

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。 02. 3. 20

[技術情報室]

# 高性能型(6000rpm型)遠心清澄モックアップ装置 性能試験結果報告書 (I)

Clarification Performance Test Using Modified  
(6000 rpm type) Centrifugal Clarifier (I)

1991年6月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001



## 高性能型(6000rpm型)遠心清澄モックアップ装置 性能試験結果報告書 (I)

中島一也, 安 隆巳, 河田東海夫

### 要 旨

目的： 平成元年度に製作した高速で回転する（6000rpm）高性能型遠心清澄モックアップ装置を用いて，機器性能を調べ，実機の開発に反映する。

また，リサイクル機器試験施設（RETF）清澄工程への適用性について検討する。

さらに，高性能機と平成元年度前半までに実施したサブクリティカル機の性能比較を行うことを目的とした。

方法： 高性能型遠心清澄モックアップ装置を使用し，分散媒として水，模擬粒子としてアルミナを用い，機械的性能試験，清澄性能試験等を実施した。

結果： 機械的性能試験，清澄性能試験により，以下の結果を得た。

- (1) 標準運転条件（100ℓ/h×6hour）下で清澄試験を行った結果，6000rpm清澄運転時の機械的性能は安定しているが，清澄運転後，降速時に不安定振動現象が確認された。  
従って，本機のRETFへの適用のためには，降速時の振動特性の安定性の向上が必要である。
- (2) 清澄性能については，模擬液の平均粒径により変化するが，粒径0.5 $\mu\text{m}$ φにおいて約94%以上の捕集効率が得られた。
- (3) 6000rpm運転時の給液リーク率と給液条件の関係を把握し，最適給液条件を選定した。
- (4) 高性能型（6000rpm型）とサブクリティカル機（3000rpm型）を比較すると，高性能型は微小粒径の捕集性能は優れているが，給液リーク率は増加することが確認できた。



Clarification Performance Test Using Modified (6000rpm)

Centrifugal Clarifier (I)

Kazuya Nakashima, Takami Yasu, Tomio Kawata

Abstract

Object: The centrifugal clarifier in the EDF (II) was modified into a higher rotation speed (6000rpm type) one.

By conducting performance tests using modified one, its characteristic is compared with the old one and obtained data will be reflected in a machine design which will be equipped in a future plant.

Method: A number of tests in connection with mechanical performance, clarification performance, sludge washing, etc. have been carried out using the modified one under the cold condition.

Result: The following results were obtained.

- (1) Operation of the clarifier was conducted under the nearly same condition as those of the RETF (Recycling Equipment Test Facility).  
The results of these tests show that there were no problems on mechanical performance in the clarification operation, but it happened unstable vibration in the downward rotation.  
Accordingly, for the application of the modified clarifier to the RETF clarification process, it is pointed out to make the vibration characteristics stable in the downward rotation.
- (2) Concerning clarification performance, though fractional separation efficiency depended on average particle size, it was more than 94% for  $0.5\mu\text{m}\phi$  particle size at rotation speed 6000rpm and feed-rate 100 l/h.
- (3) The relations of the leak rate of feed solution and the condition of feed at 6000rpm were confirmed and the optimum feed condition was verified.
- (4) As compared with the modified one (6000rpm type) and sub-critical typed one (3000rpm type), it was confirmed that the former was superior to the latter with respect to the clarification performance of smaller particle size, but increased with respect to the leak rate of feed solution.

