}{\partial \theta} - \frac{v'^2}{r} + w' \frac{\partial u'}{\partial z} - 2\omega v' - \omega^2 r \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + g'_r + \nu \left( \frac{\partial^2 u'}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u'}{\partial r} - \frac{u'}{r^2} + \right. \\ \left. \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u'}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u'}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v'}{\partial \theta} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v'}{\partial t} + u' \frac{\partial v'}{\partial r} + \frac{v'}{r} \frac{\partial v'}{\partial \theta} + u' \frac{v'}{r} + w' \frac{\partial v'}{\partial z} + 2\omega u' \\ = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + g'_\theta + \nu \left( \frac{2}{r^2} \frac{\partial u'}{\partial r} + \frac{\partial^2 v'}{\partial r^2} + \right. \\ \left. \frac{1}{r} \frac{\partial v'}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v'}{\partial \theta^2} - \frac{v'}{r^2} + \frac{\partial^2 v'}{\partial z^2} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial w'}{\partial t} + u' \frac{\partial w'}{\partial r} + \frac{v'}{r} \frac{\partial w'}{\partial \theta} + w' \frac{\partial w'}{\partial z}$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g'_z + \nu \left( \frac{\partial^2 w'}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w'}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w'}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 w'}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

物質の輸送方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\bar{v}}{r} \frac{\partial C}{\partial \theta} + \bar{w} \frac{\partial C}{\partial z} = D_m \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 C}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \dot{d} \quad (5)$$

回転円筒座標系における支配方程式は、式(2), (3)にアンダーラインで示した遠心力項とコリオリ力項を付加した形となり、他の項および他の式は両座標系で全く同一となる。式(1)~(4)を解くことによって得られる流動は、観察者が翼に乗って翼と同一速度で流れを観察しているイメージに相当する。従って、境界条件の簡単な回転円筒座標系で速度分布を計算したあと、次式で静止円筒座標系の速度に変換することにより実際の速度分布が得られる。

$$\begin{aligned} u &= \bar{u}' \\ v &= \bar{v}' + r\omega \\ w &= \bar{w}' \end{aligned} \quad (6)$$

次に、攪拌槽流動系における乱流問題を解明するためには、翼、槽壁およびバッフルによって形成される複雑な渦を計算する必要がある。このための計算方法には層流計算と同様のダイレクトシミュレーション法がある。しかし、乱流には空間・時間のスケールのかかなり小さな乱れ成分が存在するため、実際の反応機内流動の高レイノルズ数流れに対して式(1)~(4)を直接解くことは、現在のところ計算機容量・計算速度の問題上不可能に近い。そこで、差分法に基づくダイレクトシミュレーションのもつ記憶容量ならびに計算時間などの問題を解決するために、式(1)~(4)をある種の平均化操作によって簡略化し、大スケールから小スケールまでのすべてのスケールの乱流渦を求めなくても、ある程度の近似解を得る方法がある。この方法を乱流モデルと呼ぶが、本計算ではその1つの方法として2方程式(k-ε)モデルをとりあげる。k-εモデルは時間平均操作を施した連続の式および Navier-Stokes 方程式の他に乱流エネルギー(k)および粘性消散率(ε)の輸送方程式を連立させて解くことにより流速やスカラー量に対する時間平均解を得る方法である。k-εモデルではコルモゴロフスケールに代表されるような小スケール渦(100 μm程度)まで計算することはできないが、攪拌槽内の循環流のような大スケール渦による流れを求めることにより、装置内の大局的な流動機構を把握することが可能と考えられる<sup>6)</sup>。

従って、k-εモデルでは、流れの支配方程式として式(1)~(4)に時間平均操作を施した時間平均 Navier-Stokes 方程式(7)~(10)式と、次に示す乱流エネルギーと粘性消散率の輸送方程式(14)~(15)を連立させて解くことにより解を得ることができる。

時間平均連続の式

$$\frac{1}{r} \frac{\partial r \cdot \bar{u}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \theta} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

時間平均 Navier-Stokes 方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \frac{\bar{v}}{r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \theta} - \frac{\bar{v}^2}{r} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial r} + g'_r + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} - \frac{\bar{u}}{r^2} + \right. \\ & \left. \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \theta} \right. \\ & \left. + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \tau_{r\theta} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{rz} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \frac{\bar{v}}{r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \theta} + \bar{u} \frac{\bar{v}}{r} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} + g'_\theta + \nu \left( \frac{2}{r^2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial r^2} + \right. \\ & \left. \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \theta^2} - \frac{\bar{v}}{r^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial r} \tau_{r\theta} + \frac{2}{r} \tau_{r\theta} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{rz} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial r} + \frac{\bar{v}}{r} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \theta} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + g'_z + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{w}}{\partial r} + \right. \\ & \left. \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial r} \tau_{rz} + \frac{1}{r} \tau_{rz} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \tau_{\theta z} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、速度の2乗相関項(レイノルズ応力)は次式で与えられる。

$$\tau_{r\theta} = -\mu \left[ r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\bar{v}}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \theta} \right] \quad (11)$$

$$\tau_{\theta z} = -\mu \left[ \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \theta} \right] \quad (12)$$

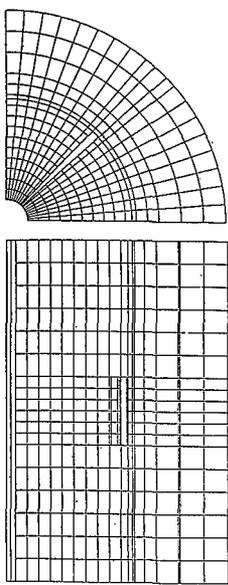
$$\tau_{rz} = -\mu \left[ \frac{\partial \bar{w}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right] \quad (13)$$

乱流エネルギーの輸送方程式

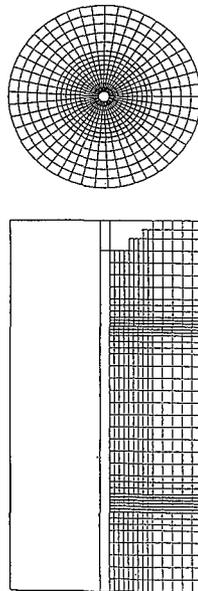
$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial k}{\partial r} + \frac{\bar{v}}{r} \frac{\partial k}{\partial \theta} + \bar{w} \frac{\partial k}{\partial z} = & \frac{\nu_t}{\sigma_k} \left( \frac{\partial^2 k}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 k}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial k}{\partial r} \right) \\ & + G_s - \epsilon \end{aligned} \quad (14)$$

粘性消散率の輸送方程式

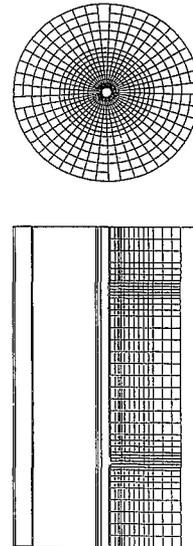
$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} + \frac{\bar{v}}{r} \frac{\partial \epsilon}{\partial \theta} + \bar{w} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = & \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \left( \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right) \\ & + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_s - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (15)$$



第1図  
メッシュ構成  
(攪拌槽内層流)  
Fig. 1  
Mesh system for  
laminar flow in  
stirred tank



第2図  
メッシュ構成  
(攪拌槽内乱流:  
パッフルなし)  
Fig. 2  
Mesh system for  
turbulent flow in  
stirred tank  
without baffle



第3図  
メッシュ構成  
(攪拌槽内乱流:  
パッフルあり)  
Fig. 3  
Mesh system for  
turbulent flow in  
stirred tank with  
baffle

ここで

$$\nu_t = C_t \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$G_S = \nu_t \left[ 2 \left\{ \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \theta} + \frac{u}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right)^2 \right\} \right. \\ \left. + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \theta} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} - \frac{\bar{v}}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \theta} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 \right]$$

式(14)~(15)中におけるモデル定数を以下に示す。ここでは槽内流れを等方性乱流と仮定した。この仮定はHarveyら<sup>7)</sup>の実験により妥当であることが示されている。

$$\sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \\ C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad C_t = 0.09$$

## 2 数値解析方法

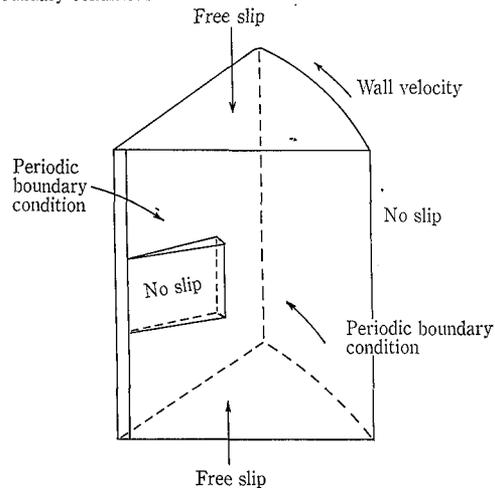
層流に関する支配方程式(1)~(4)およびそれに付随する拡散方程式(5)ならびに乱流に関する支配方程式(7)~(15)を、差分法を用いて解く。なおここでは、差分化の詳細は式が複雑になるため省略する。差分計算は収束を容易にするために空間的には風上差分を、時間的には後退差分スキームによる半陰解法によった。格子にはスタガードグリッドシステムを用いた。すなわち、流速を格子面の中心において定義し、圧力、濃度、乱流エネルギーおよび粘性消散率などのスカラー量を格子空間の中央において定義した。解く方程式群はいずれも時間依存形であるため、計算の収束判定条件を

$$|(P^{n+1} - P^n) / P^n| < 0.001$$

ただしnは計算ステップ数

とし、この条件を満足するまで繰り返し計算を行った。

Boundary conditions



$$D = 0.2 \text{ m} \quad d/D = 0.5 \quad n = 200 \text{ rpm} \\ \text{fluid viscosity} = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad Re_M = 4.7$$

第4図 境界条件及び計算条件(攪拌槽内層流)  
Fig. 4 Boundary and calculating conditions for laminar flow in stirred tank

## 1.3 計算する問題および境界条件

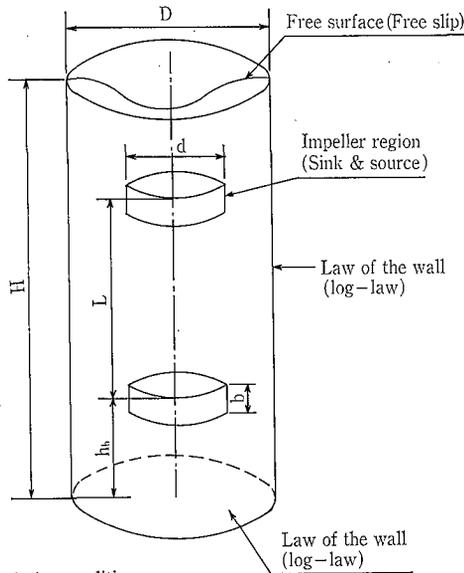
本研究では、攪拌槽内の基礎的な流動・混合機構の把握を目的としているので計算モデルには、

- (1) パドル翼を用いた攪拌槽内層流
- (2) 多段パドル翼を用いた攪拌槽内乱流(パッフルなし)
- (3) " (パッフルあり)

を選定した。

第1~3図にそれぞれのメッシュ構成を示す。第4図に計算(1)の計算条件および境界条件を示す。翼面および壁面においてすべりなし(no-slip)条件を、攪拌槽上下部にすべりあり(free-slip)条件を与えた。第5図に計算(2)の計算条件および境界条件を示す。本計算では、大スケールからなるフローパターンのみを知ることを目的としているの

Boundary conditions

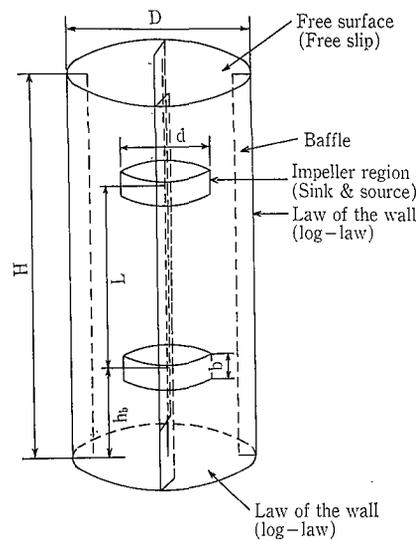


Calculating conditions

$D=0.3\text{ m}$     $d/D=0.5$     $hb/D=0.7$   
 $L/D=1.0$     $H/D=2.0$     $n=200\text{ rpm}$   
 fluid viscosity=0.001 Pa.s(Water)    $Re_M=75\ 000$

第5図 境界条件及び計算条件 (攪拌槽内乱流: バッフルなし)  
 Fig. 5 Boundary and calculating conditions for turbulent flow in stirred tank without baffle.

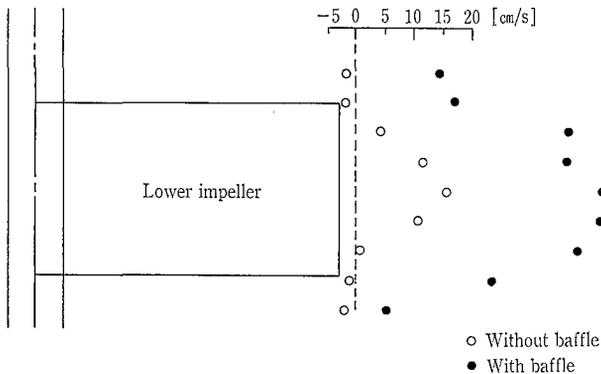
Boundary conditions



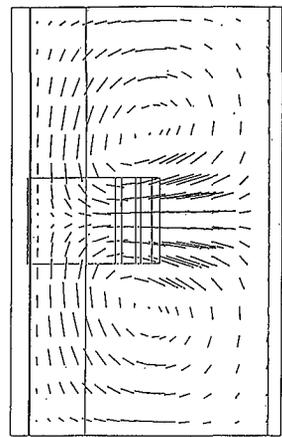
Calculating conditions

$D=0.3\text{ m}$     $d/D=0.5$     $hb/D=0.7$   
 $L/D=1.0$     $H/D=2.0$     $n=200\text{ rpm}$   
 fluid viscosity=0.001 Pa.s(Water)    $Re_M=75\ 000$

第7図 境界条件及び計算条件 (攪拌槽内乱流: バッフルあり)  
 Fig. 7 Boundary and calculating conditions for turbulent flow in stirred tank with baffle.



第6図 翼先端部での半径方向流速分布  
 Fig. 6 Measured radial velocities at the periphery of the impeller.



第8図 攪拌槽内層流流速ベクトル  
 Fig. 8 Computed velocity vectors of laminar flow in stirred tank.

で、翼の吐出部に境界条件として流速の実測値 (第6図) を、壁面の境界条件として対数則速度分布をそれぞれ与えることにより計算を簡略化した。なお、槽上部の自由表面の形状を計算により求めることは困難であることから、その形状には写真撮影による実測値<sup>9)</sup>を与え、表面をすべりあり条件とした。この方法を用いればかなり粗いメッシュでも計算が可能となり、槽内の循環流を求めることができると考えられる。第7図に計算(3)の計算条件および境界条件を示す。この計算においてもバッフルなしの場合と同様に、翼の吐出部に流速の実測値 (第6図) を与えた。なお、槽上部の自由表面には大きな凹凸がみられなかったことから、これを水平に近似し、すべりあり条件とした。

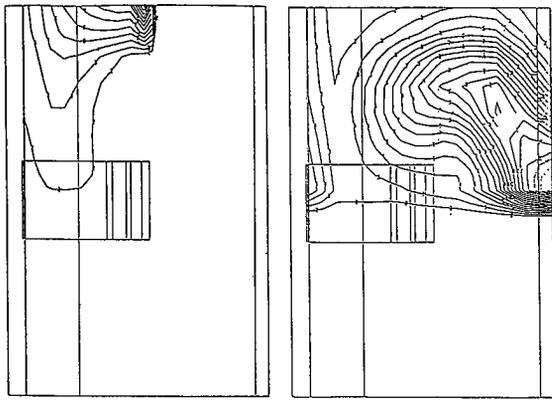
本計算では、富士通 FACOM M360 スカラープロセッサを使用した。定常解を得るのに要する計算時間はケース

(1)で約4時間、ケース(2)および(3)共に約20時間であった。

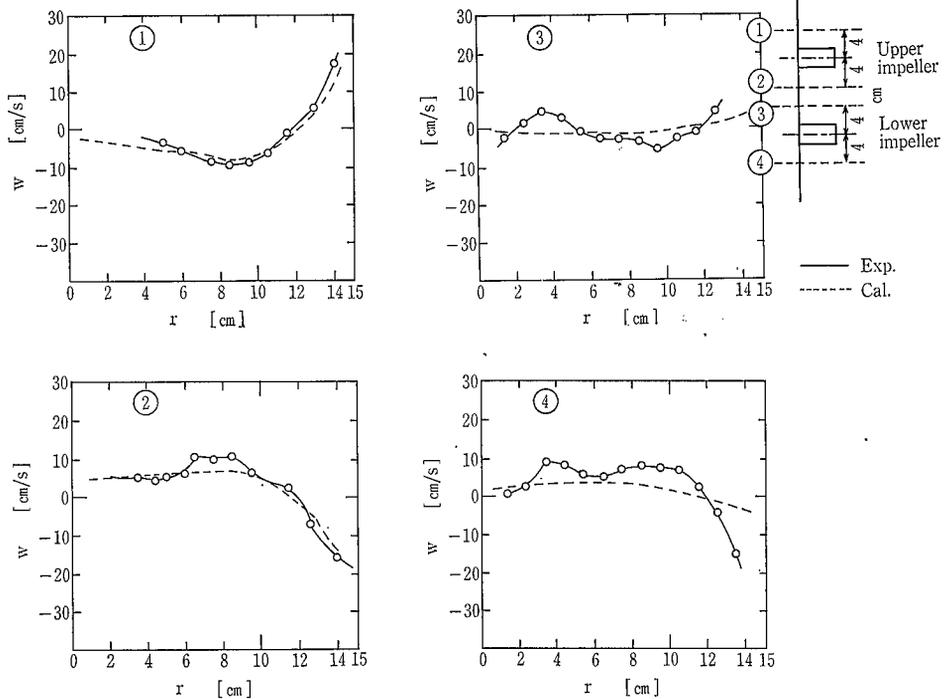
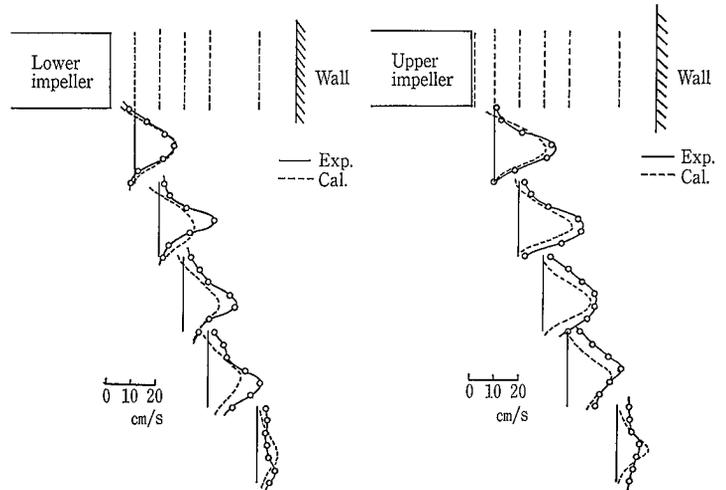
## 2. 結果および考察

### 2.1 攪拌槽内層流 (流動機構および混合機構)

第8図にパドル翼を用いた攪拌槽内層流流動の速度ベクトルを示す。翼の回転によって生じた半径方向への吐出流は、槽壁面に衝突して上下方向への循環流に分かれ翼の内側にもどる。これら循環流の速度は、翼の回転速度にくらべてはるかに小さいが、翼の回転数が大きくなって遠心力が増大すると大きくなっていく。第9図に濃度方程式(5)を解いた場合の等濃度線を示す。本計算では、拡散物質を槽上部の自由表面域から瞬間的に投入した (ステップ応答)。投入された拡散物質は時間の経過と共に軸を伝って翼部へ吸い込まれるように移動し、翼部に達した拡散物質は翼の回転によって生じる半径方向吐出流により翼先端部より吐出されている。しかし、この流動系では、攪拌翼よりも上



第9図 攪拌槽内の等濃度線  
Fig. 9 Contours of the computed concentration distributions.



第11図 流速の計算値と実測値との比較  
Fig. 11 Comparisons of measured and computed velocities.

第10図 攪拌槽内乱流（バッフルなし）の流速ベクトル  
Fig. 10 Computed velocity vectors of turbulent flow in stirred tank without baffle.

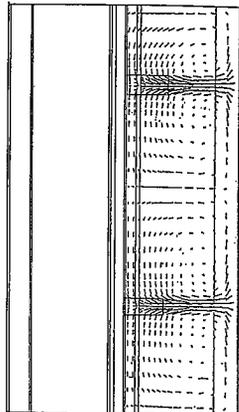
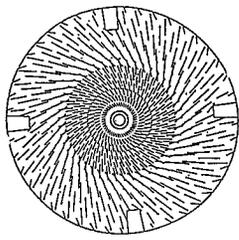
部に投入された拡散物質は攪拌翼を中心とした軸に垂直な平面よりも下方へは移動していかない。このことは、上部の循環流と下部の循環流との間で物質移動がほとんど行われないことを示すと同時に、槽内に複数の循環流が存在する場合には循環流の存在そのものが槽内の効率よい混合を妨げる要因になることが示唆される。

## 2. 2 攪拌槽内乱流（流動機構および混合機構）

第10図にバッフルがない場合の攪拌槽内乱流流動の速度

ベクトルを示す ( $r$ - $z$  面,  $r$ - $\theta$  面)。層流の場合と同様に、翼の回転によって生じた半径方向への吐出流は、槽壁面に衝突して上下に分かれ翼の内側にもどる。なお、この攪拌系においては槽内全体に4つの大きな循環流を形成する。

計算により求めた速度が実際の流れと一致しているかどうかを検討することは重要である。特に本計算では乱流モデルを用いて大スケール渦からなるフローパターンを知ることとしていることから、たとえフローパターンが計算されたとしても、そのシミュレーション結果が真に正しい解を与えているかを検証しなければならない。ここでは、槽内流速をレーザー・ドップラー流速計 (LDV) を用いて実測したものと比較する<sup>10)11)</sup>。第11図に計算値と実測値を比較したものを示す。翼から吐出したすぐの流速は実測値と良好に一致しているが、翼から離れて壁面に近い



→0.6 m/s

第12図 攪拌槽内乱流（バッフルなし）の流速ベクトル  
Fig. 12 Computed velocity vectors of turbulent flow in stirred tank with baffle.

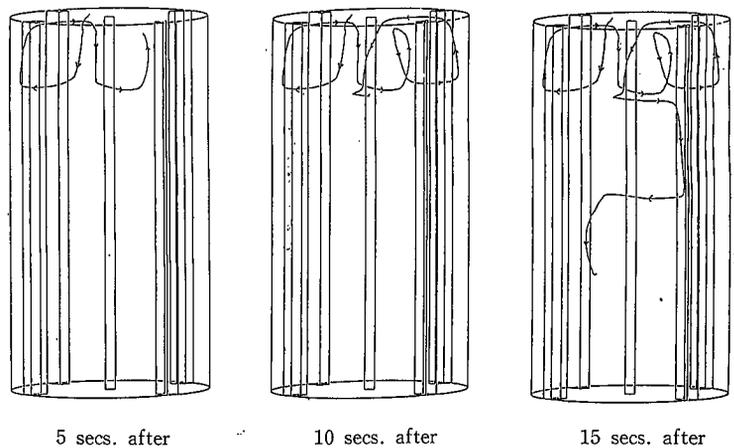
ところでの流速は実測値からずれてくる。この不一致は、壁面近くなると流速が遅くなるため、LDVの測定精度が低下することに起因する。しかし、全体のフローパターンが実測値<sup>11)</sup>と一致することから、計算結果は妥当であると判断される。

第12図にバッフルがある場合の攪拌槽内乱流流動のフローパターンを示す(r-z面, r-θ面)。バッフルなしの場合と同様のフローパターンを形成しており、全体のフローパターンは実測値<sup>11)</sup>とよく一致する。第10図と第12図を比較するとバッフル近傍では循環流の流速が3倍程度に強まっており、バッフルの存在により2次循環流を起こす能力が高まる様子がよくわかる。

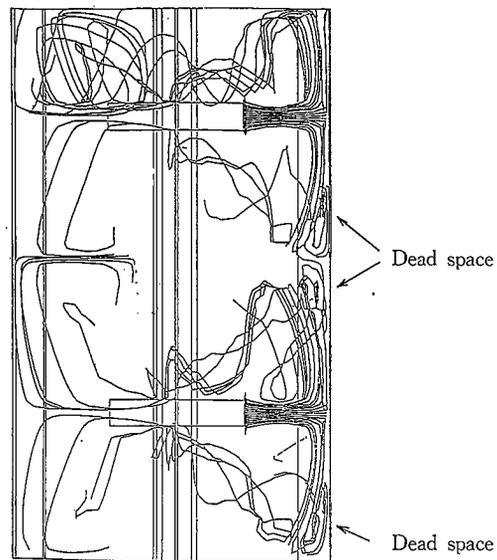
次に、攪拌槽内の混合機構を知ることは、混合時間の最適化並びに槽内のデッドスペースを予測する上で重要である。そこで、計算により求めた流速分布を用いて混合過程を予測した。混合過程の予測には、ラグランジュ・ランダムフライトモデル<sup>12)</sup>を流れ場に適用した。このモデルでは流れ場に投入した仮想マーカーを流れによる移流速度と分子拡散の相互作用で移動させることにより、マーカーが装置内でどのように挙動するかを明らかにすることができる。このモデルに従えば、r, θ, z方向のマーカーの位置は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} dr &= u \cdot dt + \sqrt{D_m} \cdot dW_d \\ d\theta &= v \cdot dt + \sqrt{D_m} \cdot dW_d \\ dz &= w \cdot dt + \sqrt{D_m} \cdot dW_d \end{aligned} \quad (16)$$

格子内のマーカーの位置は格子面上で定義される速度を内挿して求めた。第13図に自由表面域から投入したマーカーが時間の経過と共にどのように動くかを計算した軌跡を示す。自由表面より投入されたマーカーは上段翼上部の循



第13図 自由表面より投入した仮想マーカーの軌跡  
Fig. 13 Trajectories of the marked particle thrown into free surface.



第14図 翼先端より投入した仮想マーカーの軌跡  
Fig. 14 Trajectories of the marked particles thrown into upper and lower impeller regions.