---

Components & Materials development section,

Reprocessing technology development division

## 目 次

1.	概 要	1
2.	高性能機の性能試験	2
2.1	開発経緯	2
2.2	試験方法	3
2.2.1	装置概略	3
2.2.2	試験手順	3
2.2.3	サンプリング	5
2.2.4	分析方法	5
2.2.5	測定項目	5
2.3	試験結果および考察	6
2.3.1	機械的性能	6
2.3.2	清澄性能	8
2.3.3	スラッジ洗浄	9
2.3.4	給液リーク率	10
2.4	まとめ	13
2.4.1	機械的性能	13
2.4.2	清澄性能	13
2.4.3	スラッジ洗浄	14
2.4.4	給液リーク率	14
3.	サブクリティカル機と高性能機の性能比較	46
3.1	サブクリティカル機の評価	46
3.1.1	開発経緯	46
3.1.2	仕 様	46
3.1.3	性能評価	46
3.2	サブクリティカル機と高性能機の性能比較	49
3.2.1	機械的性能	49

3.2.2	清澄性能	49
3.2.3	給液リーク率	49
4.	今後の課題	67
4.1	給液リーク率と清澄性能	67
4.2	運転安定性の改良	67
4.3	リンシング性能評価	67
5.	参考文献	68
付録 1	用語の定義	69
2	部分捕集効率について	74
3	給液リーク率の試験データ	78
4	機械的性能の試験データ	79

# 1. 概 要

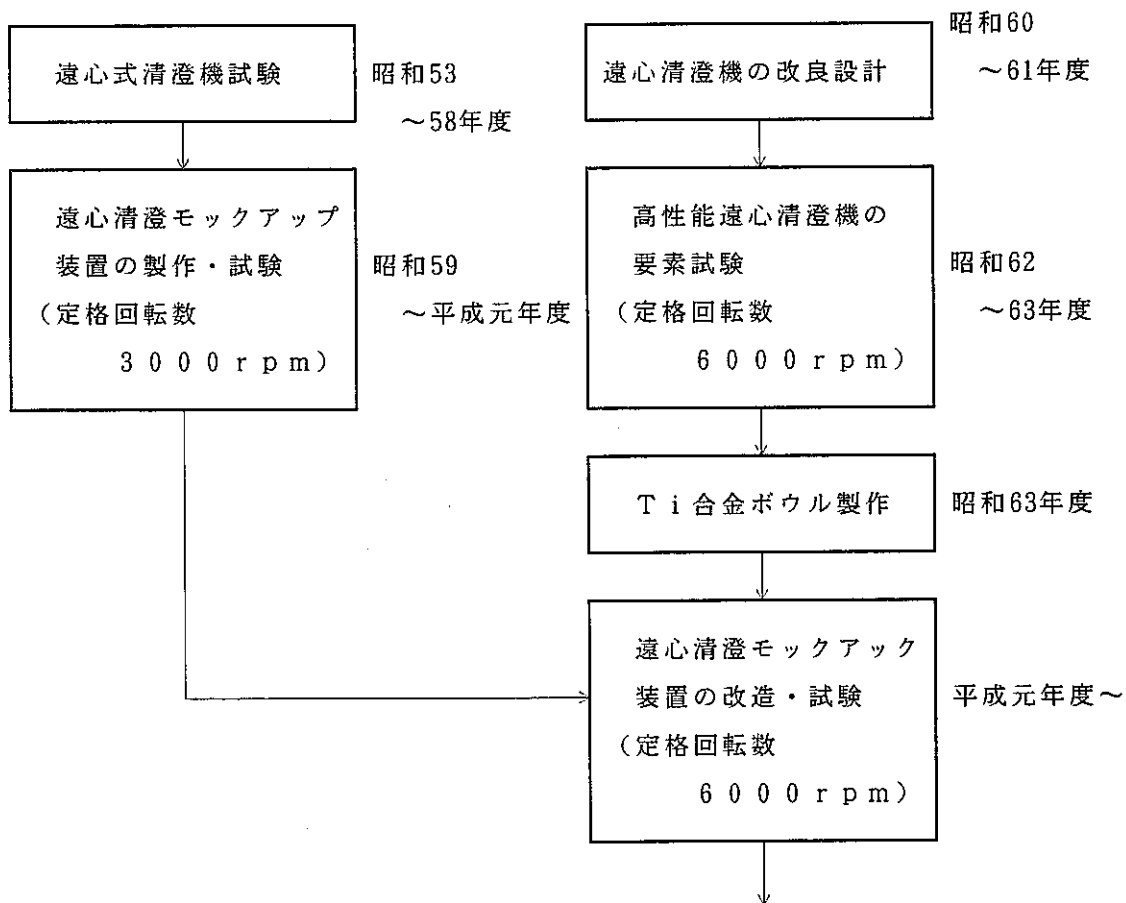
高速炉燃料再処理施設の清澄工程機器として、遠心清澄装置の開発を実施してきた。昭和59年度に遠心清澄モックアップ装置を製作・据付し、平成元年度前半まではサブクリティカル機（定格回転数3000rpm）の各種性能試験を実施した。