環流域で数回循環し、そのあと上段翼下部循環流域に流れ込んでいる。これより、多段翼を用いた攪拌槽内部で複数の循環流を生じる場合、マーカーを自由表面から投入したとすれば、その混合過程としては自由表面近傍の循環流域から順次下方の循環流域へ混合していく経路をたどる。第14図は翼の吐出流域に投入したマーカーの軌跡である。投入されたマーカーはそれぞれの循環流域を何回も循環し、一部のマーカーを除き上下方向、つまり循環流間でマーカーの大きな入れ替えが認められない。さらに、上段翼と下段翼との間の循環流同士が衝突する部分および槽下部域でマーカーが局所的に滞留する現象（デッドスペース）が起きている。このことは、単に多段翼にした場合には、流れがたとえ乱流であっても槽内に形成された複数の循環流同士の物質交換が促進されないばかりか、槽内にデッドスペースを形成する危険性があることを示す。このことから効率よい攪拌を達成するための1つの手段として、槽内に存

在する複数の循環流をうまくコントロールすることにより、循環流同士の干渉をできるだけなくしてやればよいことが示唆される。事実、Komoriら<sup>11)</sup>は攪拌槽において消費されるエネルギー  $E = P \cdot T$  ( $E$ : 攪拌エネルギー,  $P$ : 攪拌動力,  $T$ : 混合時間) を測定して多段攪拌系の攪拌効率を考察した結果、多段攪拌系において槽内に複数の循環流が存在する場合には、循環流が少ない場合に比べて攪拌効率が悪くなることを示している。

## む す び

パドル翼を用いた攪拌槽内流動の層流から乱流における数値シミュレーションを行い、それらの流動・混合機構について考察した。その結果、次に示す結論を得た。

- 1) 流動数値シミュレーションにより攪拌槽内の流動・混合機構を明らかにすることができる。層流計算にはダイレクトシミュレーションを、乱流には  $k-\epsilon$  モデルを適用することにより得られた計算結果は、実測値などと良好に一致し、本計算法が実用的に有用であることが示された。
- 2) パドル翼を用いた攪拌槽内の混合状態は、層流、乱流のいずれにおいても大スケールの循環流によって支配される。循環流の数が増えると循環流同士が干渉して物質移動が抑制されるばかりか、槽内にデッドスペースを生じる危険性があることが示された。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、九州大学工学部化学機械工学科村上泰弘教授、小森悟助教授より有益な助言をいただいた。ここに記して感謝します。

### (使用記号)

$C$	: 濃度	(mol)
$C_1$	: モデル定数	
$C_2$	: モデル定数	
$C_3$	: モデル定数	
$D$	: 槽径	(m)
$D_m$	: 分子拡散係数	( $m^2/s$ )
$d$	: 翼径	(m)
$\dot{d}$	: 拡散物質発生量	(mol/s)
$dW_d$	: ガウスの白色ノイズプロセス	( $s^{1/2}$ )
$E$	: 攪拌エネルギー	(J)
$g_r'$	: 回転座標系 $r$ 方向重力加速度	( $m/s^2$ )
$g_\theta'$	: 回転座標系 $\theta$ 方向重力加速度	( $m/s^2$ )
$g_z'$	: 回転座標系 $z$ 方向重力加速度	( $m/s^2$ )
$k$	: 乱流エネルギー	(J)
$n$	: 回転数	
$P$	: 圧力	(Pa)

$\bar{P}$	: 時間平均圧力	(Pa)
$q$	: 熱発生量	(J/s)
$Re_M$	: 攪拌レイノズル数[-]	
$r$	: 静止座標系 $r$ 方向	(m)
$r'$	: 回転座標系 $r$ 方向	(m)
$T$	: 混合時間	(s)
$u$	: 静止座標系 $r$ 方向速度成分	(m/s)
$u'$	: 回転座標系 $r$ 方向速度成分	(m/s)
$\bar{u}$	: 静止座標系 $r$ 方向時間平均速度成分	(m/s)
$v$	: 静止座標系 $\theta$ 方向速度成分	(m/s)
$v'$	: 回転座標系 $\theta$ 方向速度成分	(m/s)
$\bar{v}$	: 静止座標系 $\theta$ 方向時間平均速度成分	(m/s)
$w$	: 静止座標系 $z$ 方向速度成分	(m/s)
$w'$	: 回転座標系 $z$ 方向速度成分	(m/s)
$\bar{w}$	: 静止座標系 $z$ 方向時間平均速度成分	(m/s)
$z$	: 静止座標系 $z$ 方向	(m)
$z'$	: 回転座標系 $z$ 方向	(m)
ギリシャ文字		
$\epsilon$	: エネルギー消散率	(J/s)
$\theta$	: 静止座標系 $\theta$ 方向	(m)
$\theta'$	: 回転座標系 $\theta$ 方向	(m)
$\nu$	: 動粘性係数	( $m^2/s$ )
$\nu_t$	: 渦動粘性係数	( $m^2/s$ )
$\rho$	: 流体密度	( $kg/m^3$ )
$\sigma_k$	: モデル定数	
$\sigma_\epsilon$	: モデル定数	
$\tau_{r\theta}$	: レイノルズ応力	( $m^2/s^2$ )
$\tau_{\theta z}$	: レイノルズ応力	( $m^2/s^2$ )
$\tau_{zr}$	: レイノルズ応力	( $m^2/s^2$ )
$\omega$	: 角速度	(rad/s)

### Superscript

$n$  : 計算ステップ

### (引用文献)

- 1) 上ノ山周ら: 化工論文集, 14, 6 (1988)
- 2) Ohta, M et al.; J. of Chem. Eng. J., 18, 1 (1985)
- 3) Hiraoka, S et al.; J. of Chem. Eng. J., 11, 487 (1978)
- 4) ibid 12, 56 (1979)
- 5) 梅垣菊男: 機論B, 54, 505 (昭63)
- 6) Placek, J. et al., AIChE J.: 32, 11 (1986)
- 7) Harvey, P. S. and M. Greaves; Trans. IChem. E., 60 (1982)
- 8) Middleton, J. C.; Cem. Eng. Res. Des., 64, 1 (1986)
- 9) 田中政一: 九州大学工学部修士論文 (昭61)
- 10) Komori, S: Private communication
- 11) Komori, S et al.: AIChE J., 34, 6 (1988)
- 12) Sawford, B. L. et al.: J. Fluid Mech., 106 (1986)

# PMX-98 化学プラントへの適用例

## PMX-98 Application to The Chemical Plant



(化)プラント部  
野口 收 次  
Shuji Noguchi  
技術開発本部  
平田 逸 郎  
Ituro Hirata

A lot of computers are used for the production control of batch process recently in a chemical industrial field. Although many of them are a large scale computer or specialized computer, personal type computers are growing to fill the operator needs by the development of software, economics, multiversatile and enlarging capacity.

This paper shows a batch plant operation management system, using a personal computer (PC-9801RX41) and a process monitor PMX-98 for a process operation and monitoring in the fine chemical factory.

### まえがき

近年、化学分野のバッチプラントは多品種少量生産、高機能化がますます進んでおり、その運転管理難度が高くなっており、従来の手動操作から、制御用プロセスコンピュータによる自動運転へと移行しつつある。

制御用コンピュータは、これまで専用のハードウェアが用いられることが多かったが、最近、パソコンなどの市販機器を利用するケースも増えつつある。それは、経済性、柔軟性、保守性に優れているためである。

しかし、ソフトウェアにおいては、適当なパッケージソフトがなくその開発が望まれていたが、当社開発のPMX-98により、柔軟性に富んだ運転管理システムが簡単に構築できるようになった。

本報では、パッケージソフト PMX-98 を応用したバッチ

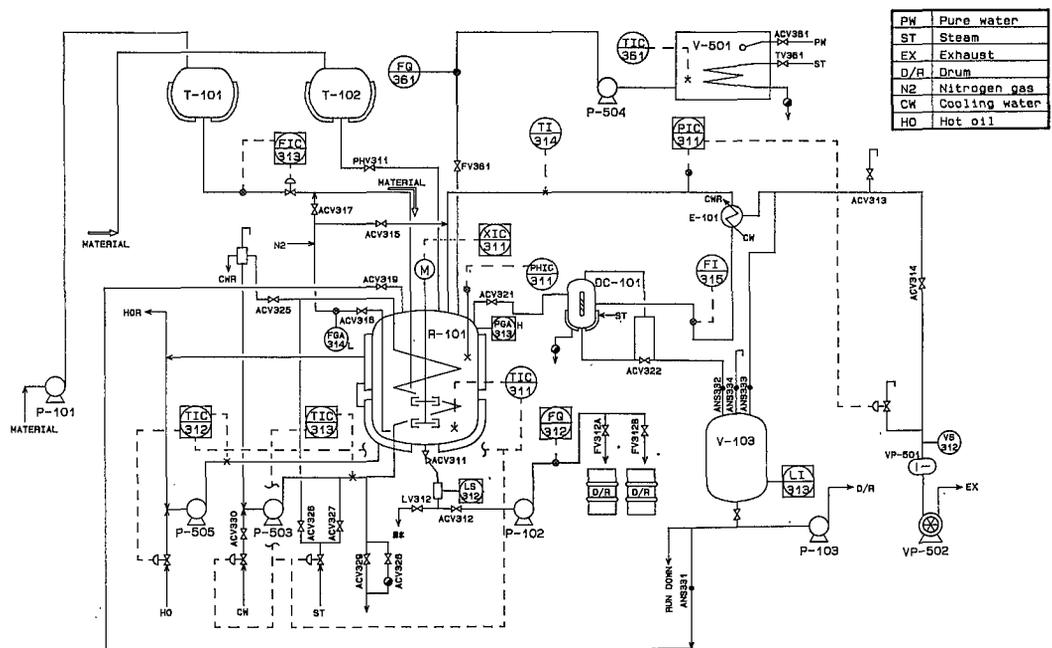
プラント運転管理システムをファインケミカル分野の工場へ納入したので、適用事例として報告する。

### 1. 導入経緯

対象プラントは第1図フローシートに示すように、反応缶を主機とするバッチプロセスの化学プラントであり、多目的生産設備である。図中、⊖、○は従来思想計装で、⊕、⊙がシステム導入に伴う計器である。

#### 1.1 従来の運転管理

- (1) 自動化は反応缶の温度制御程度が主であり、単ループコントローラである。
- (2) 原料供給、ユーティリティ供給、動力操作、各種バルブ操作などは現場手動操作が主体である。
- (3) 生産管理は、オペレータがロット管理報告書に、仕込量と時間ごとおよび状態変化ごとの各種データを記入



第1図  
バッチ化学プラント  
のフローシート  
Fig. 1  
Flow diagram of  
chemical plant in  
batch operation

- (4) 品種切り換え、工程進行の都度に計器設定値の変更、手動操作手順の変更を必要とする。
- (5) オペレータのソフトチェンジの際、引継ぎ確認内容が多く、またその引継ぎ打合に時間を要する。従って、
- (6) ロット毎の品質安定性を維持するためには、熟練オペレータが必要である。

## 1. 2 自動化の目標課題およびシステム選定

プラントの自動化に当り、次に目標課題を列記する。

- (1) 品質の安定化
- (2) オペレータの省力化
- (3) 省エネルギー、省時間化
- (4) アラーム機能による危険予知化
- (5) バッチレポートによるロット管理化

これら課題に対して PMX-98 システムは十分な機能を備えており、しかも制御用プロセスコンピュータと比較すると、操作の容易性、システムの信頼性、拡張性では遜色なく、汎用性、互換性および、組合わせハードウェアの自由度では逆にすぐれていることが認識された。特に、経済生におけるの優位性は大きく、PMX-98 システムの採用が決定された。

## 2. PMX-98 の概要

PMX-98 は、パソコンと計測制御機器を接続してプロセス運転監視システムをプログラムレスで構築できるパッケージソフトウェアである。パソコンは日本電気製 PC-8000 シリーズ、FC-9800 シリーズが使用できる。また、計測制御機器はプログラマブルコントローラ、調節計、記録計などの市販ものを広く利用できる。

計測制御機器との接続は、通信インターフェース (RS-232C など)、I/O ボードなどを介して行う。このため各重のハンドラ (インターフェースプログラム) を用意してやる。

また、PMX-98 は、MS-DOS をマルチタスク化したリアルタイム・マルチタスク OS 上に、C 言語で作成したプログラムが並行して動作しており、速度面、機能面で優れたソフトウェア構成となっている。

PMX-98 の主な機能としては

- (1) イベント監視機能
- (2) データ収集機能
- (3) グラフィック画面表示機能

- (4) トレンドグラフ表示機能
- (5) メッセージ表示機能
- (6) 設定操作出力機能
- (7) レポートファイル作成機能
- (8) 文書ファイル表示機能

などがある。これらの機能はプログラムレスで設定、構築することができ、メニュー形式で入力項目を選択し、文字データはキーボードから F I F (Fill in the form: 空欄記入) 方式で、また、グラフィック・データはマウスでデータの入力を行える。接続機器の登録を終えると、その後の作業はすべてタグ名のみでシステム構築が行えるようになっており、ユーザにも使いやすいものとなっている。

## 3. システム基本思想

### 3. 1 システム設計方針

化学プラントにおける自動化の基本思想を次に示す。

- (1) 運転操作の容易性  
特別な知識技能を必要とせず、異常時においても簡単に取り扱えるものとする。
- (2) CRT による装置運転状況把握  
オペレータが現場巡回確認をしなくてもグラフィック画面、ステータス表示などにより一目で運転状況が判断できるものとする。
- (3) マンマシン対話形式  
自動による工程進行を原則とするが、原料投入などオペレータの介入を必要とする場合には、自動運転を一時停止してメッセージにて操作要求を行えるようにする。
- (4) データの保存  
バッチレポート、各種トレンド記録機能を有し、後日各種パラメータのデータを引き出すことができるものとする。
- (5) 運転操作の自由度  
自動運転中であっても個々の計器、バルブ、動力機器に対して危険でない範囲において、プログラムより回避し操作ができるものとする。
- (6) プログラムデータの変更の容易性  
変更を必要とするデータはプログラム領域でなく、オペレータ領域で行えるものとし、運転中であっても印字確認が可能にする。
- (7) 停電対策

動力機器に対してバックアップ電源がないために、瞬停 (2 秒内) および停電 (2 秒以上) を区分してその対策を備えるものとする。

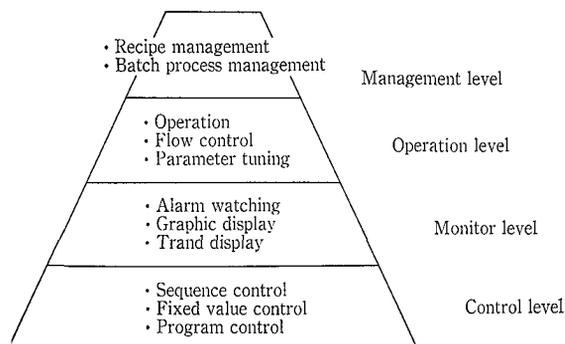
### 3. 2 運転管理システムの階層レベル

バッチプラントの運転管理システムは第 2 図に示すように管理レベル、監視レベル、操作レベル、制御レベルの 4 つの階層からなる。

#### 3. 2. 1 管理レベル

管理レベルはバッチプラントの各種データ、実績データを管理することが目的であり、品種管理、バッチ管理などがある。

品種管理は多品種少量生産に対応するため、品種ごとに異なる製法パラメータの管理を行うものである。品種ごとの製法パラメータとしては例えば、温度、圧力、時間などがあり、PLC (Programmable Logic Controller) ある



第 2 図 バッチプラントの運転管理システム  
Fig. 2 Management system of a operation for the batch plant

第1表 主要機器一覧表  
Table 1 Equipment list

Item no.	Name	Capacity	Press.	Temp.
R-101	Reactor	8 m <sup>3</sup>	FV••1.9	280
V-103	Receiver	3 m <sup>3</sup>	FV••1.9	180
T-101	Feed tank	1.5 m <sup>3</sup>	FV••1.9	100
T-102	Feed tank	1.5 m <sup>3</sup>	FV••1.9	100
V-501	Hotwater tank	2 m <sup>3</sup>	latm	100
DC-101	Decanter	0.3 m <sup>3</sup>	FV••1.9	100
E-101	Condenser	30 m <sup>3</sup>	FV••1.0	180
VP-501, 502	Roots vac. pump	Max 0.1 mmHgabs		
P-101	Feed pump	3.6 m <sup>3</sup> /h		
P-102	Discharge pump	8 m <sup>3</sup> /h		
P-103	Discharge pump	10 m <sup>3</sup> /h		
P-503	HW circu. pump	16 m <sup>3</sup> /h		
P-504	PHW feed pump	10 m <sup>3</sup> /h		
P-505	HO circu. pump	30 m <sup>3</sup> /h		
P-506	CW feed pump	60 m <sup>3</sup> /h		

いは調節計に設定される。

ある品種が選択されるとその品種に設定されたパラメータが制御機器にダウンロードされた後、確認キーなどの入力により実際の運転が開始される。品種ごとのパラメータはディスク上にファイルとして記録保存される。

バッチ管理は一つのバッチ生産が終了した時、そのバッチに関する一連の管理データをバッチレポートとして出力するものである。

このバッチレポートから、原料管理および品質管理のデータを得ることができる。

### 3. 2. 2 操作レベル

操作レベルはバッチプラントと人間とのマンマシン機能であり、運転操作、工程歩進、パラメータチューニングを行う。

運転操作は自動運転進行/停止操作、および機器、バルブなどの運転操作を手動で行うものであり、従来の制御パネル上の押釦スイッチの代わりにCRT画面上で行う機能である。

パラメータチューニングは調節計の各種パラメータ（PID定数、設定値など）の入力設定をCRT画面上に表示されるリアルタイムトレンドを確認しながら行うものである。調節計は市販の機器を利用するので、汎用性が高くなっている。

工程歩進は各工程間の移行をオペレータが確認するためのマンマシン機能である。

工程終了→メッセージ出力→オペレータ確認→次工程

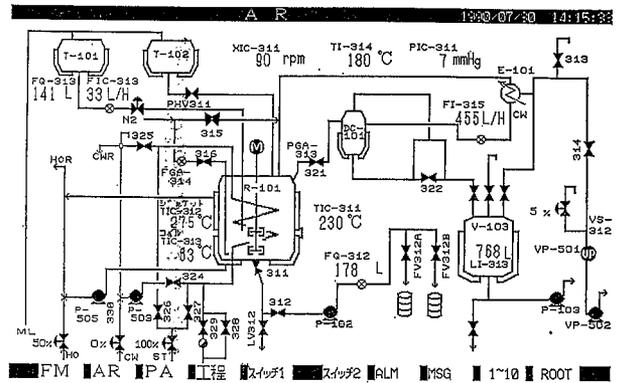
という半自動運転を行うことができる。

### 3. 2. 3 監視レベル

監視レベルは機器やプロセスの状態監視とオペレータに対する画面表示が主な機能であり、アラーム監視、グラフィック画面監視、トレンド表示などの画面表示ができる。

アラーム監視は機器やプロセスの故障信号を常時監視して異常時に警報を発生するものである。

グラフィック画面、トレンド画面表示はプロセスフローなどのリアルタイム表示、レコーダのような時系列データ



第3図 グラフィック画面例  
Fig. 3 Example of graphic display

のグラフ表示などを行う。

### 3. 2. 4 制御レベル

制御レベルはプロセス制御機能であり、バッチプラントの計量、調合、反応、分離、抽出工程などのシーケンス制御、プロセスの温度、圧力などを一定に保持する定値制御、あるいは予め登録された変化パターンを段階的に変化させるプログラム制御などがある。

制御用機器はPLC、デジタル調節計などを使用する。パソコンは監視レベルより上位のマンマシンインターフェース機能として使用することで、制御用と監視・管理用との機能分離を行っている。

## 4. プラントの概要

主要機器一覧表を第1表に示す。

- (1) 多目的バッチ反応装置であって品種ごとに異なるが、基本工程は

原料投入→反応→製品拔出

であり、品種切り換えごとに溶剤およびスチームによる装置洗浄を行う。

- (2) 1バッチ当たりの運転時間は10~30時間である。
- (3) 粉体原料投入については、入荷形態の関係により手動投入となる。
- (4) 今回、ソフトウェア対応において、自動運転化した品種（銘柄）は5種類である。
- (5) 設置場所：第2種危険場所

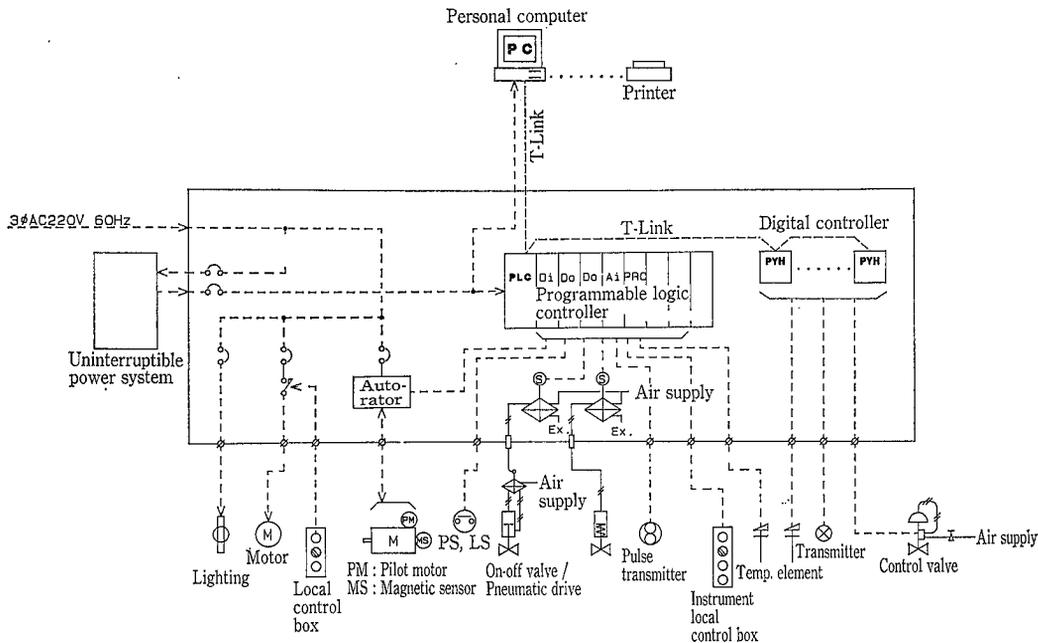
第1図フローシートにおける1銘柄用グラフィック画面を、第3図に示す。

## 5. システム構成およびハードウェア

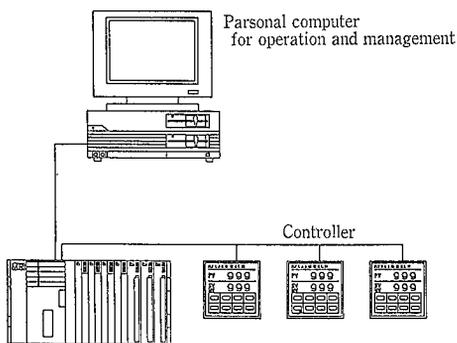
プラントの電気計装全体系統図を第4図に示す。本プラントのシステム構成はスタンドアロン型（1台独立型）であり、システム構成図を第5図に、使用機器一覧表を第2表に示す。スタンドアロン型は1台のパソコンと複数台のPLC、デジタル調節計などの制御用機器を接続して構成する。

パソコンと制御機器とのインターフェースは通信を用いるのが一般であり、PLC、デジタル調節計などの制御用機器は同一の通信ライン上に接続されているのが望ましい。

使用機器第2表に示すハード機器として富士電機（株）



第4図 電気計装全体系統図  
Fig. 4 Electric & instrument general diagram



第5図 スタンドアローン型システム構成  
Fig. 5 Hardware for stand alone system

製PLC: MICREX-F120H, デジタル調節計: PYH9シリーズ調節計を採用し, 通信ラインは同社が持つ F-NET (Tリンク) を利用して日本電気(株)製のパソコンへ接続した。Tリンクインターフェースは富士電機独自の情報ネットワークの名称であり, 分散されたデジタル機器を高速でしかも経済的に結合するシリアル伝送システムインターフェースで, Tリンクを使用することにより PLC とデジタル調節計を組合わせた複合制御システムを構築し, パソコン⇔PLC間でデータ伝送を行う PMX-98 コントロールシステムを形成した。以上のように, 使用ハード機器は市販汎用機器の組合わせであり, 全てが短納期対応品である。

主要機器の機能を次に示す。

(1) パソコン: マンマシンユニット部

ハードディスクを装備した市販品であり, 拡張スロットへTリンク用インターフェースボードをスロットインして PLC とのデータ伝送を行う。ソフトウェアは, PMX-98により マンマシンインターフェースの役割を果たしている。ここでは装置の制御は一切行われず, 指令, データ変更, 監視, 管理の機能をつかさどる。従っ

第2表 使用機器一覧表  
Table 2 Device list

Device list			
No.	Symbol	Component	Q'ty
1	P C	Personal computer	1
		Display	1
		Printer	1
2	P L C	Programmable logic controller	1
		Digital input module	2
		Digital output module	2
		Analog input module	1
		High speed pulse counter	2
		PC interface board	1
3	P H Y	(Digital controller)	
		Constant value control type	5
		Dual control type	1

て PLC で自動運転領域に入っている時は, パソコンは O A 用として別個の作業にも使用できる。

(2) PLC: 主制御ユニット部

運転制御プログラムを有し, パソコンよりの指令を受け, 銘柄管理, 動力機器の運転停止, バルブの開閉, デジタル調節計へのモード, パラメータ, データ伝送を行う。制御の心臓部であるので信頼性の高い工業用機器を用いる。

(3) デジタル指示調節計: 単ループPID指示調節計

単ループ系でPID制御を行うデジタル指示調節計である。これにTリンク通信機能を付加させて, 銘柄および工程ごとに变化するモード(CAS, AUTO, MAN), SV値(Set Value)などの各種パラメータを PLC よりの指令を受けて制御を行う。また, システムダウン時には, 手動バックアップ計器として使用可能でプロセスコントロールに重要な役割を果たす。

(4) 無停電電源ユニット: バッテリー付無瞬断切替電源ユニット

第 3 表 オペレーションスケジュール例  
Table 3 Example of operation schedule

PRODUCT: FM		REACTOR		OPERATION SCHEDULE			REV.6:1980.2.17	PLANT NOGUCHI
N.°	PROGRESS OF WORK	PARAGRAPH (JUDGEMENT)	SEQUENCE	EQUIPMENT / VALVE	SET VALUE PRESET VALUE	BATCH DATA (MAN. INPUT)	STATUS (MESSAGE)	NOTE
0	PREPARATORY WORK			ACV311 CLOSE			PREPARATION O.K.	P.C. START
1	R-101 CHARGE	VACUUM CHARGE R-1W 970kg R-2F 150kg Drip 10kg CL45 2704kg IAC 1873kg	6 LOW VAC. START	ACV319 OPEN			R-101 CHARGE (REQ. CHARGE)	P.C. OPE. H-9
		(VAC. BREAK END) VAPOR LINE	7 VAC. BREAK	ACV319 CLOSE R-101AG RUN	XIC-311 MV=100rpm		(CHARGE) (CHARGE) (CHARGE) (CHARGE) (CHARGE)	L.O. OPE. L.O. OPE. L.O. OPE. L.O. OPE. L.O. OPE. P.C. OPE.
		POWDER CHARGE CL80 450kg (LCB-101 PB ON)	8 AMBIENT CONDITION N2 FARGE				(CL80 CHARGE)	H-10
		N2 REPLACEMENT (PIC-311PV<101mmHg)	6 LOW VAC. START		PIC-311 SV=100mmHg		(CHARGE)	R-101CHARGE END L.O. OPE.
		(VAC. BREAK END)	7 VAC. BREAK					
		(PIC-311PV<101mmHg)	6 LOW VAC. START		PIC-311 SV=100mmHg			
2	REACTION		8 AMBIENT CONDITION REFLUX					P.C. OPE.
	HEATING	SELECT OF CONDENSATE JACKET	8 HO (HOT OIL)		TIC-311 PRG01(2h) SV=40→171°C			REACTION START
		(TIC-311 PV=>170°C)		TM05 START				
		(TM05 TMUP)			TM05=20h TIC-311 PRG02(5h) SV=170→235°C			
	COOLING 1	SELECT OF COIL (TIC-311 PV=<210°C) SELECT OF CONDENSATE	8 S.T.C (COOLING)		TIC-311 MV=50%			Z10:FIXED H-11
			13 RUNDOWN				(V-103 RUNDOWN)	
	RECOVERY OF AC	JACKET VACUUM	9 HO (HOT OIL)		TIC-311 SV=210°C PIC-311 PRG01(4h) SV=300→30mmHg			RECOVERY OF AC P.C. OPE. * 1
		(TIC-311 PV=>208°C) & (PIC-311 PV=<31mmHg)		TM06 START				
		(TM06 TMUP) & (TI-314 DV=>±3°C)			TM06=80min TIC-311 SV=230°C			
	RECOVERY OF EPM	(LI-313 PV=>180°C LI-313 DATA1)	6 HIGH VAC. START		PIC-311 PRG05(30min) SV=30→2mmHg	LI-313 DATA1		RECOVERY OF EPM DV=PV-SV
	COOLING 2				TIC-311 MV=50%	LI-313 DATA2		RECOVERY END
					TIC-311 SV=40°C			Z00:PV
								REACTION

通電時は商用電源で停電時はバッテリー電源でパソコン、PLC、デジタル調節計、および自動オンオフ弁用ソレノイドバルブへ電源を供給するものである。瞬停時は継続運転を行い、停電時にはプラントを安全方向に停止させるための操作可能時間をもたせることができる。

## 6. ソフトウェア

### 6.1 ソフトウェア構成

本適用例のソフトウェア構成を次に示す。

#### 6.1.1 パソコン

パッケージソフト PMX-98  
Tリンク伝送ハンドラによる  
総処理点数 : 1024 点  
使用処理点数 : 664 点

ビルドアップ、メンテナンスはユーティリティソフトで行う。ユーティリティソフトは 6.2.3項で述べる。

#### 6.1.2 PLC

プログラミングローダ LITE において、D25ソフトによりラダープログラムを作成する。ローダにてデバッグ、プログラムモニタが可能である。

\*LITE : 富士電機㈱の PLC 用プログラミングローダの商品名である。

プログラム容量 : 16 K ステップ  
使用容量 : 7801 ステップ

### 6.2 ソフト構築

プラントの自動運転を行うに当たりソフト作成の大項目を順を追って記すと次のようになる。

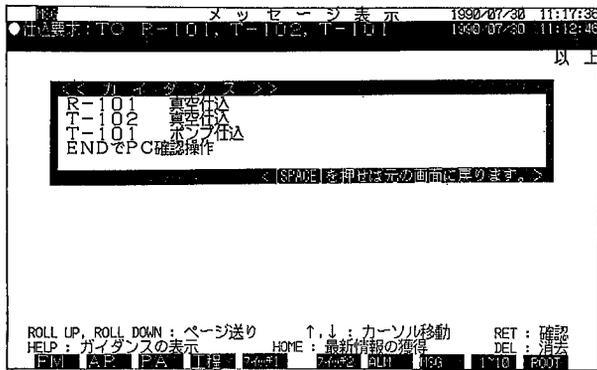
- ① PFD
- ② PID
- ③ プロセス操作手順
- ④ タイムスケジュール
- ⑤ オペレーションスケジュール&サブシーケンスフローチャート
- ⑥ パソコン⇔PLC取合リスト
- ⑦ PLCラダーソフト作成
- ⑧ PMX-98システム構築
- ⑨ パソコン単独デバッグ
- ⑩ パソコン、PLC結合シュミレーション
- ⑪ 実装置試運転調整
- ⑫ 実液運転調整
- ⑬ 各種図書変更修正
- ⑭ 引き渡し

#### 6.2.1 ソフト作成用図書の解説

前記①PFD～④タイムスケジュールまでは省略する。

##### 1) サブシーケンスフローチャート

プラントの銘柄、工程に直接関係しないシーケンスブロック (例えば反応缶ジャケットのユーティリティ切り換え、真空ユニットの起動/停止順序など) をメインフローから切り離しサブシーケンスとして取り扱うべく作成され



第6図 メッセージ表示画面例  
 Fig. 6 Example of message display

る動作フローチャートである。内容理解度を上げるため、動作機器状態一覧表を作成すると効果がある。

2) オペレーションスケジュール

工程の流れに従って、オペレーションスケジュールに必要なサブシーケンス、変化する動機器、自動オンオフバルブの状態、各種計器群のモード、設定値、プログラム状態を記し、必要時点でのバッチデータ、ステータス、オペレータメッセージおよびオペレータへの手動操作要求を表形式で表現するものである。サブシーケンスを表にブロック化することにより自動運転の流れを把握するのにたいへん便利である。その例を第3表オペレーションスケジュール例に示す。

3) パソコン⇔PLC取合リスト

本リストはパソコンで運転管理を行うのに必要な画面、データを整理しPMX-98システム構築のワークシートとなるものである。次に項目およびその内容を記す。

(1) フローグラフィック画面およびモディファイ I/O リスト

一画面当たりのフロー図案を作成しカラー、モディファイ機器の指定を行う。

(2) 銘柄/工程管理画面

銘柄/工程管理用の画面図案およびPLC内メモリの割付指定を行う。

(3) ワードデータアドレス

アナログ入力、パルスカウンタ、デジタル調節計、パソコン、およびPLC内のワードデータアドレスを指定する。

(4) ステータス用 I/O リスト

必要なステータスの文字列とそのメモリアドレスを指定する。

(5) メッセージ、ガイダンス I/O リスト

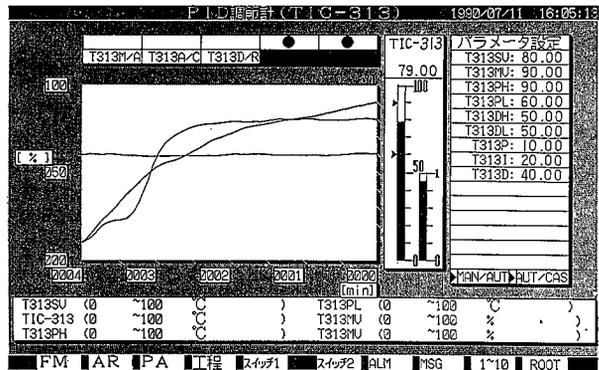
オペレータメッセージおよびそのガイダンスの文字列とそのメモリアドレスを指定するワークシートである。メッセージ表示画面の例を第6図に示す。

(6) アナシエータメッセージ I/O リスト

アナシエータメッセージおよびそのガイダンスの文字列とそのメモリアドレスを指定する。

(7) バッチデータ収集リスト

画面上で、必要データ項目、そのデフォルト値、およ



第7図 PID調節計画面例  
 Fig. 7 Example of PID controller display

び設定データメモリ、収集データメモリまたはワードデータ、そして収集条件メモリ（このビットが立った時に収集データメモリ内のデータをハードディスクへ収集する）の各アドレスを指定する。デフォルト設定値があるのは手動粉体投入などの場合にデフォルト値以外の量を投入すれば画面上でデータを書換え、デフォルト値どおりであれば無操作でデフォルト値がバッチデータとして収集される。

(8) S/W (スイッチ) 画面リスト

スイッチは銘柄セレクト、工程歩進、工程セレクト、サブシーケンスブロックの起動/停止、および単体機器遠隔手動操作用のスイッチ名称、およびその Di/Do アドレス指定を行う。

(9) オンオフ調節計

オンオフ調節計はPID調節計とは異なり、PLC内で作成する計器であり、デジタル調節計のように単体では存在せずパソコンのCRT上でのみ確認される。

この上下限設定値、HLアラーム、インターロック条件のデータメモリの指定を行う。

(10) PID調節計

デジタル調節計はPLCにおいて通信で各種データ変更を行い、I/O領域の割付は(3)項で指定されているので、ここでは、メッセージ通信領域のデータメモリを指定する。指示値はパソコンのCRT上に計器画面が表現でき、デジタル調節計の各種パラメータまでパソコンにて監視操作を可能にするものである。プログラムの設定値を変更する場合もCRT上で指定する。第7図にPID調節計画面例を示す。

(11) タイマ、カウンタ

タイマ、カウンタ共に設定値と現在値を持っておりパソコンにてデータ変更を必要とするものをTS, TR, CS, CRnnnで指定し管理を行う。

(12) 可変データリスト

例えば1ループの流量カウンタにおいて銘柄、工程ごとに設定値が変化するような場合にあらかじめデータメモリにデータをストックしておき、自動的に運転する場合にシーケンス上で引き出すものである。これらのデータ変更はパソコンでその使用する工程に入る前であればいつでも可能である。

## 6. 2. 2 PLCラダーソフト

バッチプロセスは基本的に工程歩進型で考えるべきであり、富士電機のPLCに標準装備されているSC命令を基本に作成し、パソコン、デジタル調節計が持つデータ取扱扱い上、BIN/BCD交換、データ転送を多用している。SC命令のメリットは

- (1) プログラム作成の手順が簡単である。すなわちリレー間の複雑なインターロック、自己保持回路に頭を悩ますことなく、ソフト作成が容易でユーザの自己メンテナンスが容易である。
- (2) タイムチャート、ラダー図、フローチャートの対応が非常に理解し易い。
- (3) テスト、調整時のモニタは、一連のリレーが順次にONするのを確認するだけで行える。

## 6. 2. 3 PMX-98ユーティリティ機能

PMX-98のシステムを構築するツールとして、ユーティリティソフトがある。ユーティリティソフトとは、ユーザがシステムのハードウェアの定義、アラームの登録、データ収集の設定、各種表示画面の登録、グラフィック画面の作成などを行うことで、プログラムレスでシステムを構築することができるソフトウェア機能である。

ユーティリティソフトは、一種のデータベースを構成しており、ユーザはメニュー画面の表示に従い、目的の入力画面を開けデータを入力することができる。ユーザが登録したデータは、システムの起動、または画面表示の際に参照される。

ユーティリティ機能により、システム構築時のみならず、プラント改造時のシステム追加変更にもユーザ自身で柔軟に対応が可能となり、機密保持、費用面、工期短縮にメリットが生じる。

本バッチプラントはプラント一括として当社が受注したので、運転管理システムのシステム構築についても、プラントメーカーである当社が行った。しかしながら、プラント納入後、グラフィック画面、メッセージ内容などの、オペレータのシステム運用の容易性を向上するための軽微なシステム変更は、すべてユーザ側で行えるようになっている。

例えば、ユーザが変更できるデータ、およびその方法を述べる。

## 6. 2. 4 変更内容

データの設定は大まかにハードウェア、バックグラウンド、マンマシン機能、ファンクションキーの登録に分類される。ベースとなるデータ（ハードウェアの登録など）を保護する意味で、ユーザでの変更可能なデータはマンマシン機能のみとしている。マンマシン機能では、グラフィック画面、トレンド画面、オペレータメッセージ、設定操作画面、レポートファイルの設定、変更が可能である。

### (1) グラフィック画面

グラフィック画面は静止画と動画を重ね合わせて表示している。静止画はプロセス機器などの、状態に応じて変化しない画像である。これは、ほとんど変更することがないが、もしプロセス機器構成に若干の変更があった場合には、市販のグラフィックツール Z's STAFF KID98 により変更が可能である。動画はプロセスの状態によって変化する内容を表示するが、アナログ値においては、数値またはバーグラフの選択があり、表示位置、色、表示データの追加、変更が可能である。デジタル値は記号、文字列の選択があり、それぞれON時、OFF時の表示属性の指定が可能である。

### (2) トレンド画面

トレンドでは、プロセスのデータをリアルタイムに取り込み画面に表示するリアルタイムトレンド画面と、一定周期、またはイベントにより取り込んだデータ収集ファイルからデータを読み出して画面に表示するヒストリカルトレンド画面がある。リアルタイムトレンドは、アナログ値が1画面当たり6点まで表示でき、表示タグの追加、削除とタイトル名の変更が可能である。ヒストリカルトレンドにおいては、アナログ値、操作端機器の状態を表示ができるが、データロギングされているデータに限られる。

### (3) オペレータメッセージ、ガイダンス

プロセス異常発生時に表示するメッセージ内容、あるいは、各銘柄における工程の表示内容の変更ができる。またメッセージについては、ガイダンスの表示内容の変更ができる。

### (4) 設定操作画面

銘柄、工程の選択、動力機器の起動停止、バルブの開閉、およびタイマ、カウンタ設定値の変更などを行う画面である。

ここでは、スイッチの表示位置の移動、スイッチの名称の変更、および、スイッチのタグ名の変更ができる。

### (5) レポートファイル

バッチデータのレポートを銘柄ごとに出力する。レポートのタイトル、ファイル名、出力フォーマットの変更ができ、プリンタ出力、テキストファイル出力の選択変更も可能である。

## む す び

化学プラントの計装は空気式から電子式アナログ、電子式デジタル、その後制御用コンピュータによるDDC(Direct Digital Control)へと急速に変化し、現在は、DCS(Distributed Control System)いわゆる“システム”が主流になってきた。一方、工場オートメーション(FA: Factory Automation)ではCIM(Computer Integrated Manufacturing)の時代を迎えている。しかし化学プラントへのシステム化は、複雑な計装制御を必要とし、困難であるためFAからは一歩遅れをとっているのが現状である。特に、ファインケミカル分野においては少量多品種のバッチ生産が多く、マンパワーを削減し生産性向上、品質安定化を図るために、DCSの導入計画が練られる。しかし、制御用プロセスコンピュータを導入すると、プラント建設費の20~30%の費用が計装システムに費やされ、製品コストへの波及が大きくなり、数多く採用されていないのが実状である。

複雑な多品種生産を行うバッチプラントを経済的に成り立つ価格でシステム化を遂げているのがPMX-98バッチプロセス運転管理システムである。本報紹介のユーザは更に、入出力処理点数750点、ソフト処理では、PMX-98:1020点、PLC:12Kステップを越える単一製品バッチラップ生産設備を導入され順調に稼動中である。

今後、PMX-98パッケージソフトをさらに拡大充実し、生産管理、生産計画などを含めた統合生産管理システムの開発を図り、信頼性の高く、しかも扱い易いソフトを安価にプラントユーザへお届けできるよう努力していく所存である。

### 〔注記〕

MS-DOSは、米国マイクロソフト社の登録商標  
Z's STAFF KID98は(株)ツァイト社の登録商標

# 静電気によるGLの損傷とその対策

## Troubles of Glass Lined Equipments by Static Electricity and Countermeasures against It



(化)技術部 製品開発課  
沢田 雅光  
Masamitsu Sawada

In the last decade, about twenty five cases of troubles have occurred on glass lined equipments by static electricity. This static electricity is produced by three ways; collisions of contents themselves, frictions of contents and lined glass surface by agitating, and carrying from outside of a reactor. Then straged static electricity causes various spark discharges at the interface of contents and a lined glass or between a lined glass surface and a base metal. These spark discharges break the lined glass like as chipping or pinhole.

This report mainly shows the examples of these troubles and countermeasures against the static electricity.

### まえがき

本誌前報<sup>1)</sup>において、東京大学生産技術研究所の山本助教による講演の抄録を掲載させて頂いたが、その内容は主に粉体に係わる静電気の基礎とその静電気を有効に活用するための理論および応用例などについてであった。

GL 攪拌槽に関する限り、静電気は否定的なものである場合が多い。既報<sup>2)</sup>において、GL 攪拌槽に発生する静電気の概要を述べたが、その時点で経験した静電気によるGL 機器の損傷は2例であった。以来、現在まで約10年間で25件発生している。その25件は、GL 機器が損傷したことで当社がなんらかの対応をしたものだけの数であり、実際にはもっと多くの事故や生産性障害が起きているものと予測される。樹脂製品の量産化、多様化が進む中、各種原材料のファイン化も手伝い、この種のトラブルは今後も引き続き多発する傾向にあると考える。このような静電気に対し、効果的な防止対策は見つかっていないのが現状であるが、多くの損傷事例と、今現在考えられる静電気対策などについて次に述べる。

### 1. グラスライニング攪拌槽内での静電気発生

グラスライニング攪拌槽は、化学プラントのプロセス中駆部に位置することが多く、攪拌槽の前後には原料仕込用あるいは、排出用の配管類、熱交換器、貯槽などが付属する。グラスライニング攪拌槽内の静電気には、このような槽外のプロセスにおいて発生した静電気が槽内に持ち込まれる場合と、槽内の攪拌により発生する場合の2種類に大別される。ここでは特に、槽内で発生する静電気を扱うことにする。

#### 1.1 帯電

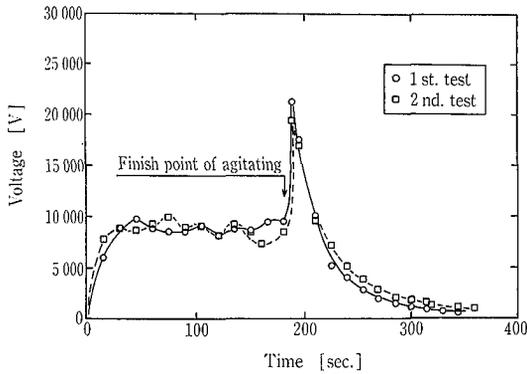
グラスライニング攪拌槽中で静電気を発生させる因子として、槽内部の材質、形状、攪拌動力、仕込まれる原料の種類とその性状、量がある。槽内部の材質はもちろん全面ガラスで体積抵抗率の高い誘電体である。槽形状は円筒型で、攪拌効率を良くするため、攪拌翼の他にバッフルが設置されているのが普通である。攪拌の強さは、仕込まれる数種の原料が充分混合されるように設定されている。以上のことから、仕込まれる原料次第では静電気が発生することは極めて当然の仕様といえる。今までに静電気が発生

したときの仕込まれた原料についての詳細は把握できていないが、体積抵抗率の高い ( $10^{14}\Omega \cdot \text{cm}$  前後) 溶剤および粉粒体であることが分かっている。特にこの両者の混合物である場合が多い。ここで帯電列の例を第1表に示す。帯電列中の2つの物質を摩擦または剥離したとき、表中上の物質が正極性(+)に帯電し、下の物質が負極性(-)に帯電する。その帯電量は、帯電列中の位置が離れるほど大きくなる。例えば、ガラスとポリエチレンが摩擦、剥離を起こすとガラスが正極性、ポリエチレンが負極性に帯電することになり、その帯電量はガラスと絹の場合より大きい。

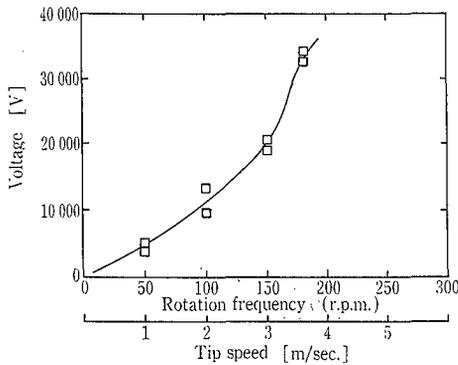
グラスライニング攪拌槽内で攪拌され、静電気を発生し、それが蓄積されるような原料としては、表中の物質以外にベンゼン、トルエン、ヘプタン、ブタノール、ヘキサン、ブタジエン、四塩化炭素、キシレン、純水などがある。

第1表 帯電列の例<sup>3)</sup>  
Table 1 An example of series of frictional electrification

Metals	Fiber	Natural matter	Synthesis resin
(+)	(+)	(+)	(+)
		Asbestos Hair Glass Mica	
Lead	Wool Nylon Rayon		
	Silk Cotton Hemp	Wood Skin	
Zinc Aluminium	Glass fiber Acetate	Paper	
Chromium			Ebonite
Iron Copper Nickel Gold		Gum	Polystyrene
Platinum	Nylon		Polypropylene
	Polyester Acryl		Polyethylene
	Polyvinylidene	Celluloid Cellophan	
(-)	(-)	(-)	(-)
			Vinyl chloride Polytetrafluoroethylene



第1図 攪拌時間と発生電位  
Fig. 1 Relation between agitating period and potential



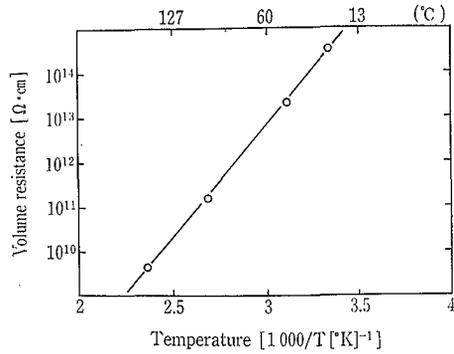
第2図 攪拌速度と発生電位の一例  
Fig. 2 An example of relation between agitating speed and potential

る。そして、これらの原料の量が多いほど帯電量も大きい。またポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレンなどの粒体では、粒が細くなるほど帯電量も大きい。このような原料でも塩酸、硫酸、水道水などの体積抵抗率の小さい物質が多く添加されていれば静電気の発生は問題にならないようである。溶剤中への微量な水の添加は水滴と溶剤との接触摩擦による帯電、さらには水滴が溶剤中の電荷を集めるといように逆に静電気の発生を助長することがある<sup>4)</sup>。

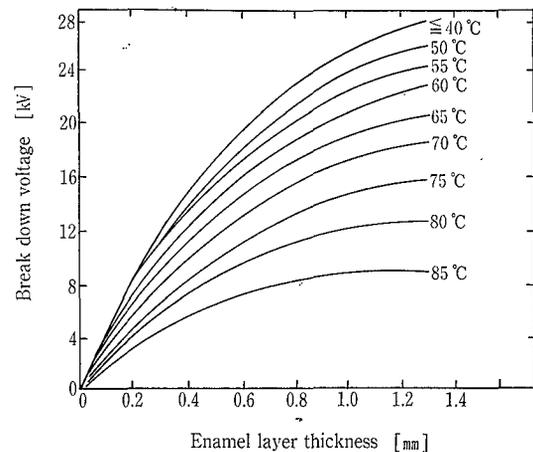
攪拌槽内で発生する静電気は、攪拌によるガラスと原料の衝突摩擦、分離の他に、2種類以上の原料同士の衝突、分離あるいは、槽内の高圧洗浄の際の洗浄水の吐出、衝突、付着物の剥離などによるケースもある。

体積抵抗率約  $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$  の粒状粉体と、約  $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$  の溶剤からなるスラリーを 100 l のガラスライニング攪拌槽内で、スパン 400 mm の攪拌翼を用い回転数 150 r.p.m. で攪拌したときに発生した電位の測定例を第1図に示す。

攪拌開始後20秒で約 9 kV に達し、その後攪拌を続けても電位の増加は認められず、電荷の発生量と漏洩量がバランスされると考えられる。しかし、攪拌開始から 180 秒後に攪拌を停止したところ、一時的に電位が上がり、約 21 kV まで観測された。電位の測定は、液表面近傍で測定したが、攪拌を停止したとき、沈降していた溶剤より高い電荷をもった粉体が表面に浮いてきて測定プローブの近くに集まったため、一時的な電位の上昇となった。すなわち攪拌中には部分的に 21 kV 以上の高い電位に達していたものと思われる。



第3図 グラスの体積抵抗と温度の関係  
Fig. 3 Relation between volume resistance of glass and temperature



第4図 グラス厚みと破壊電圧<sup>6)</sup>  
Fig. 4 Relation between enamel layer thickness and breakdown voltage with temperature

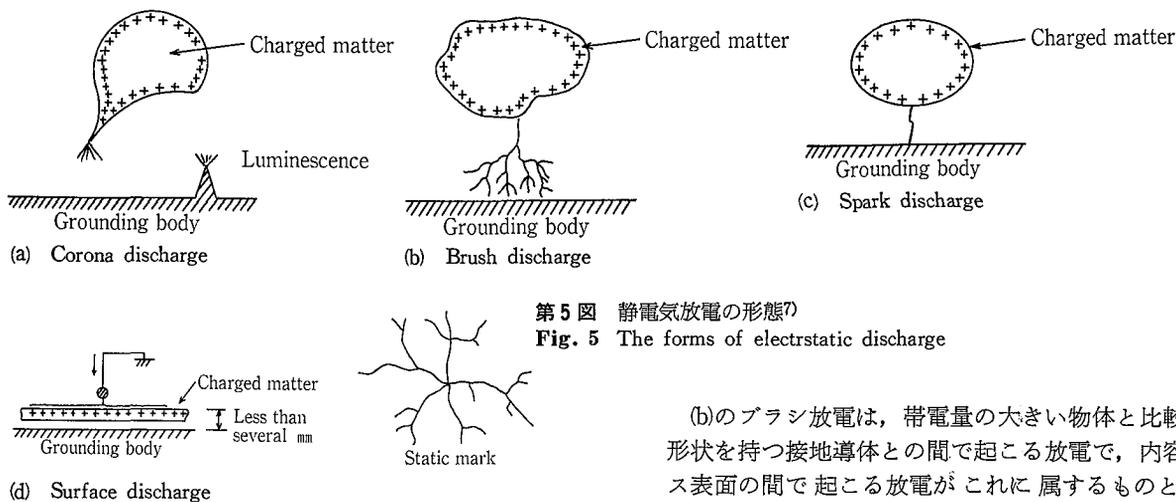
ピーク電位を記録した直後から電位は減衰し、攪拌停止後 150 秒で電位は約 1 kV 以下になった。

次に、同じ条件で回転数のみを変化させたときのピーク電位を測定したので、その結果を第2図に示す。横軸の速度は、翼先端の周速を表わす。この結果は、攪拌翼の回転数の上昇は帯電電位を確実に増加させることを示すものである。

またこの時、槽内温度と帯電電位の関係も調べた。ライニングされたガラスの体積抵抗率と温度の関係をワイブルプロットにより第3図に表わした。20°C のガラスを 45°C まで昇温すると、約 1 ケタ抵抗率が低下することが分かる。ところが、槽内温度を同じように 20°C から 45°C に上げてても帯電電位は低下しなかった。これは  $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$  以上の抵抗率が 1 ケタ程度下がって、漏洩し易くなっても帯電量の方が大きく上回り、電位の低下につながらなかった。あるいは、一般に温度の上昇は静電気が発生し易くなるといわれており<sup>5)</sup>、相殺されたためと考えることもできる。

## 1. 2 放電

正極性と負極性にそれぞれ帯電した 2 つの物体は、その帯電電位が 2 つの物体で挟まれる電界の絶縁破壊強度以上に達したとき、放電により急激に電位が緩和される。この絶縁破壊強度は、例えば電界が空気であれば約  $3 \times 10^6 \text{ V/m}$  であり、この値以上の電位が蓄積された場合に気中放電現象が認められる。



第5図 静電気放電の形態?  
Fig. 5 The forms of electrostatic discharge

一般的なライニング用ガラスの絶縁破壊強度は、第4図に示すとおりである。1.2 mmにライニングされたガラスに40°C下において、25 kV以上の電位が加わったとき破壊し、温度の上昇に伴いその絶縁破壊強度は低下し、破壊電位も下がる。

ガラスライニング攪拌槽内の放電は、3種類のケースが考えられる。1つは内容物間での放電で、内容物が1種類のときは強い攪拌により分裂した際にそれぞれが両極に帯電し、再度接近した時放電を起こす。内容物が2種類以上のときは、いずれかが正極性になり、他が負極性に帯電し、それらが分離して放電を起こす。

別のケースとしては、内容物とライニングされたガラス表面との間で起こる放電である。第1表でも示したように多くの場合、内容物とガラスの摩擦、衝突が繰り返されると内容物が負極性に、ガラスが正極性に帯電する。攪拌による乱流や液面の上下で両者が接触・分離を繰り返すようなところに放電が起こり易くなるわけである。攪拌槽内の気液界面、攪拌翼やパッフル翼の裏側などがこの部位に相当する。

さらにもう1つのケースとしては、上記現象から電気二重層が形成され、正極の電荷が集まるガラスの表面と、アースされた負極性の素地金属との間で電位が生じ、第4図で示した破壊電圧以上の電位が発生したときに起こる放電のケースである。前記の2つのケースでは、内容物間あるいは、内容物とガラスの間の放電であったのに対し、この場合は、ガラスが絶縁破壊することによる放電であり、槽内の帯電量が増せば、内容物とガラスの接触、分離の如何にかかわらず発生する。

いったんガラスが絶縁破壊し、素地金属に達する貫通孔（ピンホール）ができると、その後もピンホール近傍のガラス表面と素地金属間で放電が繰り返される。ここで静電気放電の形態を第5図に示す。

(a)のコロナ放電は、帯電した物体に尖鋭な突起部分の刃状部分があるとき、または帯電物体の近くに突起状あるいは、刃状の接地導体があるとき、突起部分などの近くだけに微弱な発光が現れる放電といわれているが、ガラスライニング攪拌槽内においては、内容物が流体であること、ガラス面が平滑であることなどからこの形態の放電は少ないと思われる。

(b)のブラシ放電は、帯電量の大きい物体と比較的平滑な形状を持つ接地導体との間で起こる放電で、内容物とガラス表面の間で起こる放電がこれに属するものと考えられる。

(c)の火花放電は、帯電物体と接地導体の形状がともに比較的平滑なときに、強い破壊音と図に示すような一条の発光を伴って突然発生する放電で、ガラス表面と素地金属間の放電はこの形態であり、ガラス層にピンホール状の損傷を与える。

(d)の沿面放電は、帯電物体の背面に接地導体がある場合に、帯電物体表面の電位が非常に大きくなったとき、帯電物体の表面に沿って発生する放電である。ガラスの損傷の中でピンホールを中心にして、スタティックマークが観察されることがあるが、正にこの沿面放電によるものである。火花放電によって形成されたピンホール中に出現した素地金属とガラス表面との間の放電現象と考えられる。

### 1. 3 緩和

蓄積された電荷は、放電により瞬時にあるいは電気伝導によって徐々に漏洩、緩和される。ここで電気伝導による緩和時間  $\tau$  (時定数ともいう) は、帯電している物体の体積抵抗率を  $\rho$ 、その誘電率を  $\epsilon$  とすると次式で示される。

$$\tau = \rho \cdot \epsilon$$

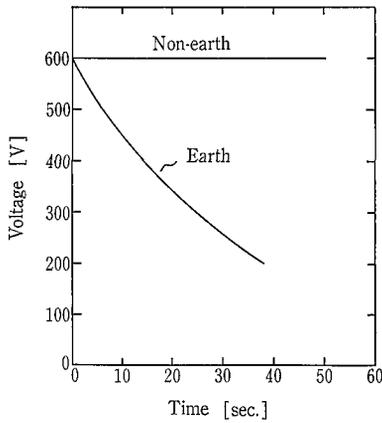
すなわち緩和時間は、帯電している物体の体積抵抗率あるいは、その誘電率に比例して長くなる。

また帯電電位  $V_m$  の  $t$  秒後の電位  $V$  は、次式の古典的緩和法則で表される。

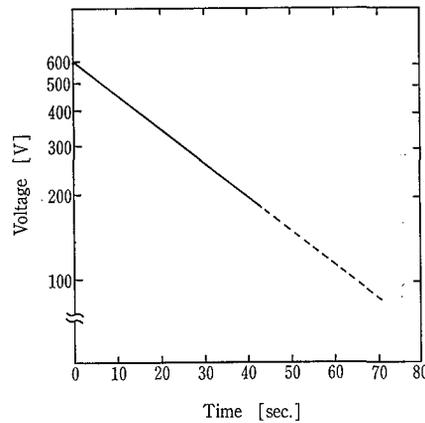
$$V = V_m \cdot e^{-t/\tau} \quad \text{①}$$

①から  $t = \tau$  を代入して、緩和時間後の電位を求めると  $V = 0.37 V_m$  となり、緩和時間とは初期の帯電電位の 37% の電位になるのに要した時間ということになる。

北川ら<sup>8)</sup> は、約 2 l のガラスライニング容器中にミネラルスピリットを約 1.8 l 入れ、これを電氣的に 600 V まで帯電させた後、電極を取り除き、静置した状態で電位の減衰を調べた。その結果を第6図に示す。(a)はガラスライニング容器の素地金属からのアースの有無による時間と電位の関係を表したもので、アースを施すことによって初めてガラスを通し、電荷が漏洩することがわかる。この減衰曲線を(b)に示すように縦軸の電位を対数表示すると、直線になることから①式にあてはめると、



(a)



(b)

第6図 帯電電位の減衰曲線  
Fig. 6 The decline curves of charged potential

$$V = 600 \cdot e^{-t/34.6}$$

②

と書き換えられる。この式から緩和時間は、34.6秒であり、半減期は24.6秒が求められる。

また、仮にこの容器に50kVの帯電があったとし、それが100Vまでアースからの電気伝導のみで緩和すると仮定すると、約4分かかることになる。100ℓのテスト機の場合も半減期は約30秒であったが、例えば約30kVに帯電していたものが100V以下に減衰するには6分以上必要であることが分かっており、実際に使用されているガラスライニング攪拌槽は、これらのテスト容器に比べ、ライニングされたガラス表面積に対する内容物の量が大きいので、静置した状態での漏洩時間ももっと大きいと予測される。

## 2. 静電気によるGLの破壊状態

固体誘電体の電氣的破壊は、真性破壊および電子なだれといった電子的破壊に始まり、純熱的破壊を経て機械的破壊に至ると説明される絶縁破壊と、トラッキング、部分放

電あるいは、トリッキングなどと呼ばれる放電による破壊があるといわれている<sup>9)</sup>。

静電気によるGLの破壊にも絶縁破壊と放電による破壊の両者が存在する。GLの静電気による破壊例を写真1に示す。

(a)から、直径0.5~1.0mmのガラス表面から素地金属に達するピンホールで、ガラス表面の開孔部周囲の角が取れて丸くなっていることがうかがえる。これはガラスが絶縁破壊あるいは、放電により貫通孔ができ、その時あるいはその後の放電の熱により開孔部周囲が溶けて角が取れたものと思われる。

(b)はガラス表面に形成されたスタティックマークの写真である。中心部は、素地金属まで貫通したピンホールがあり、樹枝状の部分はガラスの微細な表層チップの集団である。