平成元年度後半からは、微細粒子の捕集効率を改善することを目的として、サブクリティカル機を高性能機（定格回転数6000rpm）へ改造し、性能試験を実施した。

本書は、サブクリティカル機の総合評価及び平成元年度に実施した高性能機に関する性能試験について記述する。

下記に開発経緯を示す。

## 遠心清澄機の開発経緯



## 2. 高性能機の性能試験

### 2.1 開発経緯

微小粒径の捕集効率改善を目的として、サブクリティカル機（定格回転数3000rpm）より高い定格回転数をもつ高性能機（定格回転数6000rpm）の開発を昭和60年度から実施してきた。

昭和60～63年度に、委託研究により、高性能機の回転ボウルの仕様（材質、形状、分離性能）および、要素試験機による回転性能試験を実施した。

平成元年度後期以降、要素試験機の性能を参考にした高性能型遠心清澄モックアップ装置を東海事業所 第2応用試験棟に設置し、下記に示す各種の性能試験を実施済、又は実施中である。

- ① 清澄性能試験
- ② スラッジ洗浄試験
- ③ 給液リーク試験
- ④ 振動特性試験
  - (イ) 清澄機、清澄機設置架台取付機器の共振周波数測定
  - (ロ) 給液ノズル位置、方向を変えた場合の振動特性試験
  - (ハ) 横バッフル板を取り付けた場合の振動特性試験
  - (ニ) 設置架台強度の違いによるの振動特性試験
  - (ホ) (イ)～(ハ)を組み合わせた場合の振動特性試験

本報告書では、上記の① 清澄性能試験、② スラッジ洗浄試験、③ 給液リーク試験の一部の試験結果について述べ、昭和59～63年度に実施したサブクリティカル機の性能と比較する。



## 2.2 試験方法

### 2.2.1 装置概略

表 2.2.1 に高性能機の仕様，図 2.2.1 に装置フロー図を示す。

清澄性能試験時のフローは以下の通りである。

調整槽 V-4 で調整された試験液はポンプ P-4 を経て遠心清澄機 CC-1 に供給される。遠心清澄機本体の概略構造は，図 2.2.2 に示す様にボウルが軸から懸垂された状態で回転する構造となっている。この下方より給液ノズルが立ち上がり，ボウル内面下部に供給液を吹き付ける。供給液は，遠心力により径方向に押し付けられた状態（定格回転数で 8000G に相当）で上方へ流れ，上部の堰を越えて流出する。この間に固形物は沈降（径方向外側へ移動）し，ボウル内面に付着する。流出液はボウル回転によって振り出され，ケーシング内面に衝突，回収され，ケーシング下部から清澄液ラインへ流れ出すことになる。

### 2.2.2 試験手順

#### (1) 試験内容

平成元年度に実施した試験を以下に示す。

- ・ Run201：清澄性能試験，スラッジ洗浄試験
- ・ Run202：Run201再試験
- ・ Run205：給液リーク率試験（給液ノズル口径 3mmφ）