(c)も樹枝状ではなく、円形ではあるが、10~15mmφの同様のトリッキングが認められる。

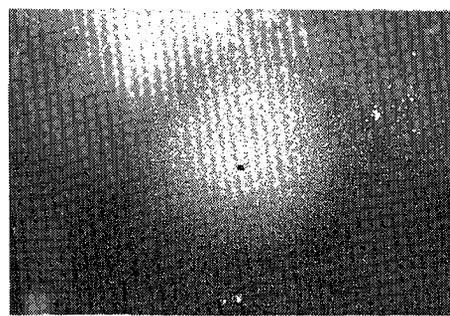
パッフルチップの先端の小さいR部に破壊が起こるとピ



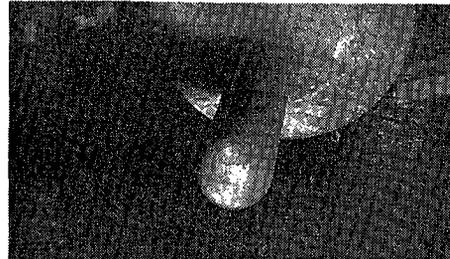
(a)



(b)



(c)



(d)

写真1 静電気によるGLの破壊例

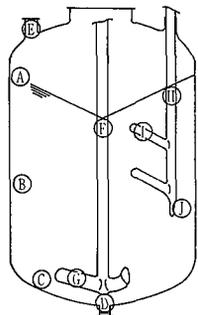
Photo. 1 Examples of GL destruction by electrostatic discharge

第 2 表 静電気による損傷事例一覧表

Table 2 The list of troubles by static electricity

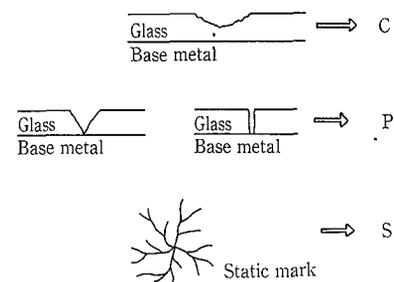
No.	Vessel M <sup>1</sup>	Contents	Tip speed m/s	Temp. °C	※ 1 Location of defects	※ 2 Phenomena of defect	Remarks	No.	Vessel M <sup>1</sup>	Contents	Tip speed m/s	Temp. °C	※ 1 Location of defects	※ 2 Phenomena of defect	Remarks
1	2	Ligroin, powders, etc.	—	—	A, B, C, G	P, S (Numberless)	Dipping pipe and level sensor were made of metal.	13	3.5	Polyethylene, hexane, etc.	—	—	A, F, H	P (Many)	Pinholes occur at the downstream of nozzles with vessel wall.
2	2	Benzene, sulphuric acid, etc.	—	—	A	P, S (Numberless)		14	3	N-hexane, powders, n-cyclohexane, etc.	—	—	A, B	P, C (Many)	Charge eliminating agent was added.
3	2	Polypropylene, toluene acetic anhydride, pyridine, benzene	—	—	B, C, J	P (Numberless)		15	16	Polyethylene, carbon tetrachloride, solvent, etc.	1.7 - 3.3	130	A, F, H	P (Many)	
4	55	Heptane, butanol, etc.	—	—	I, J	P (Many)		16	1.8	Benzene, toluene, heptane, powders, etc.	—	—	A, C, G, I	P (Numberless)	A worker observed spark discharges from view window
5	40	Polypropylene, etc.	—	—	E, F	P (Numberless)		17	7	Carbon tetrachloride, polypropylene, polyethylene, etc.	5.5	120	A, B, C, F, I	P (Numberless)	
6	1.5	Toluene, powders, hydrochloric acid, etc.	1.6 - 6.1	—	A, C, F, G, I	P (Numberless)		18	3	Toluene, nitrobenzene, methyl ethyl ketone, polyethylene, etc.	1.9 - 6.0	80 - 130	D, G, H, I	P, (52 pieces)	
7	4	Plastics, hydrochloric acid, etc.	—	—	A, B, C	P (Numberless)		19	13	Pure water, chlorine, polyethylene, surface active agent, etc.	—	—	B, C	P, C (Many)	Pinholes increased in spite of Ta repairing.
8	14	Solvent, powders, etc.	—	—	B	P (Numberless)		20	3	Xylene, powders, etc.	—	170 - 180	D	P (6 pieces)	
9	60	Polypropylene, etc.	—	—	F	P (Many)		21	15	Hexane, solvent, powders, etc.	5.3	110	C	P (2 pieces)	Pinholes occur just below inlet nozzle.
10	3	Plastics, etc.	—	—	B, G, I	P, S (Many)		22	12	Hexane, solvent, powders, etc.	5.0	60	C	P (3 pieces)	Pinholes occur just below inlet nozzle.
11	6	N-heptane, solvent, etc.	—	—	A, D	P, S (Numberless)		23	20	Hexane, globular silica, etc.	2.11 - 6.7	150	C, G	P (70 pieces)	Baffles were made by metal.
12	40	Polypropylene, butadiene, etc.	—	—	G, F	P (Numberless)		24	8	Paraformaldehyde, sulphuric acid, etc.	—	—	A, C, F, G, H, I	P (103 pieces)	

※1



- A : Vessel wall near liquid surface
- B : Middle height of vessel wall
- C : Bottom of vessel
- D : Drain nozzle
- E : Inlet nozzle
- F : Shaft of impeller
- G : Blades of impeller
- H : Shaft of baffle
- I : Blades of baffle
- J : Tip of baffle

※2



ンホールだけで済まされず、(d)の写真に示すようなチップングへと発達し易い。バッフルおよび攪拌翼のブレード部の小R部も同様の傾向になることが多い。

GLの静電気による破損の中には必ずしも素地金属まで達しておらず、ガラス表面のチップングのみの場合もある。これは、内容物とガラス表面との間の放電による衝撃痕あるいは、熱に起因するものと推測する。

GLの静電気による破壊の最も顕著な特長は、破壊箇所が無数に及ぶことである。過去の事故例では、1基の攪拌槽内で合わせて1000箇所以上といった具合である。そして、その破壊の多くは写真1の(a)およびそのガラス表面の開口部が欠けた状態を呈している。

### 3. 損傷事例

最近10年間の当社に寄せられたガラスライニング攪拌槽の静電気による損傷状況を第2表にまとめた。

表中で内容物については、判明している範囲で記入した。その量比については明かでない。

チップスピードは、攪拌翼の回転数と翼のスパンから算

出した。

損傷部位と損傷状態は、表下に示した概略図と記号で表した。

これらの事例の特長と共通点について次に述べる。

No.1とNo.23では、金属製のアクセサリを挿入していてもまた、No.13ではTaプラグで補修しても静電気による損傷が起きていることから、これらの物がアースになり、損傷を防止することにはならないことが解される。帯電し易い物体は、電荷の移動が極めて遅く、金属部分に到達して漏洩する以上に、蓄積する速度が上回るためである。ピンホールが発生しても、数ミリないし数十ミリ離れた部分に新たに絶縁破壊が起こることからも裏付けられる。

No.13の場合は、槽の胴部(気液界面付近)に設けられた2カ所のノズルスエッジの下流側に発生しており、ノズルの存在による流れの乱れが損傷に結びついた例である。

No.14では除電剤を添加していたにもかかわらず、多くのピンホールやスタティックマークが発生している。除電剤は、緩和時間を小さくする効果はあるが、その添加量に

よっては不純物として帯電を助成する恐れがあることを示唆している。

No. 21, 22は同じプロセスに同じ目的で設置された2台の攪拌槽において、それぞれ同じようにして原料を仕込み、共に同じ仕込ノズルの直下のガラスが破損されたケースで、この場合は槽外からの持ち込まれた静電気によるものである。

No. 2, 6, 7, 24では、内容物に体積抵抗率の小さい( $<10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ )塩酸や硫酸が含まれているにもかかわらず、多くのピンホールが発生している。これらの液体の添加量、濃度など詳細な条件が明らかでないが、既に静電気が発生している状態の中へ仕込んだものと理解している。

これら24件の事例で共通点としては、ほとんど溶剤と体積抵抗率の大きい粉体の混合物であること、損傷状況がピンホール状で数が非常に多いことが分かる。発生部位は、気液界面および内容物が接触、分離を繰り返すところに多い。

#### 4. 静電気対策

グラスライニング攪拌槽内の静電気は、機器の損傷だけでなく、人体への感電、火災および爆発といった重大災害の危険性があり、有効な対策を講じなければならない。田島<sup>10)</sup>は災害の防止対策として、次のことを実施すべく提案している。

- (1) 接地を確実に励行する。
- (2) 混合、攪拌などの運動速度を大きくしない。
- (3) 容器の中にイオン化空気を送り、静電気を除電する。
- (4) 容器内で生成される可燃性混合気の濃度を測定し、爆発範囲に入らないように管理する。

GL機器の上記以外に考えられる静電気対策を次に列挙する。まず、攪拌槽の仕様としては、

- (1) 体積抵抗率の小さい材料の使用
- (2) 強い攪拌を避ける。
- (3) バッフル強さを低くする。
- (4) 槽内面の凸凹を減らす。
- (5) 防災の観点からアースを増す。

(1)について、現在使用されているガラスの体積抵抗率は、約 $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ であるが、これを $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下にするのが良いとされている。しかしながら、現時点では耐食性を考慮して、なおかつ体積抵抗率を $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下にすることは困難であり、今後の開発が望まれる。静電気の発生ステージに合わせ、金属製の攪拌槽とグラスライニング攪拌槽の2槽にすることなどは有効な手段であろう。(2)については攪拌翼の形状、スパンを小さくする。あるいは回転数を下げるといった方法が考えられる。チップスピードは $1 \text{ m/s}$ 以下<sup>11)</sup>程度が妥当と思われる。

(3)について、バッフルの本数、翼の形状、設置角度などの変更が考えられる。

(4)について、槽の液相部および気液界面にノズルや温度計などを設けない。また、付着物があればそれを除去して平滑なガラス面を確保する必要がある。

(5)のアースは、漏洩抵抗が $100 \Omega$ 以下にしないと効果がないといわれている。アースの設置は、アースを通して電

気伝導による槽内の電位の緩和、人体の感電防止ということでは有効であるが、一方で、急激な電荷の蓄積があれば電気伝導だけでなく放電による緩和が起り、機器の損傷、火災などに結びつく可能性もある。

次に内容物の性状としては、

- (6)  $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下の体積抵抗率の原材料を使用する。
- (7) 引火性原料を避ける。
- (8) 粉体原料は、その粒径を大きくする。
- (9) 粉体原料を湿潤化して用いる。
- (10) 除電剤を添加する。
- (11) 量を減らす。

などが挙げられる。

また、原料の仕込過程では次のことに留意しなければならない。

- (12) 原料の搬送速度を下げる。
  - (13) 電導性物質を先に仕込む。
  - (14) 金属性スクリーフィーダーなどを使い、仕込速度を下げる。
  - (15) 粉塵を起さない。
  - (16) イオン化ガス中を通す。
- そして、運転時の対策としては次のような方法がある。
- (17) 槽内に不活性ガスをバージする。
  - (18) 静置するなど緩和時間を設ける。
  - (19) 気相部の湿分を増し、 $65 \sim 70 \%$ 以上に保つ。

グラスライニング攪拌槽における静電気現象は、再現性に乏しい。それだけ影響を与える因子が多く、種々の対策が考えられる反面、これといった効果的な対策が見あたらないのが現状である。

経験的に攪拌槽内で発生した静電気を除電することは極めて難しく、除電対策が逆に静電気発生量を増加させることにもなりかねない。すなわち、製品の製造プロセスの変更をも含め、静電気を発生させない方策こそ重要と考える。

#### む す び

静電気によるグラスライニング攪拌槽の損傷事例については、詳細な情報が把握できていないし、また本報で公表できる範囲にも制約があり、簡略化されたことをご容赦願いたい。静電気対策については、結果的に製品品質、生産性を低下させる内容に終始したが、これらが現在考えられる対策であることをご理解頂く一方で、当社においては耐静電気用GL機器の開発が急務であると痛感する次第である。

#### 〔参考文献〕

1. 神鋼パンテック技報, Vol. 34, No. 3, (1990)
2. 神鋼ファウドラニューズ, Vol. 25, No. 1, (1981) p.1
3. 静電気安全指針, (1988) p. 3
4. 森田;安全工学, Vol. 9, No. 3, (1970) p. 144
5. 静電気ハンドブック, 静電気学会編, (1981) p. 799
6. I S O 2746, (1973)
7. 静電気安全指針, (1988) p. 8
8. 北川ら;未発表, (1962)
9. 「放電ハンドブック」電気学会, (1989) p. 414, オーム社
10. 田島;「OHM」(1977) p. 68
11. 静電気安全指針, (1988) p. 20

# 内部ジャケット付リアクターの溶接技術

## Welding Engineering in Reactor with Inner Jacket



(化)生産管理部 生産技術課  
山田 公夫  
Kimio Yamada

Reactors with inner jacket have been designed to achieve higher productivity of PVC (Polyvinyl Chloride). Although the design of the special jacket has been proved in field operation to give better heat transfer rate, the fabrication of these reactors imposed several welding difficulties mainly because of much amount of weldment in closer joints.

Therefore we reviewed welding engineering in reactor with inner jacket and performed several tests on welding parameters by means of test model vessel.

This paper describes these test result and automated welding.

### まえがき

最近、塩化ビニールの懸濁重合反応などに使用されるリアクターの設備更新が盛んであるが、従来タイプより少しでも生産効率を高めたいとの要望が強い。当社が開発した「内部ジャケット付リアクター」は熱伝達効率が良くこのような要望に合致したリアクターであるが、構造上溶接箇所が非常に多く、かつ近接しており製作上の課題も多い。

このようなことから内部ジャケット付リアクターの溶接上の課題について検討を行った。次にこれらの検討結果および溶接の自動化について紹介する。

### 1. 内部ジャケット付リアクターの概要

第1図は内部ジャケット付リアクターの概略を示す。従来は「本体胴の外側」にあったジャケットを「本体胴の内側」に持ってきた所に大きな特長があり、従来のリアクターとはその構造が全く異っている。

このため機能面では、伝熱に影響を与える内部ジャケット板の板厚を、従来型の本体胴板厚に比べ $\frac{1}{2}$ 以下に小さくできるので、伝熱効率が良く生産性の増大に大きく寄与するものと期待される。一方製作面に関しては、構造上溶接箇所が多くしかも仕切板、内部ジャケット板のピッチが約70mmと近接しているため、非常に工数のかかる作りにくいリアクターといえることができる。ちなみに60 $m^3$ クラスの内部ジャケット部分の溶接長は

仕切板部 : 1500 m  
内部ジャケット板部 : 2200 m (3層仕上げとして)

であり、外部ジャケット式の場合に比べて格段に長い。従ってこれらの溶接をトラブルなく効率良く行うことが品質面、納期面で重要であり、施工方法、開先形状などについて検討すると共に実機モデル小型試験体による溶接試験、水圧試験を行って施工法の妥当性を確認した。

また溶接の自動化についても検討し実機に適用した。

### 2. 施工方法の検討

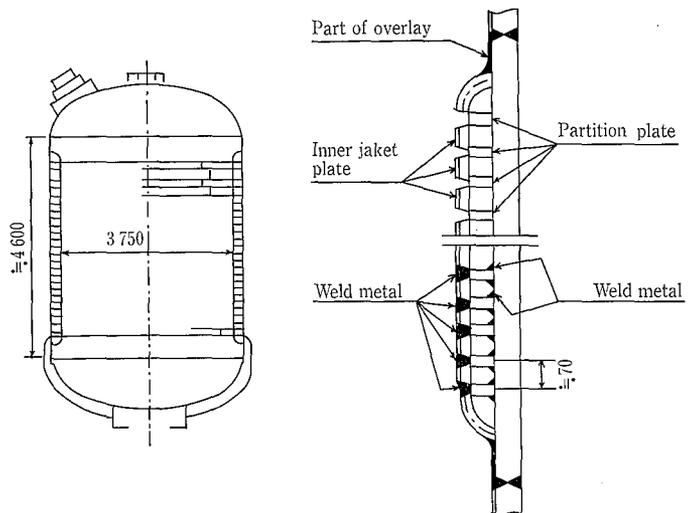
#### 1) 開先形状

溶接残留応力、能率の面から開先形状はできるだけ小さい方が好ましいが、あまりに小さいと開先底部の溶込みが充分得られなくなる。試験板による予備試験の結果も踏まえ、開先形状は開先角度30°、ルートギャップ6mmの狭開先とした。

#### 2) 溶接方法

能率、自動化の容易さ(トーチ回りがコンパクト)などを考慮し、母材、クラッド部共にCO<sub>2</sub>フラックスコールドアーク溶接を採用した。

第2図はフラックスコールドアーク溶接の溶着速度を、ほかの溶接法との比較で示したものであるが、手溶接の約2倍でCO<sub>2</sub>ソリッド溶接に比べても大きい。サブマージアーク溶接は能率は良いものの(180g/分程度と考えられる)フラックスの散布、回収、スラグの除去などの問題が



第1図 内部ジャケット付リアクター (60 $m^3$ クラス)  
Fig. 1 Reactor with inner jacket (60 $m^3$  class)

あり採用しなかった。

### 3) 積層

板厚、開先形状、溶着速度などを勘案し母材部1層、クラッド部2層の計3層仕上げとすることにした。また溶接手順については、1継手ずつの仕上げは現場施工上やりにくいこと、また角変形により仮付けが外れ精度が保てないなどの理由から各継手1層ずつ順次溶接することとした。

### 3. 実機モデル小型試験体による溶接試験

内部ジャケット板突合せ溶接部は、ピッチが約70mmと非常に近接している。このためある継手の溶接での残留応力などが隣の継手の溶接に悪影響を与え、溶接割れなどの問題を起こす恐れもある。これらを確認する目的で実機モデル小型試験体を製作し溶接試験を行った。

実機モデル小型試験体での主たる試験目的を次に示す。

- (1) 第2項で決定した開先形状、施工方法の妥当性確認
- (2) 開先が変動した場合の影響の把握

実機の製作においては多少の取付誤差は避けられないため一部の継手をルートギャップ：5~8mm、目違い：0~1.5mmの範囲で変動させた。

- (3) 溶接手順の影響の把握

溶接は2回に分けて中央から端に向かって順次溶接する場合と端から順次中央に向かって溶接する場合の2とおりについて試験した。

- (4) 水圧試験の実施

実機モデル小型試験体は1000φ×2000ℓの円筒で、溶接継手は全部で20継手あり溶接終了後、水圧試験ができるよう上下に鏡を付けてある(片側は取り外し可能)。

第1表は、溶接条件を示している。板厚が比較的薄いこと、フラックス入りワイヤの拡散性水素が低いこと(3cc/100g程度)から低温割れは出にくいと考え、1層目の溶接で予熱は特に行ってない。

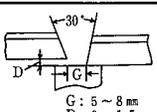
#### 3.1 超音波探傷試験結果

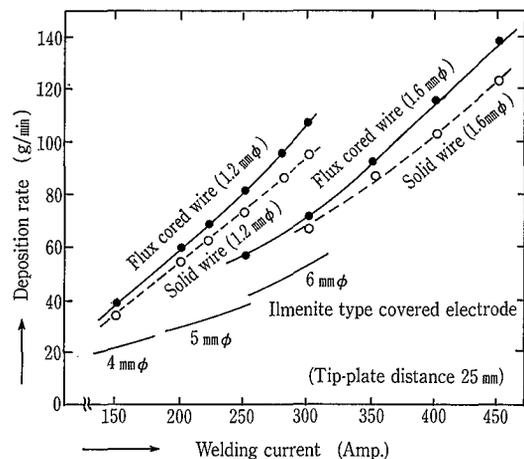
20継手すべての溶接を終了し48時間以上経過した後、すべての溶接線について目視および超音波探傷試験により、溶接割れなどの欠陥が出ていないか確認した。その結果、標準開先、取付誤差を考慮して故意に開先を変動させた継手など、いずれの継手にも欠陥は見られず施工の妥当性が確認できた。

#### 3.2 水圧試験

実際に使用されるリアクターは、高圧ガス取締法などの法規に該当するものが多く「水圧試験」が義務づけられている。実機モデル小型試験体についても上下鏡を取り付け(但し片側は取り外し可能)、水圧試験を実施した。水圧は約5kgf/cm<sup>2</sup>ごとに昇圧し、その都度水を抜き鏡を取り外して目視および超音波探傷試験にて、内部ジャケット板溶接部に割れなどの欠陥が発生していないかどうかを確認した。

第1表 実機モデルの溶接条件  
Table 1 Welding condition in mock-up test

Edge preparation	Preheat [°C]	Layer	Welding comusable	Ampere [A]	Voltage [V]	Speed [cm/min]
 G: 5~8 mm D: 0~1.5 mm	Room Temp.	1	DW100 [1.2φ]	240	30	20~30
	do.	2	DW309MoL [1.2φ]	220	35	25~30
	do.	3	DW316L [1.2φ]	220	35	25~35



第2図 フラックス入りワイヤの溶着速度  
Fig. 2 Deposition rate of flux cored wire

また水圧試験に当たっては、溶接部に歪ゲージを取り付け、水圧により溶接部に所定の応力がかかっていることを確認した。

試験は60m<sup>3</sup>クラスの実機を想定し、最大43kgf/cm<sup>2</sup>(実機長手方向の応力が設計圧力の約2.2倍相当)まで行ったが、溶接部の異常は認められず、今回行った施工方法、条件で問題のないことが確認された。

### 4. 実機施工について

#### 4.1 実機製作時の留意点

第2項で述べた実機モデル小型試験体による各種の確認試験結果から、溶接開先、条件など一定の条件下で施工を行えば溶接割れなど問題の出ないことが確認された。従って実機の製作に際してもできるだけ確認された範囲で施工することが重要であり、このため仕切板、内部ジャケット板など、部材の製作、取付にも注意を払った。

第2項で述べた内容も含め、実機製作時のポイント、留意点をあげると次のようになる。

- (1) 歪の出にくい狭開先施工
- (2) 高能率で自動化の容易なフラックスコアードアーク溶接の採用

ただし1層目の溶接については、実機モデル小型試験体での試験から、スラグの除去に時間を要し問題のあることがわかり、スラグの少ないタイプ(MX100)を使用することに変更した。

- (3) 仕切板、内部ジャケット板の切断、開先加工は取付精度向上のため機械加工、また取付時の取扱い易さを考慮し2~3分割

溶接の品質は取付精度に大きく影響される。通常的气体切断などでは板幅が狭いため長さ方向に「そり」が発生し、取付精度が悪くなる恐れがある。このため

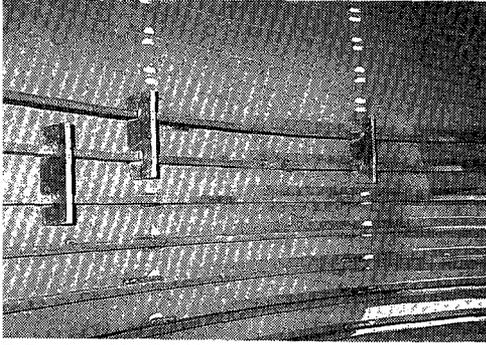
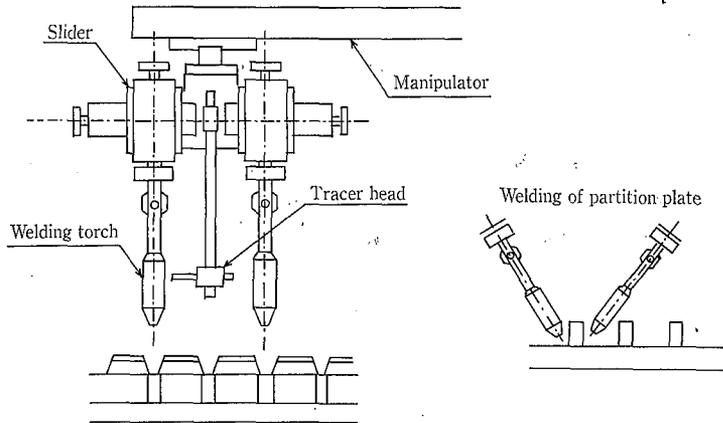


写真 1 仕切板取付用治具

Photo. 1 Jig for fitting up partition plate



第 3 図 2 電極溶接装置

Fig. 3 Twin electrode welding equipment

内部ジャケット部分の部材は機械加工とした。また部材が大きいと（60 m<sup>3</sup> クラスのリアクターで仕切板：45 kg/1周，内部ジャケット板：65 kg/1周となる）取扱いにくく結果として取付精度が悪くなる恐れがあるため，2～3分割とした。

また仕切板の取付けに際しては写真 1 に示すような取付治具を作成し，精度の向上を図った。

以上のような考慮を払った結果，仕切板の取付ピッチ，割れおよび内部ジャケット板の開先ギャップ，目違などの取付精度を精度良く所定の範囲に納めることができた。

## 2 内部ジャケット部溶接の自動化

実機の製作にあたっては，工程短縮，品質確保のため内部ジャケット部溶接（仕切板隅肉溶接，内部ジャケット板突き合せ溶接）の自動化を図った。

第 3 図は「倣い付き 2 電極自動溶接装置」の概略である。主な特長を次に示す。

- (1) トーチプラットフォームの部分を回転可能とすることにより，仕切板部，内部ジャケット板部いずれの溶接にも使用できる。
- (2) 2 電極方式のため効率が良い。また仕切板の溶接は両側同時溶接となるので，倒れが出にくい（1 電極にて片側ずつ溶接する場合には凝固収縮によって倒れが発生し，もう片側を溶接しても元に戻らない）。

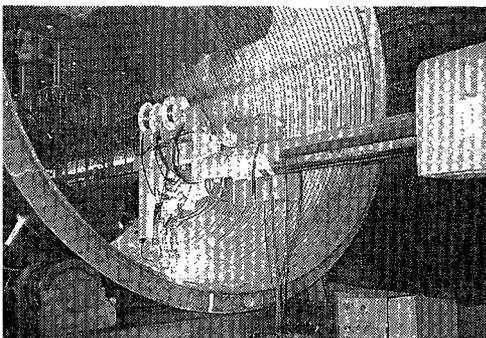
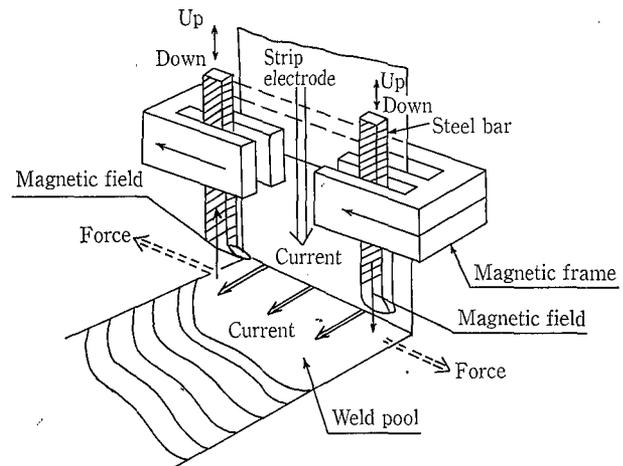


写真 2 2 電極溶接装置による内部ジャケット板の溶接

Photo. 2 Welding of inner jacket plate by twin-electrode welding equipment



第 4 図 磁気制御方式の原理

Fig. 4 Principle of magnetic control method

- (3) 開先倣いを付けているので，倣いのため常時監視している必要がなく監視作業が軽減される。

実機内部ジャケット板突き合せ溶接の溶接条件例を第 2 表に，2 電極自動溶接装置による内部ジャケット板の溶接状況を写真 2 に示す。

## 4. 3 肉盛溶接の自動化

内部ジャケット部の両端約 100 mm は肉盛溶接が必要となる。肉盛幅は狭いが，60 m<sup>3</sup> クラスの実機では半径が 4 m 近くになるため，その肉盛量も相当な量となる。工数削減，品質確保の面から肉盛溶接方法について検討し，磁気制御方式による「バンドアーク溶接法」を採用することとした。

第 4 図磁気制御方式によるバンドアーク溶接法の原理図

第 2 表 実機溶接条件

Table 2 Welding condition in actual reactor

Layer	Welding consumable	Ampere [A]	Voltage [V]	Speed [cm/min]	Built up
1	MX100 [1.4φ]	240~280	32~35	20~30	
2	DW309MoL [1.2φ]	200~230	32~35	25~30	
3	DW316L [1.2φ]	200~250	32~35	25~35	

第 3 表 各種溶接棒の比較

Table 3 Comparison of various welding processes

Welding process	FCAW	GTAW [auto]	BAW
Wire size [mm]	1.2φ	1.2φ	0.4t×50w
Ampere [A]	200~240	200~240	750~800
Deposition rate [g/min]	60~75	15~20	≒200
Layer	2~3	3	1
Quality of welding bead	Good	Good	Excellent

Note FCAW : Flux cored arc welding  
 GTAW : Gas tungsten arc welding  
 BAW : Band arc welding

第 4 表 バンドアーク溶接条件

Table 4 Welding condition of band arc welding

Base metal	Welding consumables	Ampere [A]	Voltage [V]	Speed [cm/min]
S S 41	PFB7/USB316EL	800	25	12

を示す。その特長は、溶接電流を利用して溶融プールに強制磁場を与えることにより、溶融プールを外側に押し広げ、溶接上端部のアンダーカットを防止するとともに、肉盛部を平滑にするところにある。その他バンドアーク溶接法は次のような特長を有している。

- (1) 溶接電極として帯状電極を使用するので、一度で幅の広い肉盛をすることができる(50 mm 幅の電極では45~50 mm 幅のビードを置くことができる)。
- (2) 使用電流が大きいため、溶着量が大きく、効率が良い。
- (3) 帯状電極を使用しているため溶込み深さが小さく、従って母材の希釈が小さい(約10%)なので、1層で仕上げる事が可能である。
- (4) サブマージアーク溶接同様、溶融プールの表面を溶融スラグが覆うので、風などの影響を受けにくく溶接部の品質が良好である。

第 3 表に各種溶接法により肉盛溶接した場合の比較(一例)を示す。

バンドアーク溶接による溶着量は約200 g/分で、フラックス入りアーク溶接の約3倍、ガスタングステンアーク溶接の約8倍以上となっており、しかも1層で仕上げ可能なので、非常に効率的な方法であることがわかる。

試験板(50 t×300 w×500 ℓ)にて各種の確認試験を行った際の溶接条件を第 4 表に、分析、側曲げ試験の結果を第 5 表に、断面マクロの一例を写真 3 に示す。

第 5 表 バンドアークテスト結果

Table 5 Test result of band arc welding

Radiographic examination	Side bend test [n = 2]	Chemical composition of weld metal [wt.%]			
		C	Ni	Cr	Mo
No defect	No defect	0.02	12.4	17.5	2.35

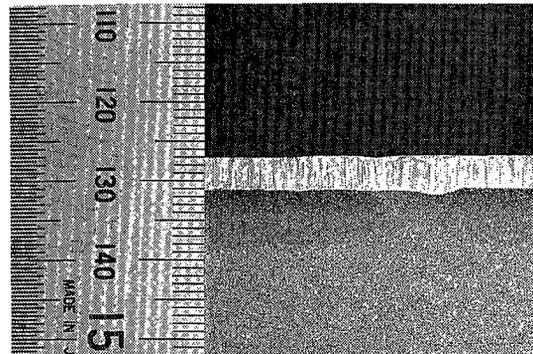


写真 3 バンドアーク肉盛溶接断面マクロ

Photo. 3 Overlaying macro-structure by band-arc welding

放射線透過試験は、ビードの重なり部についても実施したが、全く問題はなく、側曲げ試験も良好であった。また溶接金属の成分についても第 5 表に示すごとく1層盛でも十分 SUS316L の規格内に入っている。

以上紹介した「2電極自動溶接装置」「バンドアーク肉盛溶接」は1989年末から1990年5月にかけて合計5つの実機に適用されたが、製作上のトラブルは全くなく計画通りの作業を行うことができた。

### む す び

内部ジャケット付リアクターの、主に内部ジャケット部の溶接上の問題、および溶接の自動化について紹介した。内部ジャケット付リアクターは冒頭に述べたように従来のリアクターに比べて生産性が高く、今後ますます増えてくるものと予想される。

今回紹介した溶接以外にたとえば「ビードの研削」など、製作上の課題は他にも残っている。品質向上、納期短縮に向けて更に取り組んで行く予定である。

### 【参考文献】

- 1) 神鋼パンテック技報 Vol. 32 No. 3 (1988/12)
- 2) 溶接法研究委員会資料(第117回)
- 3) 神戸製鋼所溶接技報 No. 539

# 高粘度液用薄膜蒸発機「エクセバ」の蒸発性能

## The Evaporating Performance of The Thin Film Evaporator "EXEVA" for High Viscous Products



(化)技術部 設計第2課  
山崎 忠成  
Tadashige Yamasaki

"EXEVA", our newly developed thin film evaporator is much useful for highly viscous solutions which Wiped Film Evaporator (WFE) cannot process.