以上の試験を以下の 3 つの項目にまとめる。

#### 1) 機械的性能

ボウルおよび軸振動の程度，異常の有無の確認，さらに給液リーク量の比較を目的として実施した。

表 2.2.2 に試験条件を示す。測定項目は，ボウル回転数，ボウル・軸振動幅，軸受温度，給液リーク量，給液量，駆動力である。

#### 2) 清澄性能

各種運転条件下での清澄性能（捕集効率および粒度分布）を測定し，定格運転時の清澄性能の評価を行った。試験に用いた分散媒は水（20℃），模擬スラッジ（模擬不溶解残渣）はアルミナ（ $Al_2O_3$ ）とした。表 2.2.3 に試験条件を示す。

3) スラッジ洗浄

ボウル内にスラッジを堆積させた後、洗浄時のボウルの回転数をパラメータとして、スラッジ洗浄を実施し、最適スラッジ洗浄条件の検討を行った。表 2.2.4 に試験条件を示す。

(2) 試験液の選定

試験液組成の選定にあたっては、FBR燃料であるPHENIX燃料の再処理時のCPF粒度分布データを参考にした。(参考文献 7) 参照)

予想される液特性のうち、遠心清澄機の性能に影響を与えられられるのは、液および粒子の密度、液の粘性および粒径である。これらは液中での粒子の沈降速度に影響するパラメータであり、ストークスの式においては以下の関係で表現される。

$$V = \frac{d H}{d t} = \frac{g (\rho_P - \rho_L)}{18 \eta} D_x^2 \dots\dots\dots ①$$

遠心場において、

$$V = \frac{d R}{d t} = \frac{R \omega^2 (\rho_P - \rho_L)}{18 \eta} D_x^2 \propto \frac{\rho_P - \rho_L}{\eta} D_x^2 \dots\dots\dots ②$$

$$K = \frac{\rho_P - \rho_L}{\eta} D_x^2 \dots\dots\dots ③$$

- $\rho_P$  : 粒子密度 (kg/m<sup>3</sup>)     $g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)     $H$  : 粒子位置 (m)
- $\rho_L$  : 液密度 (kg/m<sup>3</sup>)     $R$  : 回転半径 (m)
- $\eta$  : 液粘性 (Pa·s)     $\omega$  : 角速度 (rad/s)
- $D_x$  : 粒径 (m $\phi$ )     $V$  : 沈降速度 (m/s)

この値Kが同じであれば、遠心清澄機内での粒子の挙動は同様であると期待できる。

ただし、現実には、粒子の径  $D_x$  がある程度の分布幅を持つため、これを除く。

$$K' = \frac{\rho_P - \rho_L}{\eta} \dots\dots\dots ④$$

を一定とする事で模擬を行う事とした。表 2.2.5 に選定した試験液の主要物性を示す実液の  $K'$  値を約  $3 \times 10^6$  として、この値をもとに試験条件を定めた。

注記 —— 式④中の  $(\rho_p - \rho_L)$  と  $\eta$  のオーダーを比較すると、約  $10^8$  倍であり、  
 $\eta$  が  $10 \sim 30^\circ\text{C}$  程度の温度変化に対しては、 $K'$  値はほとんどオーダー  
的には不変である。(ちなみに、 $\eta$  は  $10^\circ\text{C}$  :  $1.307\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,  $30^\circ\text{C}$  :  
 $0.797\text{mPa}\cdot\text{s}$ )

### 2.2.3 サンプルング

試験中、試験目的に応じて適宜サンプルを採取し、濃度、粒度分布等の分析を行う。  
主なサンプルング点を図 2.2.3、表 2.2.6 に示す。

### 2.2.4 分析方法

参考文献 7) 参照。

### 2.2.5 測定項目

本装置による試験の際、測定対象とする項目とその測定方法を、以下に示す。

- (1) ボウル回転数：計器盤のデジタル出力を一定時間毎に記録する。  
(レコーダ出力有り)
- (2) ボウル、軸振動幅：レコーダ出力 (X, Y 方向) を一定時間毎に記録する。  
(レコーダ出力有り)
- (3) 軸受温度：レコーダ出力 (上, 下軸受部) を一定時間毎に記録する。
- (4) 駆動力：計器盤の指示値 (電圧, 電流) を一定時間毎に記録する。
- (5) 給液リーク量：一定時間毎の給液量及びスラッジライン側リーク量を測定する。