This paper describes some test results with various solutions offered by our customers.

The test results show that "EXEVA" is ideally suited for the evaporation of large quantities of solvents or monomers from low viscosity solutions and also for the evaporation of small quantities of solvents or monomers from highly viscous solutions.

"EXEVA" is going to be used in the polymer industries to improve product quality and productivity, and to save energy and capital costs.

### まえがき

当社のWFE薄膜蒸留装置(攪拌式薄膜蒸発機)は、蒸発面全体に均一な薄膜を形成し、薄膜表面を更新していることで、大きな伝熱係数がえられ高効率な蒸発を行うことができる。この装置は、滞留時間が数秒と短く、真空下で操作することができるので、熱影響を受け易い物質や沸点の高い物質の精製、濃縮、脱色、脱臭などの操作を必要とする食品、医薬品、石油化学工業分野に広く用いられている。しかし、この装置は、最終処理液が自然流下できる低粘度のものにしか適用することができない。

近年、高分子化学工業界では、ポリマーの高品質化、高機能化、高性能化に対応してポリマー製造プロセスのポリマー溶液の濃縮、脱モノマーや脱揮工程で高粘度液の効率の高い蒸発装置が要望されている。このようなユーザーニーズに応じて、WFEで処理することのできない高粘度液からの脱モノマー、脱揮が可能な高粘度液用薄膜蒸発機「エクセバ」を開発し、その機構、特長および各特性については、既に、本誌(1989年 Vol. 33, No. 2)で詳述している。

「エクセバ」は、1989年11月東京で開催された化学プラントショーで発表以来好評を博し、種々の実液実験でその性能をいかんなく発揮しており、本稿では、その蒸発実験の中から一部を報告する。

なお、本機の基本構造は、日本・米国・欧州で特許出願中である。

### エクセバ実験装置の仕様

写真1にテスト装置を示す。

本実験を実施するにあたって使用した実験装置の仕様を次に示す。

#### (1) エクセバ

- 材質 : SUS316
- 本体径 : 155 mm
- 攪拌機動力 : 7.5 kW
- 排出機動力 : 0.75 kW
- 伝熱面積 : 0.2 m<sup>2</sup>
- 回転数 : 50~1750 rpm
- 〃 : 1~160 rpm

#### (2) 原料槽

- 材質 : SUS316
- 容量 : 30 l

#### (3) コンデンサ

- 材質 : SUS316
- 伝熱面積 : 0.3 m<sup>2</sup>

#### (4) 受器

- 材質 : SUS316
- 容量 : 10 l

#### (5) 加熱熱媒

- 0.4 MPa (4 kgf/cm<sup>2</sup>) スチームおよび最高 300 °C 熱媒

#### (6) 系内圧力

- 0.5 Torr~大気圧

次に述べる各実験で各々の実験装置フローを示しているが、それらの機器仕様は本章による。

## 2. 実液実験

### 2.1 樹脂の蒸発実験

#### 2.1.1 実験目的

溶媒 62% (ポリマーA) と 68% (ポリマーB) 含んだ 2種類のポリマー溶液を蒸発して、含有溶媒量を 1%以下にする。

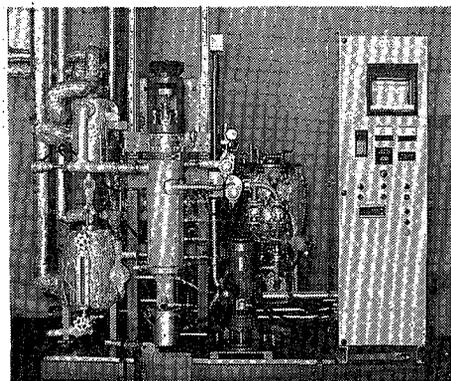
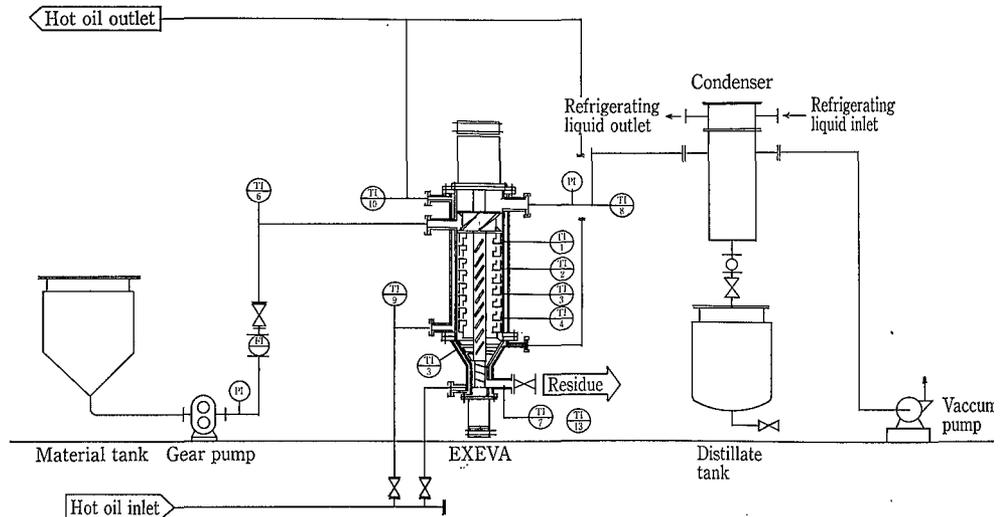
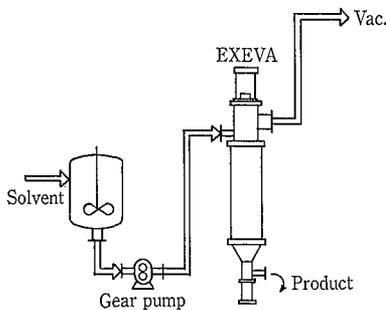


写真1 テスト装置  
Photo. 1 Experimental equipment



第1図 実験フローシート  
Fig. 1 Flow sheet of test



第2図 ポリマー濃縮のフローシート  
Fig. 2 Flow sheet for polycondensation

第1表 EXEVA テストデータ  
Table 1 Performance and operating data of EXEVA

No.	Feed				Discharge				Operating	
	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Polymer %	Solvent %	Viscosity P	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Polymer %	Solvent %	Viscosity P	Pressure Torr	Temperature °C
1	175	38	62	2.5	67.2	99.0	1.0	440	264	220
2	220	↓	↓	↓	86.8	96.3	3.7	4 500	244	↓
3	220	↓	↓	↓	88.1	94.9	5.1	6 700	240	↓
4	95	32	68	2.5	30.6	99.2	0.8	1 300	265	↓
5	140	↓	↓	↓	45.4	98.7	1.3	3 000	265	↓
6	175	↓	↓	↓	60.3	92.9	7.1	2 300	760	↓

## 2. 1. 2 実験装置および実験方法

第1図に実験装置フローを示す。

実験方法は、ポリマー溶液を原料槽に投入してギヤポンプでエクセバに供給した。エクセバのジャケットに熱媒を流し、本体伝熱面を加熱して、本体内壁面に形成された薄膜の溶液中から溶媒を蒸発して、スクリュー排出機から出てくる残留液を採取した。このサンプルを乾燥器内で110°Cに20時間保持して、残留溶媒を蒸発させて減量より残留溶媒量を求めた。

## 2. 1. 3 実験結果

ポリマーAの実験結果を第1表のNo. 1, 2, 3にポリマーBの実験結果をNo. 4, 5, 6に示す。ポリマーAでは処理量175 kg/m<sup>2</sup>hで、ポリマーBでは95 kg/m<sup>2</sup>hで目的を達成することができた。No. 2, 3は処理量、操作条件共おなじであるが、攪拌翼回転数が各々異なり、回転数が速い程良い結果となった。

No. 1の残留液の粘度が、他に比べて低いのは、残留液の温度が高くなっているためである。これは、濃縮がすすむにつれて粘度が高くなりその結果攪拌動力が増え、攪拌エネルギーによって残留液温が上がったためである。

本実験結果は、エクセバが1台でポリマー中に溶媒量が60%以上も含まれた低粘度液(粘度2.5 P)を蒸発して、残留溶媒量を1%以下にできることを示している。

エクセバを適用した本ポリマーの蒸発プロセスを第2図に示す。

本プロセスは、予備濃縮と本濃縮を行う2段濃縮法に比較して、非常にシンプルであり、運転操作も簡単である。

## 2. 2 スチレン系樹脂の蒸発実験

### 2. 2. 1 実験目的

高分子量グレードのステレン系ポリマー溶液を蒸発して、残留揮発分が5%以下での処理量を求める。

### 2. 2. 2 実験装置および実験方法

第3図に実験装置フローを示す。

実験方法は、次の手順にて行った。

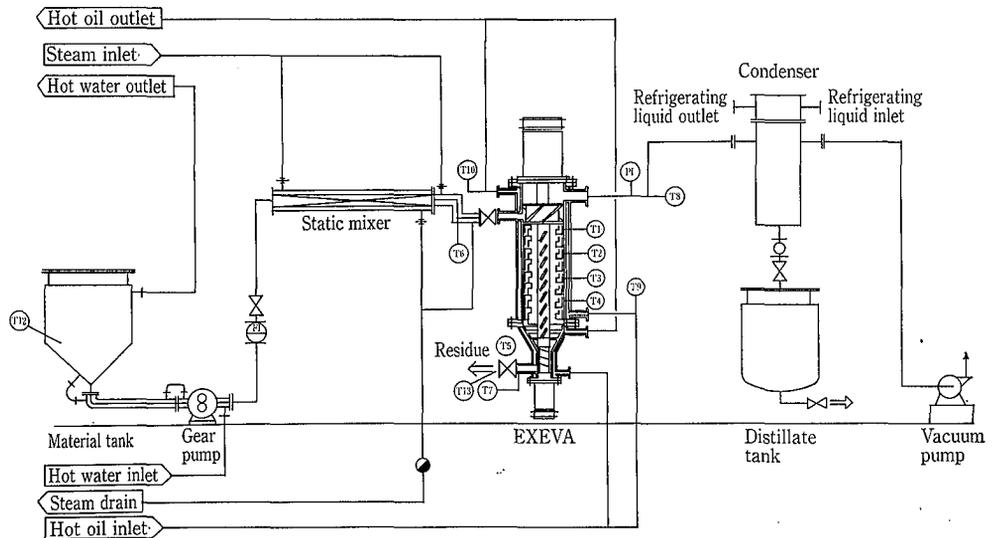
- (1) 原料槽のジャケットに温水を流し、80°Cに加熱した後、その中にポリマー溶液を投入した。
- (2) 原料槽からギヤポンプで送液し、途中スタテックミキサー(ジャケットをスチーム加熱)にてポリマー溶液をさらに加熱して、エクセバに供給した。
- (3) エクセバで蒸発後の残留液からサンプルを採取して、これをガスクロマトグラフィによって分析して含有揮発分を求めた。

### 2. 2. 3 実験結果

第2表に実験結果を示す。

本実験結果からエクセバは、標準グレードより粘度が高い、高分子量グレードのステレン系ポリマー溶液を濃縮して、残留液が3 200 Pa·s (32 000 P)の高粘度液を処理できることを示している。

また、本ポリマーを供給液量で400 kg/m<sup>2</sup>hも処理することができ、処理能力としても申し分のない結果が得られた。



3 図 実験フローシート  
Fig. 3 Flow sheet of test

### 3 スチレン系樹脂の蒸発実験

#### 3.1 実験目的

市販のスチレン系樹脂製品で標準グレードと高分子量グレードの2種類が蒸発して、エクセバで最終揮発分をここまで低減できるかを調べる。

#### 3.2 実験装置および実験方法

第4図に実験装置フローを示す。

実験方法は、スチレン系樹脂ペレットを一軸押出機で溶解昇温して、エクセバに供給し、蒸発後、残留液からサンプルを採取した。これをガスクロマトグラフィによって分

析して残留揮発分を求めた。

#### 2.3.3 実験結果

第3表のNo.1, 2は標準グレード, No.3, 4は高分子量グレードのスチレン系樹脂の実験結果を示す。

第3表で残留液粘度が供給液粘度より低くなっているのは、攪拌翼によるせん断エネルギーによって残留液温が上昇したためである。このように供給液粘度が高いと攪拌エネルギーが多く与えられ、この攪拌エネルギーが蒸発表面に作用するので、超高粘度液にお

第2表 EXEVA テストデータ

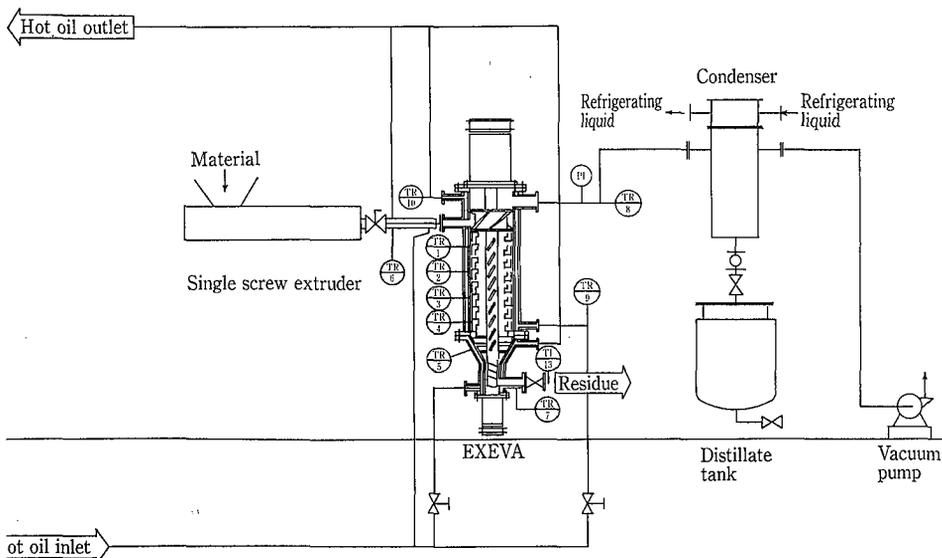
Table 2 Performance and operating data of EXEVA for polystyrene-acrylonitrile

No.	Feed				Discharge				Operating	
	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Polymer %	Solvent %	Viscosity P	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Polymer %	Solvent %	Viscosity P	Pressure Torr	Temperature °C
1	150	49	51	500	76	96.8	3.2	32 000	507	260
2	250	↓	↓	↓	128	95.8	4.2	26 000	502	↓
3	400	↓	↓	↓	206	95.2	4.8	30 000	503	↓

3 表 EXEVA テストデータ

Table 3 Performance and operating data of EXEVA for polystyrene-acrylonitrile

No.	Feed				Discharge				Operating	
	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Polymer %	Solvent %	Viscosity P	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Polymer %	Solvent %	Viscosity P	Pressure Torr	Temperature °C
1	110	99.75	0.25	25 000	110	99.9	0.010	10 000	5	235
2	130	99.78	0.22	60 000	130	99.9	0.015	6 200	30	196
3	135	99.83	0.17	65 000	135	99.9	0.015	20 000	5	236
4	135	↓	0.17	65 000	135	99.9	0.035	10 300	30	236



第4図 実験フローシート  
Fig. 4 Flow sheet of test

第4表 EXEVA テストデータ  
Table 4 Performance and operating data of EXEVA

No.	Feed				Discharge				Operating	
	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Polymer %	Solvent %	Viscosity P	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Polymer %	Solvent %	Viscosity P	Pressure Torr	Temperature °C
1	100	60	40	2 200	60	99.8	0.2	2 000	21	120
2	130	↓	↓	↓	78	99.5	0.5	2 000	↓	↓
3	145	↓	↓	↓	87	99.9	0.1	1 200	↓	130
4	175	↓	↓	↓	106	99.1	0.9	3 800	↓	↓
5	95	60	40	300	57	99.5	0.5	2 800	6	92
6	125	↓	↓	↓	76	99.2	0.8	3 100	↓	↓

いても優れた脱揮性能を有することになる。薄膜温度は、ジャケットの熱媒温度より高くなっているため、ジャケットからの伝熱エネルギーはないと考えられる。

本実験結果は、エクセバに 6 500 Pa·s (65 000 P) もの高粘度液を供給して、高効率な脱揮、すなわち市販のスチレン系樹脂製品を蒸発して、標準グレードでは揮発分を 1/15~1/25 に、高分子量グレードでは揮発分を 1/5~1/11 にできることを示している。

エクセバは、溶媒を多量に含んだ低粘度液から溶媒を蒸発して高粘度液になる物質を処理できるばかりでなく、このように、溶媒の非常に少ない高粘度液からさらに溶媒を蒸発させて高品質な製品を得ることができる。

現在、スチレン系樹脂で揮発分を数%から 0.3% 以下にする連続蒸発プロセスに、2軸押出機が適用されている場合がある。2軸押出機は、ポリマー溶液に水を添加して蒸発しなければ残留揮発分を 0.3% 以下にすることが難しい。水の添加は、蒸発界面を増し、水との共沸を利用している。

蒸発性能は、処理量とも関連があり、2軸押出機の詳しいデータがないので、正確な比較はできないが、エクセバは水の添加なしで現状よりはるかに少ない残留揮発分にする事ができたことから、2軸押出機より蒸発性能は優れているといえる。

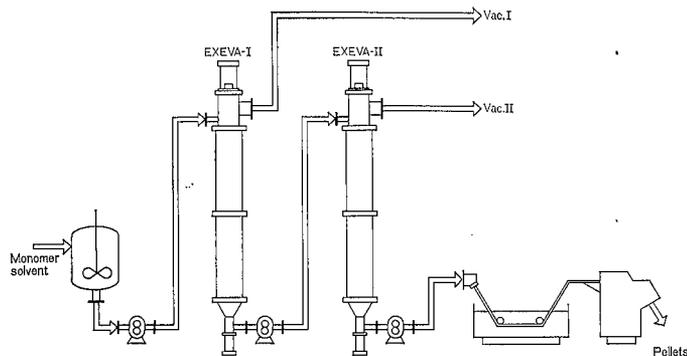
本実験結果は、エクセバが通常 2軸押出機が適用されている超高粘度液からの最終蒸発プロセスに適用できることを示している。エクセバは、蒸発性能面ばかりでなく装置価格面からも十分 2軸押出機に対抗できる機種である。ポリマー製造プロセスにおける最終蒸発プロセスに、2軸押出機が数多く用いられていることから、エクセバの適用プロセスは多いと考えている。

2.2 と 2.3 の実験結果より、エクセバを用いたスチレン系樹脂の蒸発プロセスを第 5 図に示す。

本プロセスは、重合後のポリマー溶液をエクセバ 1 段目で残留揮発分を数%程度まで蒸発して、2 段目で残留揮発分を 0.3% 以下まで蒸発する。そしてギヤポンプで昇圧してストランド後、ペレットにして製品となる。ギヤポンプによる昇圧は、押出機による昇圧に比べて、省エネルギーで経済的である。このように、蒸発性能の優れたエクセバと昇圧能力の優れたギヤポンプの組合せは、従来の 2 軸押出機に比べて、インシヤルコスト、ランニングコストが低く、高品質な製品が得られるなど多くの利点をもったプロセスであるといえる。

本プロセスは、スチレン系樹脂製造プロセスの蒸発のみでなく他のポリマーにも適用可能であると考えている。

2.1, 2.2 と 2.3 の実験結果から、エクセバの蒸発プロセスは原料中の含有揮発分、処理量、操作条件、製品中の残



第5図 高粘度ポリマー濃縮・脱揮工程フローシート  
Fig. 5 Flow sheet of polycondensation for high viscous products

留揮発分などを考慮して、エクセバ 1 段処理または 2 段処理が選択されることになる。

## 2.4 樹脂の蒸発実験

### 2.4.1 実験目的

ポリマー溶液 (ポリマー A, B の 2 種類) 中に含まれる溶媒 40% を蒸発して、含有溶媒量を 1% 以下にする。

### 2.4.2 実験装置及び実験方法

実験装置フローおよび実験方法は、2.1.2 (第 1 図) と同様であるが、サンプルは、ガスクロマトグラフィによって分析して残留揮発分を求めた。

### 2.4.3 実験結果

第 4 表で No. 1~4 はポリマー A, No. 5, 6 は、ポリマー B の実験結果を示す。

0.2 m<sup>2</sup> エクセバテスト機ではポリマー A, B 共に、溶媒 1% 以下に脱揮して残留液でそれぞれ 20 kg/h, 15 kg/h 処理することができた。

2 軸押出機 (φ35 mm, 脱揮ゾーン 3 カ所付) でのポリマー A の蒸発テスト結果は、残留液で 2.5 kg/h しか処理できなかったとのことである。2 軸押出機のテスト条件の設定などで処理量アップの検討の余地があると考えても、エクセバに比べて非常に少ない処理量である。

このように、エクセバの蒸発性能は粘度および粘着性の高い樹脂でも、2 軸押出機より格段に優れている。

## 2.5 樹脂の蒸発実験

### 2.5.1 実験目的

ポリマー中に含まれるモノマー 0.3% および高沸点不純物 0.6% を脱揮してモノマーを 0.2% 以下 (目標 0.1%) 高沸点不純物を 0.1% 以下 (目標 0.05% 以下) にする。

### 2.5.2 実験装置および実験方法

本実験装置 および 実験方法は、2.3.2 (第 4 図) と同様である。

第 5 表 EXEVA テストデータ  
Table 5 Performance and operating data of EXEVA

No.	Feed					Discharge					Operating	
	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Polymer %	Monomer %	Dimer %	Viscosity P	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Polymer %	Monomer %	Dimer %	Viscosity P	Pressure Torr	Temperature °C
1	75	99	0.3	0.6	35 000	75	99	0.07	<0.01	8 000	10	235
2	150	↓	↓	↓	↓	150	99	0.07	0.03	6 000	30	233
3	150	↓	↓	↓	62 000	150	99	0.08	0.04	5 200	30	215

第 6 表 EXEVA テストデータ  
Table 6 Performance and operating data of EXEVA for silicon-rubber

No.	Feed				Discharge				Operating	
	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Polymer %	Monomer %	Viscosity P	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Polymer %	Monomer %	Viscosity P	Pressure Torr	Temperature °C
1	60	86.2	13.8	2 000	52	99.61	0.39	3 000	0.5	190
2	55	↓	↓	↓	47	99.75	0.255	↓	↓	220
3	51	97.3	2.70	3 000	50	99.57	0.43	↓	↓	190
4	44	↓	↓	↓	43	99.56	0.44	↓	↓	↓

第 7 表 EXEVA テストデータ  
Table 7 Performance and operating data of EXEVA for surfactant

No.	Feed					Discharge					Operating	
	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Sulfonic acid %	Water %	Methanol %	Viscosity P	Rate kg/m <sup>2</sup> h	Sulfonic acid %	Water %	Methanol ppm	Viscosity P	Pressure Torr	Temperature °C
1	240	49	45	4	50	121	97	3	37	170	760	198
2	150	↓	↓	↓	↓	76	97	3	0	150	↓	↓
3	250	↓	↓	↓	↓	128	96	4	79	250	↓	196
4	159	↓	↓	↓	↓	81	96	4	59	180	↓	↓

### 2. 5. 3 実験結果

第 5 表に実験結果を示す。

第 5 表からエクセバは、残留モノマーおよび残留ダイマー共に目標値を達成している。No. 1, 2, 3 で残留モノマー分にほとんど違いがでていない理由は、本ポリマーが高温状態では、ポリマーが分解してモノマーを発生するためである。それゆえ、本ポリマーの脱揮性能は、残留ダイマーの含有量で評価することができる。

エクセバは、現ポリマー製品を脱揮して、残留ダイマーを 1/15~1/60 にすることができた。

### 2. 6 シリコン樹脂の蒸発実験

#### 2. 6. 1 実験目的

含有低沸物 13.8% のシリコン樹脂 (A) を蒸発して 1% 以下にする。また、含有低沸物 2.7% のシリコン樹脂 (B) を蒸発して、低沸物濃度がどこまで下がるかを調べる。

#### 2. 6. 2 実験装置および実験方法

実験装置フローは、2.3.2 (第 4 図) と同様である。

実験方法は、シリコン樹脂 A, B 共に原料をナイフで約 4 cm 角に切断して、押出機に押し込んで溶融し、200 °C で昇温してエクセバに供給した。エクセバで蒸発後、残留液からサンプルを採取して、それを乾燥器内で 170 °C に 12 時間保持して、減量より残留低沸物を求めた。

#### 2. 6. 3 実験結果

シリコン樹脂 (A) の実験結果を第 6 表の No. 1, 2 に、シリコン樹脂 (B) の実験結果を No. 3, 4 に示す。

第 6 表の No. 1, 2 の含有低沸物 13.8% のものも、No. 3, 4 の含有低沸物 2.7% のものも、エクセバで処理後は、残留低沸物が共に約 0.4% にであることから、エクセバの処理量にはまだ余裕があることがわかる。これは、実験方法で述べたように押出機へのシリコン樹脂切片の供給が手動のため、エクセバへの供給量が制限され処理量が少ない結果となったためである。

No. 3 と No. 4 は、攪拌翼回転数がそれぞれ異なるが、残留低沸物は同等であった。

操作温度の高い No. 2 が残留低沸物が最も少ない。又、同じ操作条件で 2 パス、3 パス処理しても残留低沸物濃度は

ほとんど変わらなかったことから、高粘度シリコン樹脂の残留低沸物濃度は、気液平衡より操作真空度と残留液温度で決定される。

2 軸押出機でシリコン樹脂 (B) の脱揮テストを実施したが、脱揮部分で樹脂が発泡して、真空度を上げることができず、残留低沸物濃度は 2% より良くならなかったとのことである。

### 2. 7 界面活性剤の蒸発実験

#### 2. 7. 1 実験目的

界面活性剤中に含まれるメタノール 4% を蒸発して、残留液中のメタノール含有量を 200 ppm 以下にする。

#### 2. 7. 2 実験装置および実験方法

実験装置および実験方法は 2.1.2 (第 1 図) と同様であるが、サンプルはガスクロマトグラフィによって分析して含有メタノール量を求めた。

#### 2. 7. 3 実験結果

第 7 表に実験結果を示す。

第 7 表の No. 1, 2 と No. 3, 4 は、回転数が異なり、回転数が速いほど脱揮性能は良好である。残留液は、マヨネーズのように粘度が低くて流動性が全くなかったが、エクセバからはスムーズに排出することができた。残留液中のメタノール含有量は、目的を達成することができた。

本物質は、非常に発泡性があるが、攪拌翼の高速回転により、飛沫および付着はみられなかった。

### む す び

高粘度液用薄膜蒸発機「エクセバ」について、客先支給の各種溶液での蒸発実験結果を一部紹介したが、これからでも、従来機に比べて「エクセバ」の蒸発性能がいかに優れているかを確認いただけたと思う。

今後、ポリマーの高品質化にともなって、モノマーおよび溶剤の許容値はますます厳しくなってくるであろうし、設備の簡略化、連続化、省エネルギー化が強く求められてくる。「エクセバ」は、多くの利点を備えており、これらの要求に十分対応できると考えており、これからも、高粘度液の蒸発に携わっておられるユーザ各位の要望に応じていきたい。

# イオンスクラバー実装置紹介

## Full Size Ion Scrubber



(気)生産部 技術第一課  
川 除 禎 平  
Sadahira Kawayoko

The paper presents the ion scrubber recently manufactured and delivered by Shinko Pantec. The unit demonstrates a dual function of efficient removal of fine particles less than  $0.05 \mu\text{m}$  as well as hazardous gases and deodorization, which have never been attained by a single conventional wet dust collector. Described here is an analysis of the performance of the ion scrubber ranging from pre-order test using a pilot test unit up to selection of a full size unit. The full size unit has succeeded in obtaining outlet dust concentration close to the design level despite the concentration of inlet dust in exhaust gases substantially exceeding the design level.