## 2.3 試験結果及び考察

### 2.3.1 機械的性能

#### (1) ボウル・軸振動

##### 1) 清澄運転時の振動状況

表 2.2.3 に清澄試験の試験条件を示す。

図 2.3.1～図 2.3.6 にスラッジ堆積量とボウル・軸振動幅の関係を示す。

図より、清澄運転時の回転数（5500～6000rpmの範囲）および模擬スラッジの粒径に関係なく、ボウル振動幅はほぼ一定、軸振動幅は増加傾向にある。

##### 2) 清澄運転時、スラッジ粒径の影響

図 2.3.1, 図 2.3.3, 図 2.3.4, 図 2.3.6（試験条件は表 2.2.3）にスラッジ粒径の大きい条件（1.5/2.2 $\mu\text{m}\phi$ 混合）と小さい条件（0.4 $\mu\text{m}\phi$ 単種）のスラッジ堆積量とボウル・軸振動の関係を示す。

ボウル振動はスラッジ粒径の大小の差は見られないが、軸振動はスラッジ堆積量の増加とともに徐々に増加し、スラッジ粒径の大きい条件（図 2.3.1）では、約1500gでほぼ一定になるのに対して、小さい条件（図 2.3.3）では、発散傾向にある。

この原因を以下のように推定する。

図 2.3.7 にスラッジ付着状況、図 2.3.8 にその概略図を示す。

図 2.3.8 に示す様にボウル内部は縦バッフル板により  $n$  個の分離室（本試験機の場合は 8 個）に分けられており、それぞれの分離室 1～ $n$  には試験液が一定流量  $f_c$ （総供給流量/分離室数）で供給され、ボウル上部の清澄液抜き出し口より、流量  $f$ （ $f_c +$ （隣分離室から流入する流量 - 隣分離室へ流出する流量））で流出する。

各分離室間においてはボウルが回転することにより液体に回転遅れが生じるため、相対的に回転方向とは逆の方向に流れが生じるものと考えられる。

しかし、仕切板の隙間を通過する際の抵抗が各分離室毎に違うことが考えられるため、その流量は一定ではなく、従って分離室毎の供給量も違ってくる可能性がある。 $i$  番目の分離室において、（隣分離室から流入する流量） $>$ （隣分

分離室から流出する流量)という状態が生じた場合、分離室におけるスラッジ堆積量 $X_i$ は他の分離室よりも多くなる。それ故、各分離室間に捕集量の差異 $\Delta X$ が生じ、ボウル周方向の質量不均一が生じる。さらに、スラッジ堆積量 $X_i$ が増加するに従い、 $\Delta X$ も大きくなり、振動幅が増加すると考えられる。

そして、スラッジ堆積が縦バフフル板の高さまで達すると、試験液は縦バフフル板の障壁もなく、ボウル内壁に沿って滑らかに流れるため、振動幅一定または円周方向の質量不均一が解消傾向になるため、振動幅減少が生じると推測される。

ただし、図2.3.7に示す通り、粒径の大小によりスラッジ堆積状況が異なるため、この状態になるには、スラッジ粒径の大きい条件(1.5/2.2 $\mu\text{m}$   $\phi$ 混合)では、スラッジ堆積量 約1500gで十分であるのに対して、小さい条件(0.4 $\mu\text{m}$   $\phi$ 単種)では、最終スラッジ堆積量 約2000gでも不十分と考えられる。

次に、スラッジ粒径の大きい条件(1.5/2.2 $\mu\text{m}$   $\phi$ 混合)と小さい条件(0.4 $\mu\text{m}$   $\phi$ 単種)の軸振動幅の増加率が異なる原因は、以下のように推定される。図2.3.7に示すように、大きい条件ではスラッジはボウル内壁下方にリング状に堆積するが、小さい条件では、ボウル内壁一面に堆積する。この堆積状況の違いが、回転バランスとしての効果の違いになると考えられる。

### 3) 清澄運転時、回転数の影響

図2.3.1, 図2.3.2, 図2.3.4, 図2.3.5(試験条件は表2.2.3)に回転数5500rpm, 6000rpmの場合のスラッジ堆積量とボウル・軸振動の関係を示す。

Run202はRun201の再試験であり、試験結果も再現性が見られる。

Run201-1, 202-1(回転数5500rpm)とRun201-2, 202-2(回転数6000rpm)の場合は、ボウル・軸振動共、同じ傾向、及び振動幅を示しており、5500~6000rpmの範囲では、回転数の影響はないと考えられる。

### (2) 軸受温度

表2.2.3に示す清澄試験と同時に測定した上・下部軸受温度を図2.3.9~図2.3.14に示す。

図に示される様に、軸受温度は試験液の模擬スラッジ粒径の大小、および清澄運転時の回転数には影響を受けていない。清澄運転後の軸受温度は、清澄運転前の初

期温度に左右される。

標準運転条件（定格回転数6000rpm, 給液流量100ℓ/hr, 6時間運転）では, 上部軸受温度が50℃となり, 軸受許容温度82℃よりも十分低く, 運転上問題がないと考える。

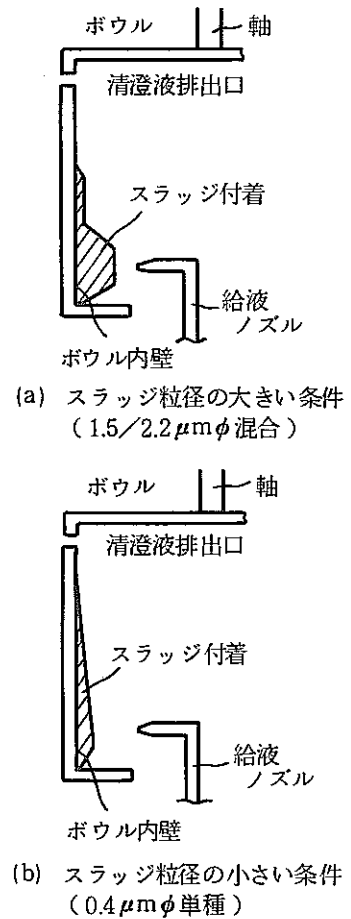
### 2.3.2 清澄性能

#### (1) 定格運転時の清澄性能

図2.3.15に標準運転条件における清澄液の捕集効率, 試験条件を表2.2.3に示す。

図より, スラッジ粒径の小さい領域（粒径1μmφ以下）における捕集効率を比較すると, スラッジ粒径の小さい条件（Run201-3, Run202-3）の方が, 大きい条件（Run201-1, 2, Run202-1, 2）を用いた場合より, 捕集効率が高いのは, 以下の様に考えられる。

図2.3.7に示す通り, スラッジ粒径の大きい条件と小さい条件では, ボウル内壁面へのスラッジ付着状況が異なる。これを, 概略図で示すと右図のようになる。スラッジ粒径の大きい条件では, 給液高さとはほぼ同じ高さでスラッジが山型にリング上にボウル内壁に付着しているが, 小さい条件では, ボウル内壁一面にはほぼ均一厚さで付着している。この付着状況の違いにより, 大きい条件では, 山型のリング状がボウル内壁に沿う清澄液の上昇流を乱し, スラッジ粒径の小さい領域における滑らかな固液分離を妨げていることが考えられる。これに反して, 小さい条件では, 均一厚さで付着しているため, 清澄液の流れを乱す作用が働いていないと推測される。更に, 上記の推測を裏付ける意味で, 図2.3.16にスラッジ粒径の大きい条件と小さい条件の清澄運転時間経過毎の捕集効率を示す。図より, 粒径の大きい条件は, 時間経



付図 スラッジ付着状況の違い

過とともに捕集効率が低下している。これは、スラッジ捕集とともに、スラッジの山が成長しているため、生じると考えられる。それに反して、粒径の小さい条件では、捕集効率はほぼ同一値を示しており、スラッジの山の成長が生じていないと推測される。