### まえがき

従来ダストと有害ガスを同時に除去する方法としては、電気集塵機と洗浄塔またはベンチュリースクラバーと洗浄塔などによる2段方式が主であった。当社において、電気集塵機と洗浄塔の特性を兼ね備えた排ガス処理装置「イオンスクラバー」の販売を開始し、以来約2年が経過した。この間、主として産業廃棄物焼却炉、光関連設備用炉および金属溶解炉などからの排ガスを対象とし、各方面へパイロットプラントをもちこみ各種のデータを収集してきた。この装置は'90年10月現在製作中も含めると9機を数えている。

本稿では、イオンスクラバーの概要ならびに銅スラップ溶解炉排ガスのパイロットプラントによるテストおよび実装置を紹介する。

### 1. イオンスクラバーの概要

イオンスクラバーは、 $0.05 \mu\text{m}$ 以下の固体または液体微粒子をも高効率かつ、少ないエネルギー消費量で除去する目的で開発したものであるが、粒径 $1 \mu\text{m}$ 以上の粗粒子、有害ガスおよび悪臭ガスも同時に処理することができる。

装置内で有害ガスおよび悪臭ガスは高性能充填部を流れる循環液に吸収される。粗い粒子および液滴は慣性衝突により捕集され、煙霧質状のものはイメージ作用力により除去される。このイメージ作用力は、荷電された粒子が中性

表面に接近(約 $1 \text{mm}$ )すると発生し、反対極性の静電気を誘引し、粒子はその表面に引き寄せられるという原理である。

通常燃焼炉排ガスを処理する場合、イオンスクラバーは急冷塔と組合わせて採用する。

また、イオンスクラバーは装置内部に洗浄装置を備えており、タイマー制御により定期的に洗浄を行う構造となっているため装置内でのダスト、塩の堆積が最小限におさえられメンテナンス周期も長く採ることができる。

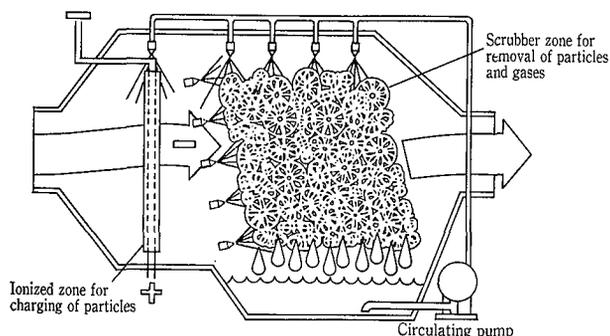
#### 1.1 装置の構造

装置は大きく2つのブロックに分かれており前部の高電圧イオン化部と後部のスクラバー部より構成されている。

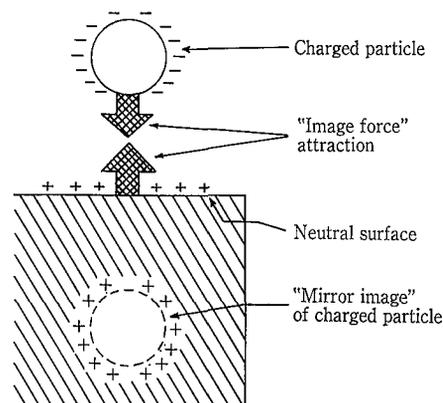
##### (第1図)

排ガス中の粒子はまず高電圧イオン化部で静電的に荷電され、一部はプレートに、残りはスクラバー部でイメージ作用力(第2図)により高性能充填材に捕集される。放電電極は負でプレートは接地極となっている。プレートは濡れカベとなっており固体粒子やスケールが堆積しないよう常に循環洗浄しているため安定した粒子のイオン化が期待できる。

イオンスクラバーは高い電気抵抗値を持つ固体粒子であっても荷電可能である。



第1図 イオンスクラバー構造図  
Fig. 1 Construction of Ion Scrubber



第2図 イメージ作用力  
Fig. 2 Image force

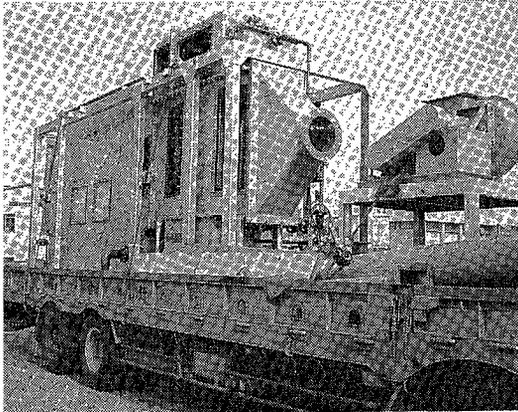
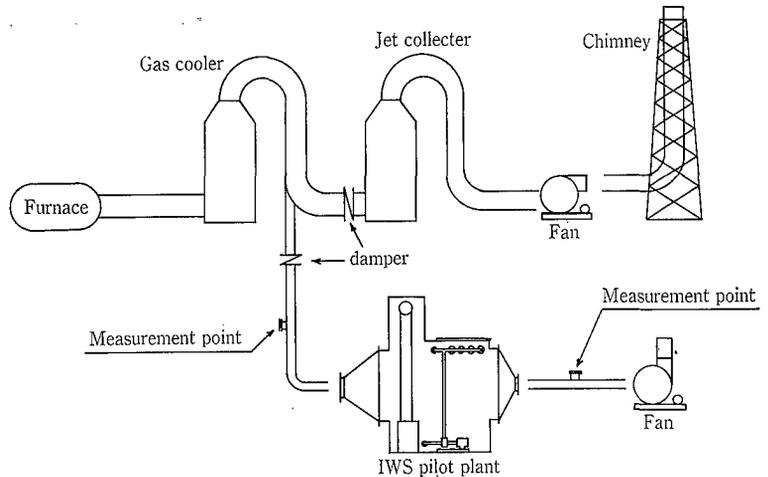


写真 1 イオンスクラバーパイロット機  
Photo. 1 Ion scrubber pilot plant



第 3 図 テストフロー  
Fig. 3 Test flow

## 1. 2 スクラバー部

イオン化部後部のスクラバー部は固体および液粒子を効率よく捕集するため表面積の大きい充填材で構成されている。排ガスは充填部を水平に横切り循環液は充填部を上方から下方へ流れている。この間に固体は慣性衝突、イメージ作用力により捕集され、それと同時に有害ガスも洗浄液に吸収される。充填材上部には低圧オリフィス形散水ノズルが設置されている。散水ノズルから噴霧される液滴径は小さいので充填部のガス吸収効果をさらに高められる。

## 1. 3 耐蝕性

イオンスクラバー本体は大部分がFRP樹脂製品およびFRPライニング材で構成されており、一般的なFRPの耐熱温度90°Cまでは前処理(急冷塔)なしで排ガスを通すことが可能である。しかし低湿度のガスに対してはイオンスクラバー前部に加湿し、飽和状態に近づけてやるほうが実装置も小さくなり、また集塵およびガス吸収効果も高まる点で望ましい。排ガスと直接接触する金属部分はSUS316, SUS316L, チタンおよび Hastelloy C など耐蝕性金属の中から最適な材質を選定している。

## 1. 4 圧力損失

本装置の圧力損失は、空塔速度にもよるが平均30 mmAqであり急冷塔を設置しても系内で50 mmAq程度である。それゆえベンチュリースクラバーと比較すると運転費がはるかに安価であり、建設費の差は1~2年で相殺されることが計算より得られている。

## 2. 銅スクラップ溶解炉のパイロットテスト

### 2. 1 テスト

パイロット機は30~60 m<sup>3</sup>/min 処理の能力を持っており各主要部材および仕様は次のとおりである。

本体 : FRP 6460 mmL × 620 mmW × 2380 mmH

イオナイザー

プレート : SUS316

放電線 : Hastelloy C

充填材 : P.P

内部配管 : FRP

外部配管 : C-PVC

循環ポンプ : PVDF 500 l/min × 15 m × 3.7 kW

バリエア

ヒーター : 3kW

吸引ファン : FRP 70 m<sup>3</sup>/min × 250 mmAq × 5.5 kW

パイロット機本体、操作盤およびポンプなどは写真1に示すようにユニット式となっておりトラックでの輸送が容易な構造となっている。

銅スクラップ溶解炉より発生する排ガス中のダストおよび、HCl ガス除去を目的とするイオンスクラバーのサイズを決定するためにテストを実施した。テストは、第3図に示すように既設ダクトよりバイパスダクトを設けテスト機へ接続して実施した。実装置の場合もバイパスダクトおよびイオンスクラバーを経由し、既設の煙突ヘルートを戻している。また、今回の装置においては系外への排水も制限されているため、極力循環使用することを前提にブロー水に凝集剤を添加した場合の沈降速度および排水SS濃度も合わせて測定を行った。

## 2. 2 テスト結果

実装置の設計条件

処理ガス量 : 15 000 m<sup>3</sup>N/h wet

処理ガス温度

および水分 : 50 °C 飽和

入口濃度

ダスト : 0.5 g/m<sup>3</sup>N dry

HCl : 50 ppm dry

出口濃度

ダスト : 0.03 g/m<sup>3</sup>N dry

HCl : 3 ppm dry 以下

排水量

: 2.4 m<sup>3</sup>/day

設計条件におけるダスト除去率は94%, HCl ガス除去率も94%である。この条件を満足する実装置を設計製作するためにテストを実施した。テストにおいては炉での溶解材料を良材と焼線材とに分けて試験を行った。

テスト機へのガス流入量は、バイパス取り合い点において13, 15, 17 m<sup>3</sup>N/min wetとした。また、HCl ガス吸収を考慮し、スクラバー循環液はNaOH水溶液としpH計により濃度の自動調節を行った。

原ガスの性状を第1表に、イオンスクラバーでの集塵効率を第4図に、イオンスクラバー入口および出口での粒径

第 1 表 原ガスの性状

Table 1 Original gas character

Item to be measured	Reasonable material	Burned wire
Dust concentration [g/m <sup>3</sup> N dry]	0.03~0.04	0.26~0.42
Sulfur oxides [ppm]	<1	<1
Nitrogen oxides [ppm]	8~14	6~9
HCl [mg/m <sup>3</sup> N]	1~3	12~168
Cl <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> N]	<0.1	<0.1~0.3
Smell concentration/index [—/—]	—/—	410/26.2
Gas quantity [m <sup>3</sup> N/h]	14 800, 16 800	13 900, 15 100
Gas temperature [°C]	52, 49	95, 65

第 2 表 実装置ガス分析結果

Table 2 Results of gas analysis in full size Ion Scrubber

Item to be measured	Inlet of IWS	Outlet of IWS
Actual gas quantity [m <sup>3</sup> N/Hr wet]	13 500	13 200
Design gas quantity [m <sup>3</sup> N/Hr dry]	13 000	12 600
Design gas quantity [m <sup>3</sup> N/Hr wet]	15 000	15 000
Actual dust quantity [g/m <sup>3</sup> N dry]	2.26	0.04
Design dust quantity [g/m <sup>3</sup> N dry]	0.5	0.03
Actual HCl quantity [mg/m <sup>3</sup> N dry]	934	38
Design HCl quantity [ppm dry]	573.2	23.3
Design HCl quantity [ppm dry]	50	3
Actual Cu quantity [mg/m <sup>3</sup> N dry]	56.6	4.6

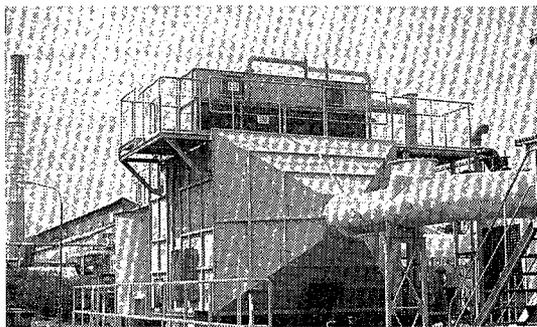


写真 2 イオンスクラバー実装置及び沈殿槽

Photo. 2 Full size Ion Scrubber and precipitation vessel

分布を第 5 図に示す。

### 2. 3 考察

焼線材は良材に比べ、ダスト濃度および HCl 濃度が高値を示しており原材料の影響が大きい。イオンスクラバーの効果は吸引ファン吐出口の煙の有無を一つの判定基準とした。

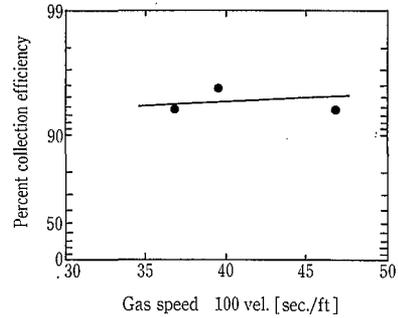
良材の場合、既設スクラバーでも県の基準を満足していたが煙は消去されていなかった。これにイオンスクラバーを使用すると、風量 930 m<sup>3</sup>N/h wet において煙は完全に消失しダスト濃度は 0.01 g/m<sup>3</sup>N dry 以下となった。

焼線材の場合は、風量 990 m<sup>3</sup>N/h wet においてわずかに煙が残った。この時のダスト濃度は 0.05 g/m<sup>3</sup>N dry であり除去率は 93.6% であった。高圧電源装置 ON の場合の煙と OFF の場合とを比較すると、煙は ON でわずかに目視できる程度であり、OFF の場合のようなたなびきはなかった。

イオンスクラバー入口および出口における粒径分布は、ほぼ同一であった。

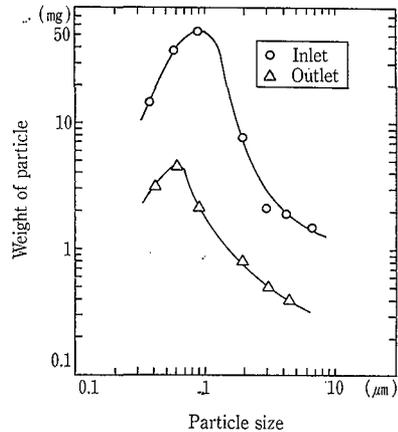
### 3. 実装置

パイロットテストの結果を基に実装置を納入したのでその外観を写真 2 に、フローシートを第 6 図に示す。実装置におけるガス分析は第 2 表に示すとおりであり、煙突から



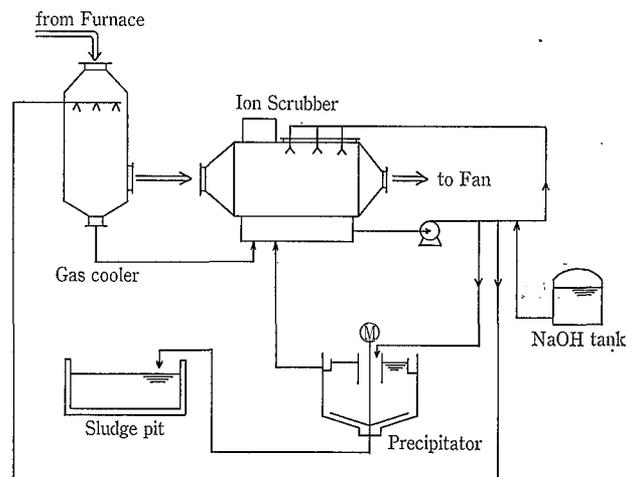
第 4 図 テストでの空塔速度と集塵効率の関係

Fig. 4 Relation between gas speed and collection efficiency in pilot test



第 5 図 粒径分布測定結果

Fig. 5 Particle size distribution



第 6 図 実装置のフローシート

Fig. 6 Flow sheet

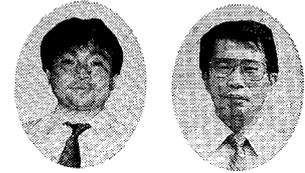
の排ガスは目視不可能か、わずかに可視される程度に下がった。

### むすび

以上のようにイオンスクラバーにおいては、ダストに対する集塵効率およびガスの除去効率、この両方を同時に満足するように装置サイズが決定される。しかしながら、ダストの集塵効率はガス吸収のデーターのように安定性がなく、ガス組成により大きく異なり、同一風量であっても入口ダスト濃度の低下に伴い集塵効率が低下していくなど、今後共パイロットテストの必要性がある。

# 新型球状充填材の開発

## Aptitude Tests of Newly Developed Spherical Media at Anaerobic Bio Reactor (AB reactor)



(環)生産部 設計第3課 二  
浦 上 研  
Kenji Urakami  
(環)技術室  
枡 田 耕 平  
Kohei Masuda

A new plastic spherical packing media (HEC BALL) was developed for the use in anaerobic treatment. The HEC BALL was compared with other conventional media in strength and sludge settleability to and separability from the media. The comparison tests demonstrated the availability of the HEC BALL for commercial use. The HEC BALL is superior in sludge separability when packed at random and there is no problem in strength and settleability.

### まえがき

固定床式嫌気性反応槽用新型充填材の開発にあたり構造、形状に関する基本概念は次の条件を満足することであった。

- (1) 充填物表面と流体が一樣に効率よく接触できる形状であること。
- (2) 個体沈殿物が溜るようなデッドスペースを形成しないこと。
- (3) 汚泥の成長に伴って、目詰まりを生じるような狭い隙間を作らない。
- (4) 充填物が充填槽内で互いにかみ合わないこと。
- (5) 機械的強度が十分であること。
- (6) 製作が一回の金型開枠のできる構造であること。

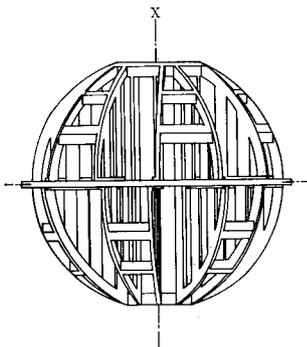
上記の事項を踏まえ、開発した充填材がヘックボール (High Efficiency Contact Ball の略で以下ヘックボールと呼ぶ。) であり、第1図に外形図を示した。

一方ヘックボールを実装置で使用した場合、性能的に要求される構造強度、汚泥付着状態および汚泥剥離状態を確認するため試験を行った。ほかの2種充填材についても比較のために同一の試験を行った。次にその結果を報告する。

### 1. 強度試験

#### 1.1 強度試験の目的と方法

ヘックボールが実装置の使用に耐え得るかどうかを、単体による強度試験と数個の充填材をランダム充填した場合の強度試験を行った。また評価対象として、現在使用している2種類の充填材 (V充填材, M充填材) について同様の強度試験を行った。



第1図  
ヘックボール外形図  
Fig. 1  
Configuration of HEC Ball

#### 1.1.1 充填材単体の強度試験

ヘックボールとその他2種類の充填材1個の強度を縦、横、斜めの方向から検討を行った。第2図に荷重条件を示す。強度試験には島津製オートグラフAG10TB形精密圧縮機を用いて、押し下げ速度10 mm/minとして行った。強度は降伏点強度 (残留ひずみはあるが、破壊まで到達しない強度) で比較した。

#### 1.1.2 数個の充填材をランダム充填した場合の強度試験

ヘックボールとその他2種類の充填材をそれぞれ480<sup>W</sup> × 480<sup>L</sup> × 700<sup>H</sup> mmの箱に詰め、上部に押え蓋をして強度試験を行った。第3図に荷重条件の例を示す。また強度の比較は単体の場合と同様、降伏点強度で行った。

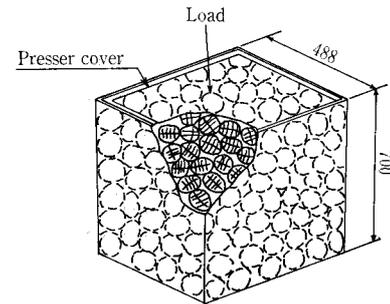
### 1.2 実験結果と考察

#### 1.2.1 強度試験結果

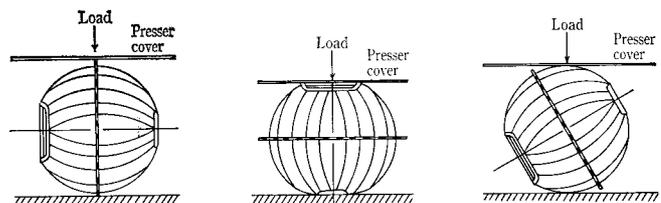
充填材単体の強度試験結果を第1表に、また数個の充填材をランダム充填した場合の強度試験結果を第2表に示す。

第1表および第2表より次のことが確認された。

- (1) 強度的にはM充填材が最も強く、V充填材、ヘック



第3図  
数個の充填材をランダム充填した場合の荷重条件  
Fig. 3  
Loading condition in the case of several units randomly filled



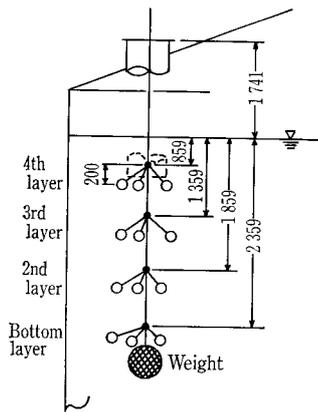
第2図 単体の荷重条件  
Fig. 2 Loading condition in the case of one unit

**第 1 表** 充填材単体による耐荷重試験  
**Table 1** Loading test of one unit of media

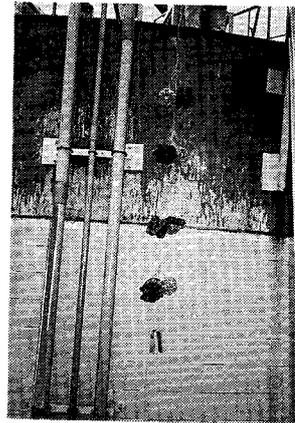
Type	Direction	Maximum load [kg]
HEC ball	Horizontal	55
	Vertical	65
	Oblique	36
M media	Vertical	490
	Horizontal	80
V media	Horizontal	190

**第 2 表** 数個の充填材による耐荷重試験 (488L×488W×700Hの箱に充填)  
**Table 2** Loading test of several units of media (Filled in a box measured 488L×488W×700H)

Type	Number	Maximum load [kg]	Compression rate at maximum load [%]	Recovery rate [%]	Remarks
HEC ball	80	1 300	32.0	56.0	1) No breakage 2) No engagement among media
M media	158	2 380	30.0	49.0	1) No breakage 2) Overall engagement among media
V media	47	2 600	24.2	46.5	1) No breakage 2) Some engagement among media



**第 4 図**  
充填材投入状況 (N社)  
**Fig. 4**  
Distribution of packing media in tank (N company)



**写真 1**  
N社充填前 ('89.2.8)  
**Photo. 1**  
Packing media before filling (N company)

ボールの順であった。

- (2) いずれの充填材も破壊することはなかった。
- (3) 圧縮後の復元率はヘックボールが最も大きくV充填材, M充填材の順であった。
- (4) 圧縮後の充填材同志の絡みは, ヘックボールでは全く認められず, V充填材では一部絡みが認められ, またM充填材では全体的な絡みが認められた。

上記の結果より, ヘックボールは充填材同志の絡みがないことから, 充填材によるブリッジの形状が起こりにくいと推定される。これは形状が球状であることに起因し, A, Bリアクターの充填材には適しているといえる。

### 1. 2. 2 充填材に要求される強度の検討

実装置に使用するための必要強度の確認を行った。

- (1) 充填材投入初期にかかる最大荷重は, 充填高さ 10 m の場合で, 約 420 kg/m<sup>2</sup> (付着汚泥のない場合) となる。
- (2) 充填材に汚泥が付着した場合の充填材にかかる最大荷重は, 槽内で水が存在する状態下では, 約 35 kg/m<sup>2</sup> (充填高さ 10 m) となる。
- (3) 汚泥が付着した状態で, 槽内が水抜きされた場合, 充填材にかかる最大荷重は, 約 5 000 kg/m<sup>2</sup> (充填高さ 10 m) となる。

一方ヘックボールの最小強度は, 第 1 表から, 1 m<sup>2</sup> 当り約 2 700 kg/m<sup>2</sup> となる。

すなわち, A, Bリアクターの運転時に異常事態が発生し槽内の水抜きを行う場合, 最大付着状態では完全に空にすることは強度面から困難であるが, その場合でも水深 5 m 相当の水抜きには耐えることができる。したがって, 通常の操作の範囲内では使用可能な強度として十分であることを確認した。

## 2. 汚泥付着試験

### 2. 1 付着試験の目的と実験方法

ヘックボールの汚泥付着状況をほかの 2 種類の充填材と比較して遜色ないかどうか確認するために, N社およびF社の実装置に充填材を投入して汚泥付着試験を行った。

#### 2. 1. 1 N社においての実験方法

各充填材を 4 個ずつ第 4 図および写真 1 に示すように充填材を投入した。槽底部から 1 段目, 2 段目, 3 段目, 4 段目とした。付着汚泥量の評価は各充填材の風袋重量を実装置に投入する前に測定し, 一定期間経過後に充填材を取り出し, 汚泥が付着した状態で充填材を計測して充填材 1 m<sup>3</sup> 当りの付着汚泥量を求めることとした。

#### 2. 1. 2 F社においての実験方法

N社での汚泥付着速度が非常に遅いため, F社においても同様の試験を行った。第 5 図に示すように水深のみが異なり, 他の条件はN社と同一にして, 充填材 1 m<sup>3</sup> 当りの付着汚泥量を求めた。しかし, 充填後 3 カ月で写真 2 に示すように充填材が閉塞状態となったため試験を終了した。

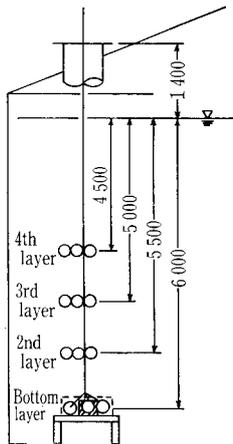
### 2. 2 実験結果と考察

N社およびF社において, 充填材 1 m<sup>3</sup> 当りの汚泥付着量 (湿潤重量) の確認を行った結果を第 3 ~ 5 表に示す。汚泥の付着状態は, 写真 2, 3, 4 に示す。表および写真より次の結果を得た。

- 1) N社において汚泥付着状況は, 写真 3 に見られるように 1 段目から 4 段目までのどの充填材も薄い膜が付着している程度であった。

10 カ月目によりやく 1 段目の充填材だけ既設の充填材と同程度の汚泥が付着した。

第 4 表から 1 段目の充填材で付着汚泥量の多い方から V 充填材, ヘックボール, M 充填材の順であった。



第5図 充填材投入状況 (F社)  
Fig. 5 Distribution of packing media in tank (F company)



写真2 F社充填後3ヶ月目の汚泥付着状況 (各段のヘックボール)  
Photo. 2 Deposit after three months (F company) (HEC ball at every layer)

第3表 単位体積当りの汚泥付着量 (N社) 「充填後3カ月」  
Table 3 Volumetrical deposit per unit volume (N company) (3 months after filling) Unit: g/m<sup>3</sup>

	V media [1 100/m <sup>3</sup> ]	M media [380/m <sup>3</sup> ]	HEC ball [591/m <sup>3</sup> ]
Bottom layer	9 900	8 360	5 910
2nd layer	17 600	7 980	8 865
3rd layer	19 800	13 300	14 184
4th layer	14 300	14 060	19 503
Average	15 400	10 925	12 116

第4表 単位体積当りの汚泥付着量 (N社) 「充填後10カ月」  
Table 4 Volumetrical deposit per unit volume (N company) (10 months after filling) Unit: g/m<sup>3</sup>

	V media [1 100/m <sup>3</sup> ]	M media [380/m <sup>3</sup> ]	HEC ball [591/m <sup>3</sup> ]
Bottom layer	203 500	137 560	158 388
2nd layer	20 900	10 260	13 593
3rd layer	3 300	5 320	8 274
4th layer	18 700	4 940	17 139
Average	61 600	39 520	49 349

2) F社における汚泥付着状況は、写真2に示すように、3カ月に充填材が閉塞状態となった。これは、槽に浮遊している汚泥を充填材内に取り込んで団子状になったのではないかと考えられる。

充填材内に取り込んだ汚泥も付着汚泥として考えれば、充填材1 m<sup>3</sup>当りの汚泥付着量が多い順からヘックボール、V充填材、M充填材の順であった。

上記より、ヘックボールは汚泥付着の点からも他の充填材と遜色はなく実装置に適応できると考える。

### 3. 汚泥剥離試験

#### 3.1 汚泥剥離試験の目的と実験方法

ABリアクターの性能上、汚泥によって充填材が閉塞状態となった場合、ガス逆洗で充填材に付着した汚泥が均一に剥がれることが必要である。そこで、N社およびF社において汚泥付着試験を行った充填材を用いて、ヘックボールとほかの2種類の充填材について剥離試験を行った。