以上の推測をまとめると、捕集効率は粒径の大小、すなわち、ボウル内壁へのスラッジ付着状況により変化すると考えられる。

### 2.3.3 スラッジ洗浄

#### (1) スラッジ洗浄性能

洗浄条件\*1（洗浄時の回転数30rpm、スラッジ堆積量1kg当たり水量20ℓ）洗浄後に含まれるスラッジ濃度を表2.3.2、洗浄後のスラッジ付着状況を図2.3.17に示す。（Run202-1~3）

表2.3.2より、スラッジ粒径の大きい条件（Run201-1, 2, Run202-1, 2）は洗浄後の洗浄水濃度が低いのでスラッジ堆積量1kg当たり20ℓの水量で十分であると考えられる。

しかし、スラッジ粒径の小さい条件（Run201-3, Run202-3）は洗浄水濃度も高く、図2.3.17でわかる様に、洗浄後もスラッジが付着しており、水量不足であることが明確である。従って、洗浄水量をさらに増やす必要がある。（本試験では、スラッジを完全に洗浄するためにはスラッジ堆積量1kg当たり約25ℓ必要であった。）

#### 注記

洗浄条件\*1 - 本試験で採用した洗浄条件は参考文献7)の試験結果であり、大きな粒径の模擬スラッジ（1.5:2.2 $\mu$ m $\phi$ 混合）を洗浄した場合のみである。

2.3.4 給液リーク率

給液リーク率の定義および給液条件\*2を下記に示す。

$$\text{給液リーク率} = \frac{\text{給液開始からのスラッジ側への排出量}}{\text{給液開始からの給液流量}} \times 100 (\%)$$

給液ノズル吐出流速	4.1m / s
給液ノズル口径	φ 3 mm

\*2 給液条件 — 参考文献7)参照

(1) 給液リーク率と給液方向

給液方向を図2.2.8に、給液方向のちがいによる給液リーク率の時間変化を、図2.3.18、給液リーク率を図2.3.19に示す。

図2.3.18より、Run205-5の場合（給液ノズルNo.1）が他の条件（Run205-1~4）と比較して、大幅に給液リーク率が高い値を示す。

この原因として、以下の様に考えられる。  
 ボウルが6000rpmで回転している場合、ボウル周速度は126m / s、それに対して、給液ノズル吐出流速は4.1m / sである。この2つの値より算出される、各給液方向の場合（Run205-1~5）の相対速度を下表に示す。

表に示す通り、各ケース共、相対速度に優位な差は見られない。また、給液の流れはどのケースであっても、ボウル内

Run No.	相対速度 (m / s)
205-1	126
205-2	130
205-3	122
205-4	129
205-5	123



壁まで達していることが確認されている。

従って、図 2. 2. 8 に示す様に給液ノズルから給液した水に遠心力が作用する前にボウル中心方向に流れ込み、給液リーク液となるのではないかと考えられる。

また、Run205-3（図中印-◇）とRun205-5（図中印-×）との差異は給液方向とボウル内壁に対する給液角度が若干異なっていること、及びボウル内壁までの距離が遠心力の作用に影響を与えると推測される。

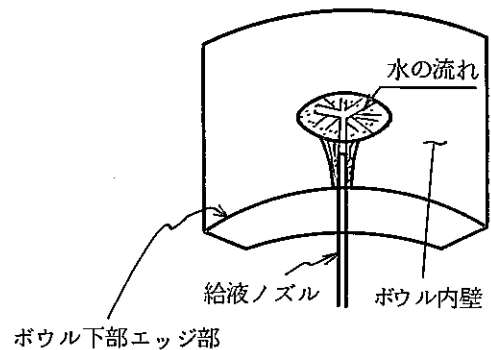
この給液方向を変えた給液リーク率試験の結果として、給液リーク率が最小になるのは、図 2. 3. 19 より、Run205-3 の場合であるが、給液ノズルの形状上、スラッジの目づまりが考えられ、形状が単純で同程度の給液リーク率を示しているRun205-1（ボウル内壁に対して90°）の場合でも十分対応できると考えられる。