##### 3.1.1 剥離試験方法

N社およびF社の汚泥付着試験に用いた充填材を第6図の実験装置に投入し、下部より空気を吹き込み逆洗を行った。

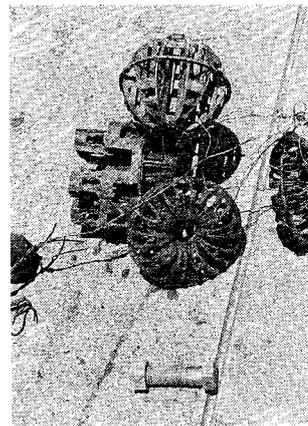


写真3 N社充填後6ヶ月目の汚泥付着状況 (1段目の充填材)  
Photo. 3 Deposit on media after six months (N company) (Media in bottom layer)

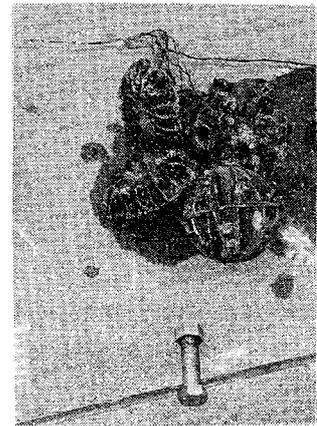
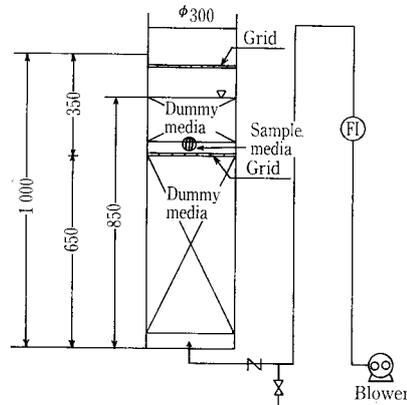


写真4 N社充填後10ヶ月目の汚泥付着状況 (1段目充填材)  
Photo. 4 Deposit on media after ten months (N company) (Media in bottom layer)

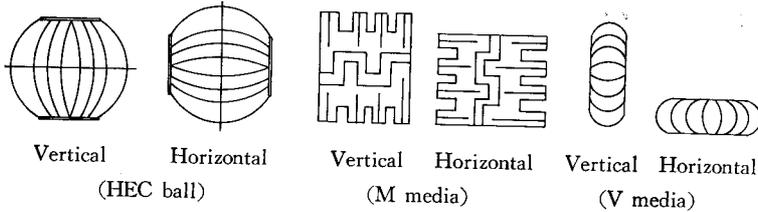
第5表 単位体積当りの汚泥付着量 (F社) 「充填後3カ月」  
Table 5 Volumetrical deposit per unit volume (F company) (3 months after filling) Unit: g/m<sup>3</sup>

	V media [1 100/m <sup>3</sup> ]	M media [380/m <sup>3</sup> ]	HEC ball [591/m <sup>3</sup> ]
Bottom layer	457 600	285 380	458 025
2nd layer	372 900	358 340	411 927
3rd layer	330 000	334 020	432 021
4th layer	306 900	359 100	432 612
Average	366 850	334 210	433 646



第6図 装置概略図  
Fig. 6 Specification of equipment

F社の充填材については、全段とも実験に可能なだけ汚泥が付着していたため、逆洗風量42 l/min・nozzleおよび



第7図 充填材の方向  
Fig. 7 Direction of packing media

第6表 充填材形状及びガスの逆洗流量に対する汚泥剥離率 (N社) 逆洗風量: 42( $\ell$ /min)  
Table 6 Arrangement of media and removal rate (N company) (at air backwash rate: 42  $\ell$ /min)

Type	Before backwash [g]	After 30 minute backwash [g]	Media weight [g]	Removal rate [%]
V media (Vertical)	196	101	40	60.9
M media (Vertical)	461	325	109	38.6
HEC ball (Vertical)	319	176	70	57.4

第7表 充填材形状及びガスの逆洗流量に対する汚泥剥離率 (F社) 逆洗風量: 42( $\ell$ /min)  
Table 7 Arrangement of media and removal rate (F company) (at air backwash rate: 42  $\ell$ /min)

Type	Before backwash [g]	After 30 minute backwash [g]	Media weight [g]	Removal rate [%]
V media (Vertical)	317	273	41	15.9
(Horizontal)	397	212	40	51.8
M media (Vertical)	705	580	107	20.9
(Horizontal)	841	762	107	10.8
HEC ball (Vertical)	666	354	71	52.4
(Horizontal)	657	400	71	43.9

70  $\ell$ /min $\cdot$ nozzle の2種類で充填材の縦方向および横方向について剥離試験を行った。充填材の縦方向および横方向については第7図に示す。逆洗時間は30 minとした。

N社の充填材は1段目のみが剥離試験が可能であったため、逆洗風量42  $\ell$ /min $\cdot$ nozzle で縦方向の1条件だけで試験を行った。

### 3.2 実験結果と考察

第6表にN社の充填材の剥離試験の結果を示し、第7表および第8表にF社の充填材の剥離試験の結果を示している。またN社およびF社の充填材について逆洗前および逆洗後の状態の1例を写真5, 6に示す。

剥離試験の結果、次のことを確認した。

- (1) N社およびF社の付着汚泥とも剥離率に関してヘックボールはV充填材とほぼ同一であり、M充填材に比べると明かに剥離率が大きかった。
- (2) ヘックボールは他の充填材に比べて充填材の方向による剥離率の差が小さかった。

ヘックボールは汚泥の剥離に関して、どの充填材よりも方向性による影響が少なく、かつ剥離率が大きいことよりランダム充填であるABリアクターには適している。

第8表 充填材形状及びガスの逆洗流量に対する汚泥剥離率 (F社) 逆洗風量: 70( $\ell$ /min)

Table 8 Arrangement of media and removal rate of sludge (F company) (at air backwash rate: 70  $\ell$ /min)

Type	Before backwash [g]	After 30 minute backwash [g]	Media weight [g]	Removal rate [%]
V media (Vertical)	342	221	41	40.2
(Horizontal)	275	108	41	71.4
M media (Vertical)	671	242	106	75.9
(Horizontal)	640	308	106	62.2
HEC ball (Vertical)	667	201	71	78.2
(Horizontal)	611	230	71	70.6

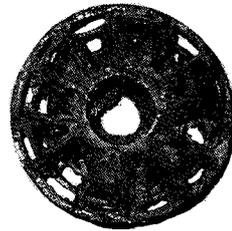


写真5  
N社充填材 (逆洗前)

Photo. 5  
HEC ball before backwash (N company)

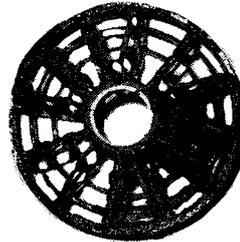


写真6  
N社充填材 (ヘックボール) 30分逆洗後

Photo. 6  
HEC ball after 30 minute backwash (N company)

### まとめ

新型球状充填材ヘックボールの強度、汚泥付着量、汚泥剥離率の面から性能確認した結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 槽内に水張りを行った状態での運転には、ヘックボールは強度的に問題ないことが確かめられた。
- (2) 充填材同志の絡みが認められなかったことから、充填材によるブリッジの形成が起りにくいと推定される。
- (3) 1 m<sup>3</sup> 当りの汚泥付着量は他の充填材と比較し、ほとんど変らなかった。
- (4) 汚泥の剥離に関しては、充填材の方向による剥離率の差が小さく、ランダム充填であるABリアクターの充填材としては適した構造である。

### むすび

以上の試験結果より、このたび実装置にヘックボールを利用することになった。

最後に、本稿の作成に当たり多大なご協力、ご支援を賜った、関係各位に深謝致します。

# 深層曝気装置による貯水池の水質改善

## Improvement of Impounded Water Results Achieved by Use of Hypolimnetic Aerator



(環)環境装置部 計画第1課  
原 田 元  
Hajime Harada  
(環)環境装置部 計画第2課  
石 丸 豊  
Yutaka Ishimaru  
藤 井 督 大  
Tokuhiko Fujii

Installation of hypolimnetic aerators was found to be effective in supplying dissolved oxygen to the hypolimnion of a reservoir which was suffering from eutrophication. The water quality was much improved as a result prevented leaching of  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ , etc. out of benthic deposits without disturbing thermal stratification.

### まえがき

一般に河川の下流域に沿って開発の進んだ都市部からみると、かなり上流域に位置して、最近までは比較的清澈な水質の水が得られるとされていた湖沼やダム、貯水池でさえも、近年の都市化スプロール現象の影響は避けられず、さらに上流部に開発された地域から生活排水、工場排水、農業排水などが流れ込むこととなり、自然の浄化能力を上まわる汚濁物、栄養塩類が貯水池内に蓄積されて、富栄養化への過程を急ピッチにたどりつつある。

本来、富栄養化現象は、自然界の生物代謝活動の結果として、数百年から数千年の年月をかけて徐々に変遷していくものとされていたが、近年人類による生産活動の活発化により、湖沼などに排出される栄養塩類が急激に増加することとなり、その結果、栄養塩類濃度の増加と共に植物性プランクトンの異常発生をはじめ水質汚濁の問題を引き起こすこととなった。

以上のような現象も富栄養化と呼ぶが、長年月の自然要因による富栄養化と区別するために、人為的富栄養化と呼ばれている。現在われわれが問題とする富栄養化は、ほとんどがこの人為的富栄養化であるといつてよい。

このような状況から湖沼・ダム・貯水池などの水質を守りあるいは改善するために、種々の方策が各方面でとられているところであり、その詳細については以前に本技報<sup>1)</sup>で紹介したことがある。それによると大別して、

- (1)流域対策 : 汚濁発生負荷を源から抜本的に削減する方法 (例: 下水道の完備)。
- (2)貯水池内対策: 貯水池内に蓄積した汚濁物を除去する。あるいは、水質を改善する方法。

の2方式がある。

今回、貯水池内対策として、最も効果があるといわれている深層曝気装置を、神戸市千利貯水池向けに納入したので、その運転結果、水質改善の効果などについて報告する。

### 1. 深層曝気循環法

貯水池の曝気および循環法には、主に次の2方式があるが、本報では2)深層曝気循環法について紹介する。

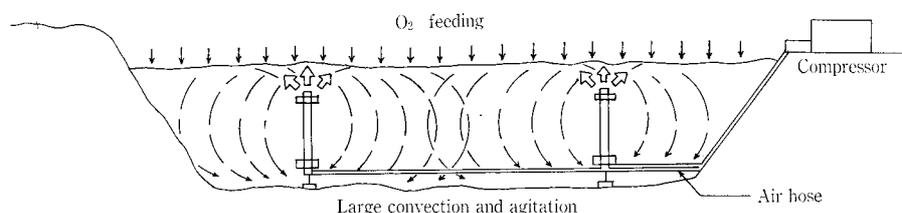
#### 1) 全層曝気循環法

貯水池全体を攪拌混合する方法で、表層と底層の温度差がほとんどなくなることから、温度躍層を破壊することになり、成層破壊法ともいわれている。本方式の特長は、貯水池全体の攪拌によって底層部へ酸素を供給することにより、底層から栄養塩類、Fe、Mnなどの溶出を防止して、底層水の水質改善を行うのみならず、表層部に発生する植物プランクトンを日光の届かない底層部に移動させて、その増殖抑制に寄与することである。その模式的な設置例を第1図に示す。

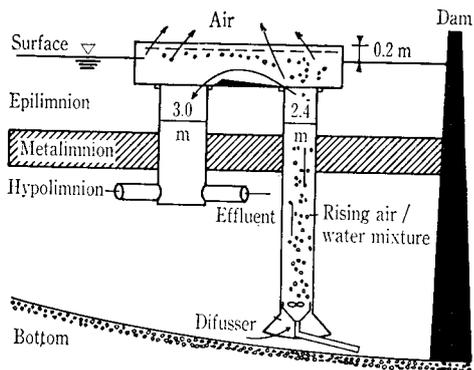
なお、当社では大阪府滝畑ダムや近畿農政局呑吐ダム(兵庫県)などに本方式による本格的な実装置を納入し、好成績を収めている。

#### 2) 深層曝気循環法

深層曝気循環法は、スイスの湖で初めて採用され、その後、主に欧米で発展してきた。本法は温度躍層を破壊しないで底層部に直接酸素を供給する方法である。このため底層部の低温がそのまま維持されるので、自然の生態系に大きな影響を与えず、たとえば冷水魚の増殖に効果があるため、欧米のニーズ(釣りなどのレクリエーション)に適した方法であるといわれている。



第1図 全層曝気装置の設置例  
Fig. 1 An overall aeration system



第2図 深層曝気装置 (エアリフト型, 西ドイツ)  
 Fig. 2 A full air lift, hypolimnetic aerator used in Wahnbach Reservoir, West Germany (Bernhardt, 1974)

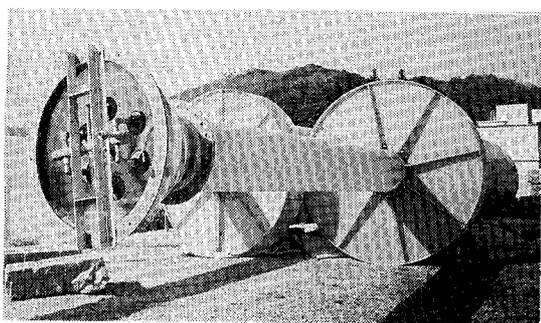


写真1 深層曝気装置 (アクアマージ)  
 Photo. 1 Hypolimnetic aerator (AQUA-MARGE)

わが国で既に稼働している深層曝気装置は、1984年に多目的ダムの一庫ダム (兵庫県) に設置されたものが唯一であった。本装置は、西ドイツの Wahnbach 貯水池に設置されたのと同型 (第2図) である。

ここでは常用洪水吐から放流する際の硫化水素臭の発臭防止が目的であった。

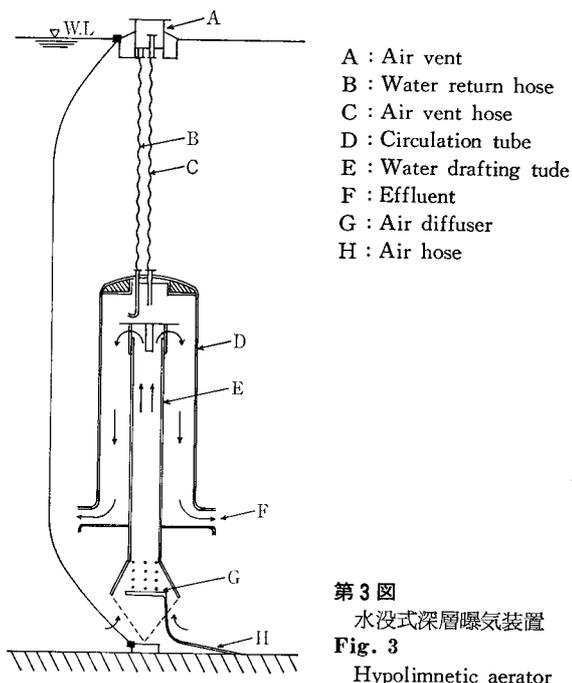
一方、今回当社が開発し、神戸市の千疋貯水池に納入した深層曝気装置は全水没型で、水面上に浮かぶ台船や装置頂部を極力少なくして、景観や船の航行に支障がないように工夫している。

本深層曝気装置は写真1、第3図に示すような二重円筒形の水没式エアリフト装置である。

その構造は陸上に設置したコンプレッサーからエアース(H)を通じて、貯水池底部近くに設置したエアディフューザー(G)に空気を供給すると、空気は深層曝気装置内筒(E)を上昇する際、水中に一部が溶解し、酸素を供給するだけでなく、エアリフト効果によって大量の底層水を揚水することができる。揚水された底層水は深層曝気装置外筒(D)を下降し、循環水出口(F)から第3図に示す矢印に沿って、広い範囲に拡散されるので、その溶存酸素の作用で底層部全域の水質を改善することができる。

一方、溶解せずに循環装置内に残留した空気は、排気用ホース(C)を通じて排気口(A)に排出されるので、上層の水域を攪乱することはない。また本装置は底層部深く設置されるので、上層部は温度躍層を保持したまま静止している。

ところで神戸市千疋貯水池は、有効水深27.4 m、有効貯



第3図  
 水没式深層曝気装置  
 Fig. 3  
 Hypolimnetic aerator

水量1 161 万 $m^3$ の水道専用貯水池で、最近は栄養塩や有機汚濁物の負荷量の増加により富栄養化の兆候が見られるようになってきた。また、夏の成層期には底層部の溶存酸素が減少するため、底質から栄養塩だけでなく、鉄やマンガンの還元溶出も見られるようになった。

本貯水池では水深ごとに任意に選択取水が可能なため、特に全層曝気を行わず、底層部分の水質改善と富栄養化防止を目的に、底層部に直接酸素が供給できる深層曝気法を採用することになった。

貯水池内には第4図に示すような要領で、堰堤から上流に向かってそれぞれ水平距離にして約150, 650, 1 150そして2 000 mの位置に1基ずつ合計4基の深層曝気装置を設置した。

なお、本装置の仕様の概要は次に示すとおりである。

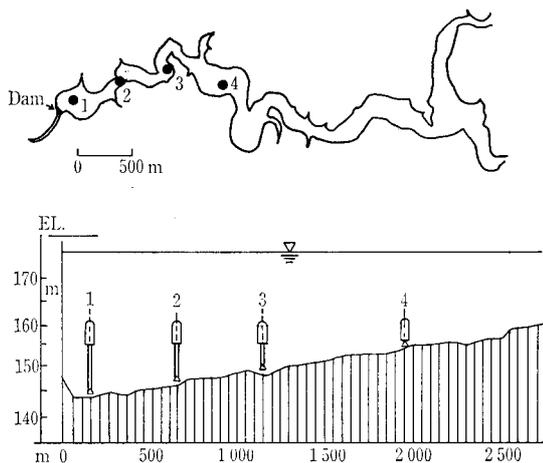
#### 深層曝気装置の仕様

設備名称	仕様	数量
深層曝気装置	形式：全水没式 要部材質：FRP 寸法：装置外筒径 1 600 $\phi$ 内筒径 500 $\phi$ 本体筒長 13, 10, 8. 5, 7 m	4基
空気圧縮機	形式：空冷パッケージ形オイルレスねじ式 容量：3 000 $\ell$ /min $\times$ 7 kgf/cm $^2$ 200 V $\times$ 22 kW $\times$ 2 p	2台

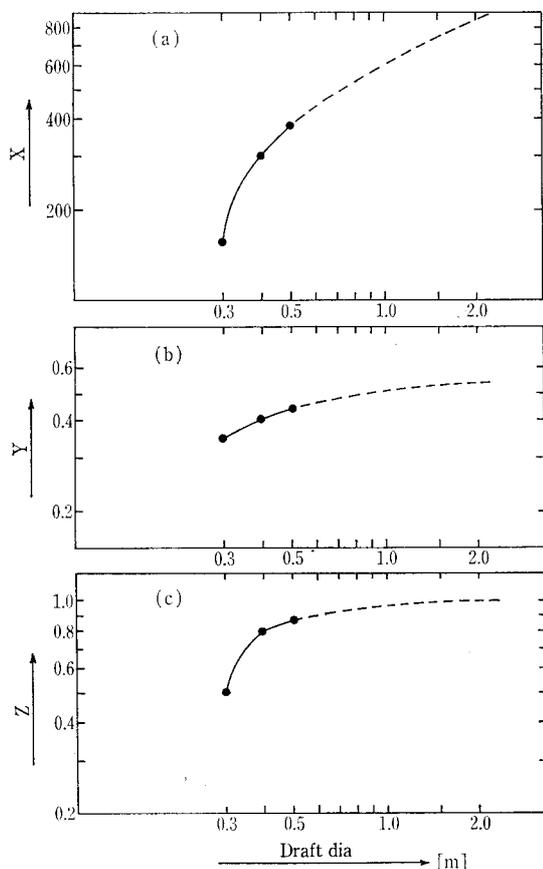
## 2. 深層曝気装置の揚水特性

### 2. 1 揚水量をもとめる理論式

深層曝気装置を設計するには、その揚水特性(循環水量)を把握する必要がある。エアリフト方式における揚水量を求める理論式は、(1)式に示すとおりで、本式はエネルギー収支から導かれる。



第4図 循環装置設置位置  
Fig. 4 Setting points of aerator in Sengari reservoir

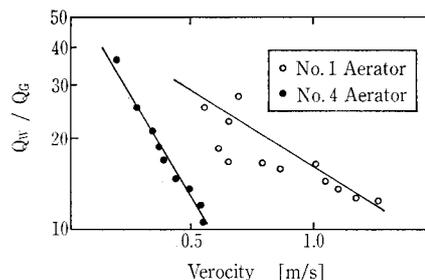


第5図 ドラフト径と係数值  
Fig. 5 Draft dia. vs. coefficient

$$Q_w = \alpha \times \frac{Q_G}{h_e} \times \ln\left(\frac{P_1 + H}{P_1}\right) \times \eta \quad (1)$$

ここに、

$Q_w$ : 揚水量	( $m^3/h$ )
$Q_G$ : 吹込ガス量	( $m^3/h$ )
$H$ : ガス吹込深さ	( $m$ )
$P_1$ : ガス吸込状態絶対圧力	( $m$ )
$h_e$ : 揚水抵抗	( $m$ )



第6図 ドラフト管内流速と  $Q_w/Q_G$   
Fig. 6  $Q_w/Q_G$  vs. velocity in draft tube

$\alpha$  : 定数 (—)

$\eta$  : 吹き込みガスエネルギー  
の揚水動力への変換率 (—)

本(1)式中の揚水抵抗  $h_e$  は、ドラフト管(第3図では、 $E$ :深層曝気装置内筒部のこと)の入口での摩擦損失、残存速度水頭に等しいと考えられ、管内流速の関数として(2)式で示される。

$$h_e \propto U^2 \\ \propto Q_w^2/D^4 \quad (2)$$

$D$  : ドラフト管径 ( $m$ )

しかしながら当社におけるガスリフト装置の揚水特性水理実験より得られた結果<sup>2)</sup>では、揚水量はガス吹込深さ  $H$  よりドラフト内のガス吹込深さ  $H_D$  に強い相関があるとしており、今回の本装置の設計でも、(1)式は適当でないと判断し、このガスリフト装置の揚水特性水理実験より得られた次の実験式(3)式を基準にした。

$$Q_w = X \times Q_G^Y \times \left\{ \ln\left(\frac{P_1 + H_D}{P_1}\right) \right\}^Z \quad (3)$$

$X, Y, Z$  : ドラフト管径の関数

## 2. 2 実装置の揚水量

揚水量の測定は、設置した4基のうち1号機 ( $H_D=11.5$   $m$ ) と4号機 ( $H_D=5.5$   $m$ ) に流速計を取り付け、吹込ガスを種々変化させて行った。ガスリフト装置の揚水特性水理実験より得られた  $X, Y, Z$  などの係数值は第5図に示すとおりである。

本装置の測定結果からみて、係数  $X$  を補正すれば、(3)式と測定揚水量はほぼ一致した。

補正比は実験値1にたいして測定値は0.45となったが、これは揚水抵抗が実装置の場合実験装置よりも大きく、その影響が出たためと考える。

第6図にはドラフト管内流速と  $Q_w/Q_G$  の関係を示した。以上の結果から、揚水量を効率良く増大するためには、ドラフト管径がある程度大きく、ドラフト管長も長いほうが良いといえる。

## 3. 運転結果<sup>3)</sup>

本運転の結果、底層部の循環を行うことにより、貯水池内の水温や溶存酸素の分布の様子は次に示すようになった。

### 3. 1 水温

深層曝気装置設置前と後の貯水池内のある地点での水温の分布状況は第7図に示すとおりである。

貯水池表面の年間の水温は5~30°Cまで大幅に変動するが水深25m以下の底層部は年間を通じて5~6°Cの冷水となっている。

曝気装置の設置前には水温躍層は通常4~5月に形成され始め、その後夏季に向かうに従って上層と下層の2カ所で2層化傾向が顕著に現れていた。この水温躍層は12~1月にかけて消滅し自然対流による循環期に入った。

水温躍層の位置は季節により変動し、春期は水深4~7mの位置で、夏期の2段躍層形成時には水深数mと10数mの位置に形成される。秋期は2次躍層が消滅して1次躍層のみが表層から10数mの位置に残るが、冬期にはこれも消滅して上下層が循環混合することとなる。

一方、曝気装置設置後の水温躍層の形成は装置設置前の1次躍層の位置が数m下がった程度で、設置前のパターンとほとんど同じであった。これらの測定結果から判断して深層曝気装置による底層部の循環を行っても、貯水池内の成層破壊は全く起こらなかったといえる。

### 3. 2 溶存酸素

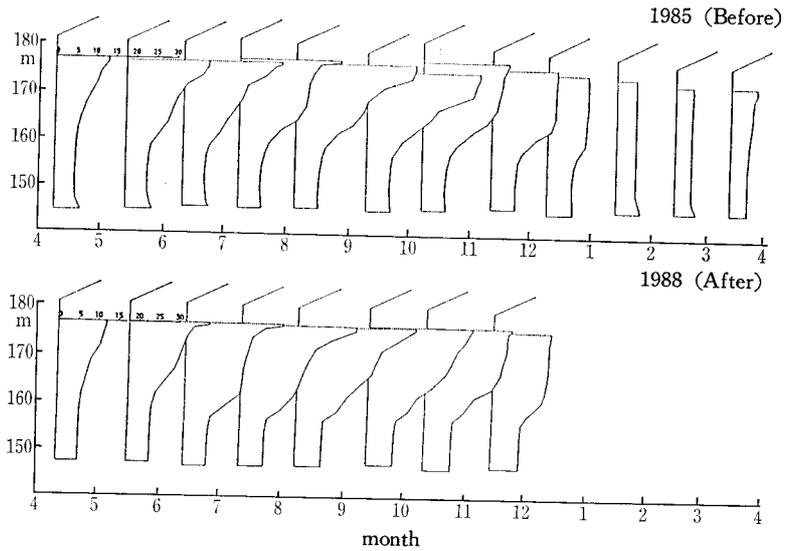
一般に貯水池の場合、上層部では植物プランクトンによる光合成(酸素生産)が活発に行われ、逆に下層部では沈降してくる有機物の分解(酸素消費)が活発に行われる。

一方、夏季の水温上昇に伴って水温の成層が見られるので、その結果、上層部の溶存酸素(以下DOと称す)は過飽和となり、下層部は無酸素状態になると予想される。

深層曝気装置を設置する前後の貯水池内のある地点での、深度ごとのDOを月を追って観測した結果は第8図に示すとおりである。

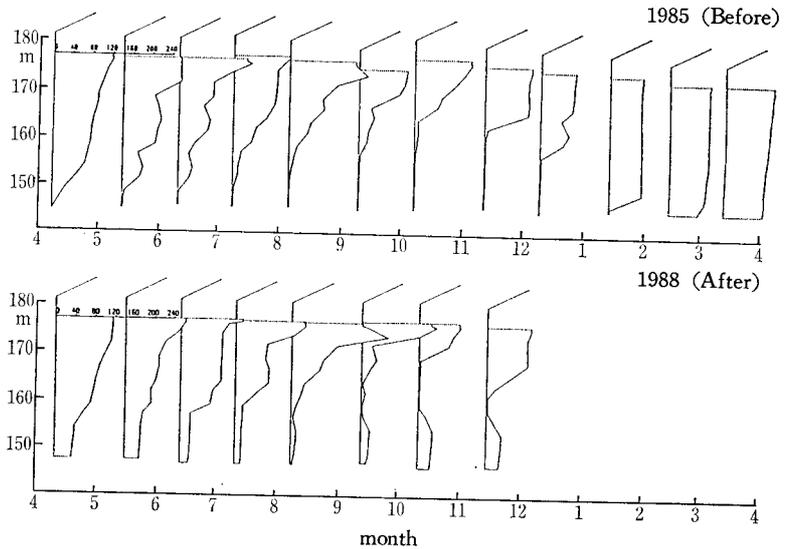
設置前の状況は、冬期の循環期には深水層にまで十分なDOが見られたが、水温躍層が形成されるにつれて深水層のDOは2~5 mg/lまで減少した。そして夏期には予想されたとおり、上層部のDOは過飽和になり、底層部は冬期の循環が起こるまでのあいだ無酸素状態が続いた。

なお、循環装置運転開始直前の下層循環水域(底部~水深22m)のDOは3.3~6.5 mg/lであった。そして運転開始後約30日で酸素の供給および循環作用によってDOはやや増加したものの、その後減少傾向が見えたので、7~8月に入って循環装置への空気供給量を増量したところ、下層循環水域でDOの増加が認められ、10月にはその飽和率が27%になった。第9図に示すとおり、堰堤から上流2000mまでの底層水の無酸素状態はまったく解消され、目標値の5 mg/lまでには至らなかったが好氣的状態は保持できた。これは3.1項の水温に示したように躍層が破壊



第7図 循環装置設置前後の水温(°C)の鉛直分布

Fig. 7 Vertical distribution of water temp, (°C) before and after setting up aerator



第8図 循環装置設置前後の溶存酸素飽和率(%)の鉛直分布

Fig. 8 Vertical distribution of DO saturation degree before and after setting up aerator

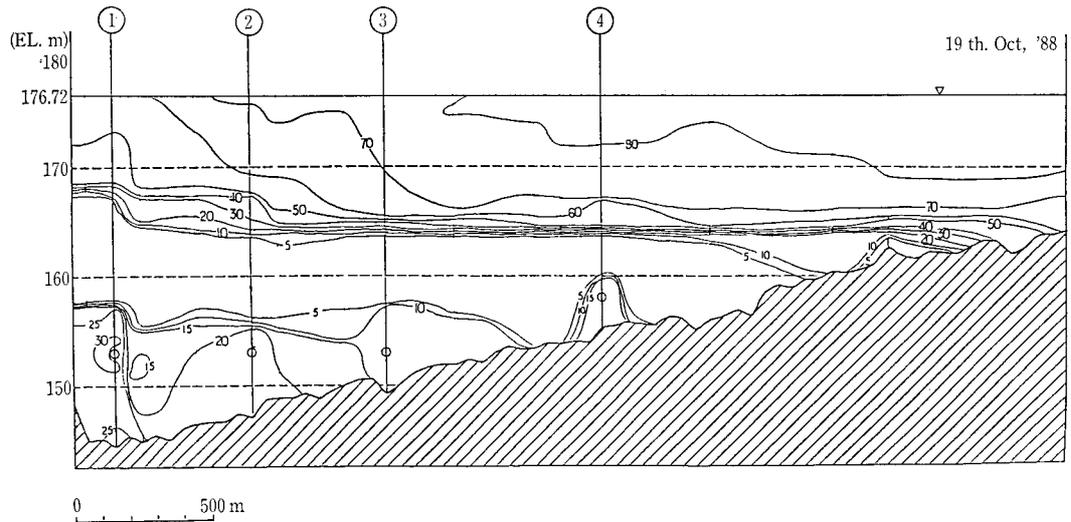
されていないことから考えて、本装置による底層部への空気の供給が酸素の消費量を上回った結果と考えられる。

### 3. 3 水質の改善

淡水は4°Cにおいて比重1を示し、それ以上・以下の水温では比重は1以下となる。このような性質上、貯水池では水温の上昇・下降に伴い、鉛直方向への水の循環と停止を繰り返し、年間の鉛直循環サイクルを形成している。このような貯水池の鉛直循環サイクルに伴い水質も大きく変化する。

一般に夏の成層期の貯水池底層ではDOの低下と、これによるNH<sub>4</sub><sup>+</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>などの底泥からの溶出が起こり、貯水池の水質を著しく悪化させることになる。ところが本装置の設置で酸素が供給されることにより、水質改善の効果が明らかになった。

第10、11図に示すとおり、底層水中に過去10数 mg/l も



第9図 溶存酸素飽和率分布縦断面図 (%)  
Fig. 9 Longitudinal section of DO saturation degree (%)

還元溶出していた  $\text{NH}_4^+$  や  $\text{Mn}^{2+}$  が本曝気装置の運転により抑制されている。

これらのことから本装置の運転制御は、底層水のDO濃度の管理で行える。ただ、最小DO維持濃度については、不明であるが、このたびの調査では栄養塩濃度が通年の夏から秋にかけて上昇するパターンとは逆に、減少傾向にあるため現状では、DO 1~3 mg/l以上が制御目標と推察される。

この結果をふまえ、今後はDO濃度と溶出との関連および、貯水池全体の水質との相関を長期的にとらえ、貯水池の富栄養化制御法としての深層曝気の効果を確認する必要がある。

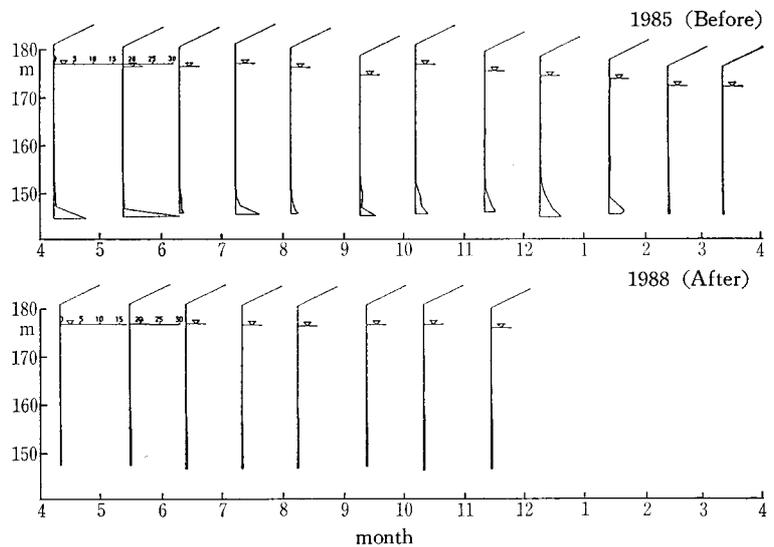
### む す び

わが国において実施例の少なかった深層曝気装置について、特に今回当社が開発した水没式深層曝気装置の納入事例から、揚水特性や水質改善に関するデータが得られたことは、この種の装置の今後の合理的な設計に寄与するものである。この実績を生かして今年度、より大型の第2号機を建設省主管の多目的ダム（総貯水容量1600万  $\text{m}^3$ ）に納入し1990年7月より運転開始しており、その水質保全効果が期待されている。

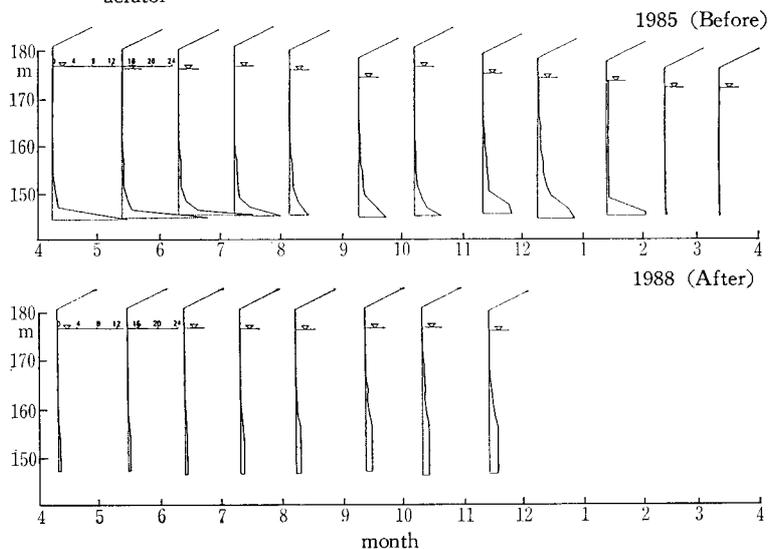
最後に本装置の納入、運転にあたり多大なるご指導、ご協力をいただいた神戸市水道局の方々へ感謝の意を表します。

### 〔参考文献〕

- 1) 神鋼ファウダー技報 Vol. 32, No. 1 (1988) p. 35
- 2) 神鋼ファウダー技報 Vol. 27, No. 3 (1983) p. 61
- 3) 酒井茂喜(神戸市水道局)：千叡貯水池における底層水循環装置による水質改善(I)，第40回全国水道研究発表会講演集 (1989) p. 469



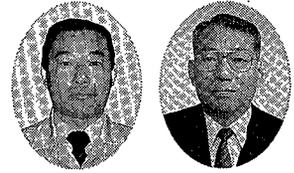
第10図 循環装置設置前後の  $\text{NH}_4\text{-N}$  (mg/l) の鉛直分布  
Fig. 10 Vertical distribution of  $\text{NH}_4\text{-N}$  (mg/l) before and after setting up aerator



第11図 循環装置設置前後の Mn (mg/l) の鉛直分布  
Fig. 11 Vertical distribution of Mn (mg/l) before and after setting up aerator

# エマルジョン型高分子凝集剤

## Application of New Emulsion Type Synthetic Flocculants



神鋼パンテック・ケミカル(株)  
三原 恒美  
Tsunemi Mihara  
光上 義道  
Yoshimichi Mitsukami

Numerous kinds of synthetic flocculants have been used not only in water and waste treatment but also as ingredients of products in many industrial fields.

However, most of the synthetic flocculants, being supplied in the form of powder or gel, are not easily measured and dissolved in water in short time.

Contrasted with these disadvantages, new emulsion type synthetic flocculants are liquid and can be fed by a measuring pump, eliminating a measuring instrument and a dissolving tank, and dissolved in water immediately.

In this article, application procedure and examples of new emulsion type synthetic flocculants are described.

### まえがき<sup>1)</sup>

高分子凝集剤の需要は年々増加しており、'90年の国内需要はアニオン・ノニオン系が1万1000トン、カチオン系が1万2500トン、合計約2万5000トンが見込まれるようになってきている。

その化学構造も多種にわたっているが、製品としては、粉末タイプのものがほとんどであり、ペースト状のものは少なくなっている。

しかも、ここ1~2年の間に新製品として、遠心脱水用に適したアクリル系カチオンタイプや、溶解しやすくかつハンドリング性にすぐれたエマルジョンタイプのカチオン系高分子凝集剤が登場しており、需要が伸びている。

そこで、本報では、このエマルジョンタイプの高分子凝集剤について紹介するとともに、その使用法および実施例について述べる。

### 1. エマルジョン型高分子凝集剤とは<sup>2),3)</sup>

エマルジョンとは、一般的に液体中に液体粒子がコロイド粒子あるいは、それより粗大な粒子として分散して乳状をなすものをいう。このエマルジョンにも2つの型があって、油中水型(W/O型: Water in oil)と水中油型(O/W型: Oil in water)がある。エマルジョン型高分子凝集剤は油中水型で前者に属するものである。これを溶解すると反転して後者の水中油型の存在状態となる。すなわち、エマルジョン型高分子凝集剤はポリマー粒子を水滴ゲル状にして油中に分散したものといえる。媒体である油の方が量的に多いように思われるが、まったく逆でポリマーを含む液体コロイドの方が量的にかなり多い。また、ポリマーそのものの比率は40%程度である。媒体の油はパラフィン系の炭化水素である。

このような新製品が有効なのは、次の理由による。もともと高分子は水に溶けにくい。例えば、同じ凝集剤でも硫酸バンドよりアルギン酸の方が水に溶けにくい。高分子凝集剤は非常に高分子であるがゆえに、水に溶けにくいものとなっている。したがって水性ポリマー溶液をつくる際、溶解速度が遅く、粉末ポリマーを水中に分散させようとしても、水と接触すると塊として集合する性質がある。塊と

なると水と接触する表面積が少なくなり、塊の中に水が入っていくのを妨げ、増々溶けにくくなる傾向がある。これを避けるため、粉末タイプの高分子凝集剤は一定の大きさの粒状にして分散のよいものになっている。すなわち、“まま粉”にならないように、また取扱時、飛散しないように一定の粗い粉末(0.1~1.0 mm)にしている。このことが個々の粉末粒子としての溶解速度を逆に遅くすることにもなっている。

エマルジョン型ポリマーの場合、非常に細かい微粒子(数 $\mu$ )にし、水滴ゲル状粒子として分散させているので、水に接すると、高分子でありながら非常に溶解し易くなっているのが特長である。

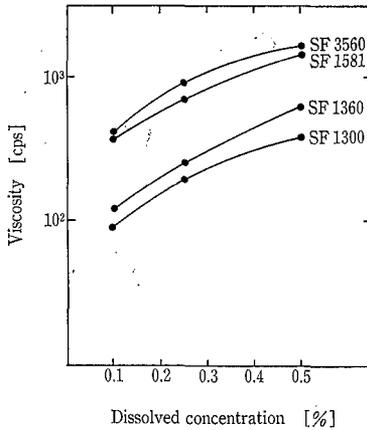
さらに、溶解性の問題以外にも、このエマルジョン型高分子凝集剤は粉末タイプの凝集剤と同質のものをエマルジョンタイプとして製品化できるだけでなく、2つの粉末製品をエマルジョンとしてブレンドしたもの、アニオンタイプとカチオンタイプを共存させた両性タイプのエマルジョンが製品化できる。このように2液法として使用するものを1液法としても製品化できるので、既存の粉末やペーストタイプと違った領域で使用可能な製品を供給できるようになった。

### 2. エマルジョン型高分子凝集剤の特長と種類

従来の粉末品、ペースト品と比較して次のような特長がある。

- 1) 溶解時間が短かく、溶解方法も簡単である。粉末やペーストタイプのように、ディスパージャーなどを使用して分散をよくしても1~2時間の溶解時間を要する。エマルジョンタイプの溶解時間は通常5分程度で充分であるが、15分もあれば完全に溶解できる。
- 2) 液状品であるため、定量ポンプでの注入ができ、自動化や、省力化も容易である。
- 3) 粉末タイプのように微粒子の飛散がない。
- 4) 適用分野としても、塩類濃度が高いもの、pHの高いものから低いものなど広い範囲に適用可能である。

これらの特長を有するエマルジョンタイプの種類を第1表に、また、溶解したときの粘度の一例を第1図に示す。



第1図 エマルジョンタイプの溶解濃度と粘度  
Fig. 1 Viscosity vs. dissolved concentration of emulsion type synthetic flocculants

### 3. エマルジョン型高分子凝集剤の使用 方法

エマルジョンタイプは流動性のある液体なので、溶解は簡単である。エマルジョンは溶解が早いので、むしろ短時間で一挙に溶解する方がよい。

溶解機構としても、原液タンクからラインミキシングで直接溶解し、そのまま注入できるので、溶解タンクの省略も可能であり、システムとして自動化に対応し易い。

粉末タイプはディスペンジャーを用いて自動分散できるが、ディスペンジャーのノズルが、湿気などで目詰りを起こして定量性を失うことがあるので、定期的にチェックと清掃が必要である。また、ペーストタイプの自動溶解は不可能である。この点、エマルジョンタイプは、溶解タンクに溶解することもでき、またライン溶解により直接注入することも可能である。第2～4図に、エマルジョンタイプの溶解プロセスのモデルを示す。

第2図はスタティックミキサーを利用して、連続的にラインで溶解し、プラントに直接注入するプロセスである。

第3図はバッチ式で、粉末タイプやペーストタイプと同様、溶解タンクで直接溶解するプロセスである。ただし、液状なので、人手によらず、ポンプで投入できるので、溶解作業はいたって簡単である。

第4図はタンク溶解ではなく、ライン溶解しながら、貯留タンクに入れる方法である。大量使用の場合に、粉末タイプだと溶解タンクを2槽設け交互に溶解するが、エマルジョンだと1槽で済ますことができる。

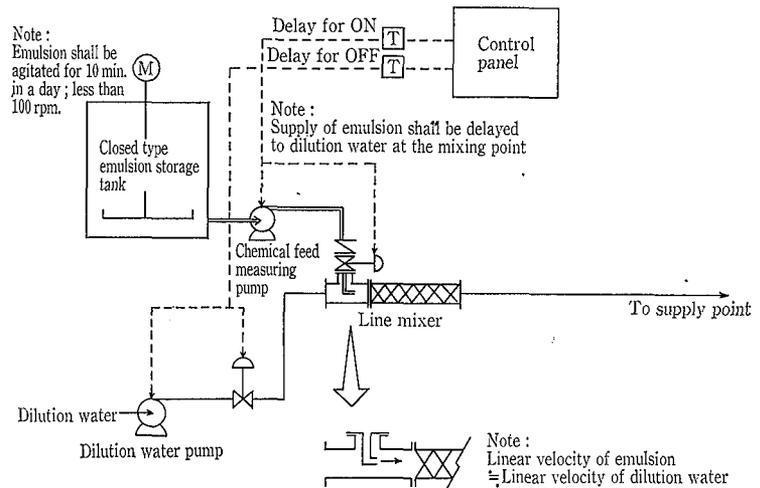
### 4. エマルジョン型高分子凝集剤の実 施例

エマルジョン型高分子凝集剤の実施例を第2表に示す。写真1は製品の一例を示したものである。

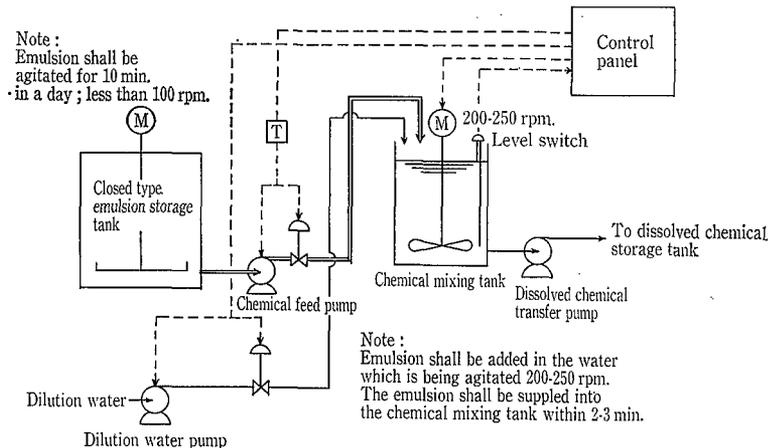
第1表 エマルジョン型高分子凝集剤の種類

Table 1 List of the emulsion type synthetic flocculants

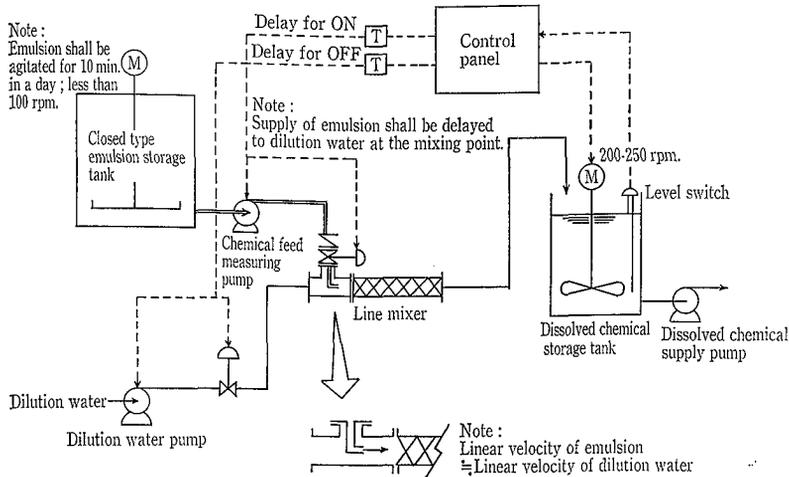
Brand		The main component	Ionic potential	Mol. Wt. approxi.	Effective pH range			
Ionicity	Series No.							
Nonionic	2300	Polyacrylamide		$1\,600 \times 10^4$	3~10			
	2341		Polyacrylamide			.....→	$1\,900 \times 10^4$	5~12
	2650					.....→	$1\,300 \times 10^4$	5~12
	2360					.....→	$1\,600 \times 10^4$	5~12
2541	.....→	$1\,900 \times 10^4$		4~12				
Cationic	1360	Polymetacrylic acid ester	.....→	$500 \times 10^4$	3~10			
	1560		.....→	$500 \times 10^4$	2~10			
	1380		.....→	$400 \times 10^4$	3~10			
	1300		.....→	$350 \times 10^4$	3~10			
	1500		.....→	$350 \times 10^4$	2~10			
	1600		.....→	$250 \times 10^4$	3~10			
	1581	.....→	$400 \times 10^4$	2~10				
	3330	Polyacrylic acid ester	→	$700 \times 10^4$	3~10			
	3360		→	$500 \times 10^4$	3~10			
	3560		→	$500 \times 10^4$	2~10			
3380	→		$400 \times 10^4$	3~10				
3390	→	$800 \times 10^4$	3~10					
Bi-ionic	BE496A	Polyacrylamide Metacrylic acid ester			2~10			
	BF496A				2~10			
	BY496A				2~10			
	BZ496A				2~10			
	BE110A				2~10			



第2図 連続溶解システム  
Fig. 2 Continuous dissolving system



第3図 バッチ溶解システム (ケース1)  
Fig. 3 Batch wise dissolving system (Case 1)



第4図 バッチ溶解システム (ケース2)  
Fig. 4 Batchwise dissolving system (Case 2)

M社の例は製薬会社の余剰汚泥の脱水で、塩鉄+ポリマー2液法でも、脱水困難で一時的に停止していたものであるが、エマルジョンタイプ1液だけで良好な結果が得られるようになったケースである。

D社とA社はいずれも製薬会社の余剰汚泥であるが、脱水機は異なる。エマルジョンタイプが従来のペーストタイプと比較して、少ない薬注量で好結果が得られた例である。

S社は食品系の浮上濃縮汚泥の脱水で他の薬品では十分な運転ができなかったが、エマルジョンタイプに変更すると脱水率が大きく改善され、良好な結果が得られるようになった例である。

### むすび

高分子凝集剤のエマルジョンタイプは新製品として、まだ日が浅く、実施例は多くないが、溶解の容易さと液体であることの特長を生かして、プロセスの自動化と省力化を図りたい。また、pHの適用範囲の広さを生かして、特殊な汚泥処理への適用など今後さらに検討を加え、新製品として適用分野を広げていきたい。

#### 〔参考文献〕

- 1) 化学工業年鑑 90年版
- 2) 公開特許公報, 町田益造他「油中水型高分子エマルジョン組成物」
- 3) 公開特許公報, 町田益造他「水溶性ポリマーの安定な油中水型エマルジョンおよびその製造方法」
- 4) 及川正夫, 葛が谷暢夫, 光上義道「神鋼パテック技報」vol. 33, No. 2, 38~42 (1989)

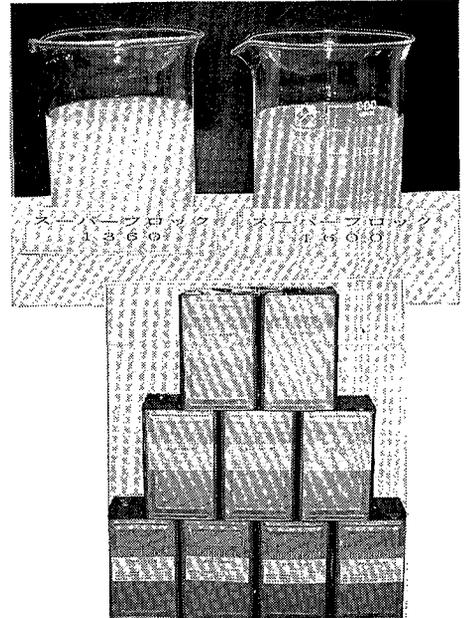


写真1 エマルジョンポリマーおよび18kg缶製品  
Photo. 1 Emulsion polymer and 18 kg packed can

第2表 エマルジョン型高分子凝集剤実施例

Table 2 The application examples of the emulsion type synthetic flocculants

Technical item	M Inc.	D Inc.	A Inc.	S Inc.
1) Kind of sludge	Excess sludge*1	-ditto-*1	-ditto-*1	Floitation sludge*2
2) Influent sludge volume (m <sup>3</sup> /h)	1.5	2.3	4.0	1.5
3) Type of dehydrator	Belt press	DTT-MRP*3	RDP*4	Decanter
4) Chemicals				
① Before alternation	Mix ; FeCl <sub>3</sub> , cationic & anionic polymer*5	PAC 2 500 ppm & cationic polymer 1 120 ppm	FeCl <sub>3</sub> 700 ppm & cationic polymer 785 ppm	New plant
② After alternation	Superfloc : 3851 ; 500 ppm	PAC 1 250 ppm Superfloc : 1560 ; 280 ppm	FeCl <sub>3</sub> 700 ppm Superfloc : 1581 ; 140 ppm	Superfloc : 1 300 ppm
5) Sludge properties				
pH	7.0	6.6	7.2	6.0
Electric cond. (μS/cm)	6 800	5 530	5 510	—
M-alkalinity (mg/ℓCaCO <sub>3</sub> )	2 250	—	—	—
TS (%)	1.45	2.30	2.09	—
SS (%)	1.00	2.02	1.75	5.5
VTS/TS (%)	65.5	58.9	79.9	—
VSS/TS (%)	91.1	60.8	88.4	82.9
LSS*6/TS (%)	<0.1	<0.1	0.63	—
6) Dehydration performance				
① Water content of cake (%)	→83.5	87.5→86.0	80.1→79.5	62.7
② Transparency of the filtrate	Good	Good	Good	Good
③ Cake exfoliation	Good	Good	Good	Good

\*1 Pharmaceutical manufacturer \*4 Rotary diaphragm press  
\*2 Food industry (Mayonnaise) \*5 The operation had been impossible  
\*3 Drum type thickener \*6 Large scale SS more than 100 mesh and multi-roller press

**多孔性ガラス膜で限外濾過システム—  
化学、食品向け開拓**

**Porous glass ultrafiltration system for chemical and food industries.**

神鋼パンテックは、多孔性ガラス膜を用いた限外濾過システムを開発、本格的な用途開拓に乗り出した。大阪工業技術試験所と共同で開発したもので、98%シリカ質のキャピラリータイプの無機膜をモジュール化した。とくに20-1000オングストロームの範囲でシャープな孔径コントロールが可能ならえ、有機UF膜に比べ高い耐熱性と耐食性を有する。同社では有機溶剤濾過用途をはじめ、酸液精製濾過など化学プロセス用途、バイオ・食品濾過プロセス、ガス分離プロセスなどに向け実用化を目指す。

多孔性ガラス膜は、組成比の異なる二種のガラスを混合加熱処理し、非シリカ成分を酸処理によって除去すると、貫通孔の割合が高い多孔膜が得られる。製造は赤川硬質硝子工業所の協力を得ている。ガラス質であることからホローファイバーやキャピラリー型などと成形性が良く、ゾルゲルガラスなどによる膜の一体化加工が容易となり、シール性も高い。また、セラミック膜より温度変化にともなう膨張・収縮に強く、有機膜に比べて耐熱性や耐薬品性に富む。

すでに膜面積0.08 $m^2$ のモジュール(ベッセル径25mm, 長さ300mm)を試作、トルエンといった有機溶剤の濾過テストなど実施している。

同社では超高純度薬品分野での酸の濾過精製や食品・バイオプロセスでの連続分離工程、エマルジョンやガス分離プロセスなど化学用途が考えられるとして、用途開拓を加速させる。(’90.5.24 化学工業日報)

**GL機器補修に新技術—**

**低温処理のゾルゲル法**

**New method of repairing GL equipments by sol-gel process under low temperature.**

神鋼パンテックは、ゾルゲル法によるガラスライニング(GL)機器の局部補修技術を確立、本格的展開に乗り出した。熱処理温度が約300°Cという低温でガラス合成するため、補修部周辺の正常なライニング層を痛めず(再加熱によるクラック)、密着性に優れた平滑なライニングガラス層を任意に形成する。また補修面が突起しないので、配管の狭い部分やフランジのR部での補修も可能。まず比較的耐食条件のマイルドな用途での浸透を図る。

GL機器は、液面をガラスでライニングした耐食機器。ガラスの持つ耐食性、非付着性などの特性を生かし、金属イオン混入やコンタミを嫌うファインケミカル、製薬などの分野で幅広く使われている。

同社が確立したのは、GL機器のライニングガラス層にクラックが生じた場合の局部補修「G-Fine-R」(商品名)。ゾルゲル法によるシリカガラス合成プロセスを使い、低

温(約300°C)で、高温焼成したライニングガラス層に近い形状のライニングガラス層が得られる。

これまで局部補修法として、耐食金属であるタンタル製のキャップで損傷部分を覆う方法や、高密着性エポキシ系レジンによるライニングがある。しかし従来のタンタル法では突起物があり、流動性、狭い場所での補修、エポキシ系レジン法では耐熱性などの点で問題があった。

ライニングガラス層を約350°Cで再加熱すると引っ張り応力がかかり、クラックが生じてしまう。「G-Fine-R」は約300°Cの局所的熱処理を行うためその心配はない。まず平滑性が要求される、比較的耐熱性の緩やかなGL機器での現場補修技術として実績づくりを進める。またこれに並行して、耐食性を向上させる研究開発にも注力する考え。(’90.6.20 化学工業日報)

**工場と研究所移転—跡地は神鋼病院に**

**After a migration for Harima plant and Seishin research center, remaining site of Kobe plant will be provided for Shinko Clinic.**

神鋼パンテックは19日、生産部門を播磨工場に全面移転、技術開発部門は神戸市西区に新設の「西神研究所」に集約する計画を発表した。95年度を最終年度とする中期経営計画の一環で、生産の合理化とコストダウンが狙い。92年春には工場、研究所とも全面稼働させる。総投資額は60億円。本社移転跡地の一部には親会社である神戸製鋼所が神鋼病院を移設する。

計画によれば、敷地面積98500 $m^2$ の播磨工場(兵庫県・播磨町)に13000 $m^2$ の建屋を新設。重さ30トンまでの製品をガラスライニングできる大型焼成炉をはじめ、小型炉、ユーグレネレーション(熱電併給)システムを新たに設置する。事務棟も約三倍に拡張する。同社では昨年秋までにステンレス部門の播磨工場移転を終えており、生産部門の播磨集約が完了することになる。

神戸市西区の神戸ハイテクパークには西神研究所を新設。11000 $m^2$ の土地を確保しており、今年9月から一期工事を開始、クリーンルーム、分析計測設備を持つ研究棟、実験棟を建てる。92年には現本社周辺に散らばる研究要員70人を集め、新素材、バイオ、粉体などの研究を始める。工場集約、研究所新設に必要な60億円のうち、一部は20万株の第三者割当増資(発行価格11000円、額面500円、割当先は神戸製鋼所13万株などすべて神鋼グループ、8月21日払い込み)により調達(新資本金は21億2000万円、発行済み株式数224万株)し、残りは移転後跡地を区割りして売却するなどして賄う。

移転後の跡地50000 $m^2$ については神戸製鋼所と共同で開発することになるが、うち15000 $m^2$ に老朽化した神鋼病院の移設を決定。’94年5月の開院を目標に神鋼が11階建て、ベッド数325床の新病院を建てる。

(’90.7.23 日刊工業新聞)