(2) 給液リーク率と給液高さ

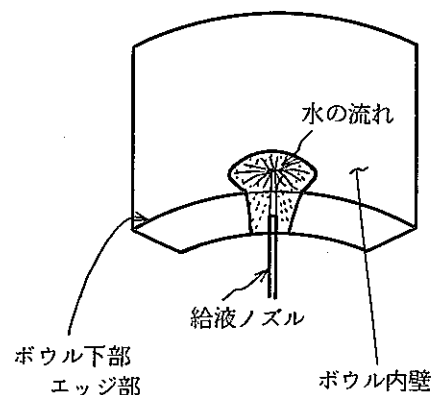
給液高さを図 2. 2. 9、ボウルに対する給液高さによる給液リーク率の時間変化を図 2. 3. 20、給液ノズル高さと給液リーク率を図 2. 3. 21 に示す。図より、従来高さ（Run205-1<sup>3</sup>）の場合が他の条件（Run205-6, 7, 8<sup>3</sup>）と比較して給液リーク率が大幅に高い値を示している。

この原因として、Run205-6, 7, 8 の場合、a 図に示す様に、給液水がボウル内壁面に沿って広がり給液水に均等に遠心力が作用し、給液リークとなる量が少ないと考えられる。しかし、Run205-1 の場合、b 図に示す様に給液水がボウル下部エッジ部で曲げられることが原因の一つと考えられる。

上記(1), (2)および表 2. 3. 1 より給液リーク率の最も小さくなる条件はボウル内



a 図



b 図

壁に対して90°，ボウル下面より給液ノズルを90mm以上にして給液した場合である。

今回の給液リーク率試験で，給液ノズル高さを高くすることにより，給液リーク率は小さくなることがわかった。しかし，機器の性能評価は，給液リーク率の他，清澄性能（捕集効率），連続運転時間，振動特性（ボウル，軸）の総合的評価によるものである。現在，給液ノズル高さの変更によるこれらの項目への影響について，試験を実施し，検討中である。

注記 \* 3

- Run205-1 —ボウル下面から給液ノズルまでの距離 25mm上
- Run205-6 —ボウル下面から給液ノズルまでの距離 90mm上
- Run205-7 —ボウル下面から給液ノズルまでの距離 155mm上
- Run205-8 —ボウル下面から給液ノズルまでの距離 220mm上

## 2.4 まとめ

高性能機を用いて、試験を実施し、以下の結果を得た。

### 2.4.1 機械的性能

分散媒として水、模擬スラッジとしてアルミナ ( $Al_2O_3$ ) を使用して、処理量  $100\text{ l/h}$ 、運転時間  $6\text{ h/day}$  の条件で実施した。その結果、運転時の軸受温度、ボウル・軸振動幅とも運転許容値内であり、機械的性能は安定している。

#### (1) 軸受温度

スラッジ粒径の大小の差は見られず、清澄運転前の軸受温度により運転後の温度が左右される。しかし、今回の運転条件では、軸受温度の運転許容値 ( $82^\circ\text{C}$ ) 以下であり、問題はない。

#### (2) ボウル・軸振動幅

高性能機の場合、スラッジ粒径の大小に関係なく、ボウル振動幅はほぼ一定であるのに対して、軸振動幅はスラッジ堆積量の増加に伴って、増加傾向にある。

軸振動幅に関して、さらに詳細に述べると、スラッジ粒径の大きい条件では、最初はスラッジ堆積量の増加に伴い、振動幅は増加するが、スラッジ堆積量が  $1500\text{ g}$  になると、一定または減少傾向にあるのに対して、小さい条件では、スラッジ堆積量の増加に伴い、振動幅は増加する。また、小さい条件におけるボウル振動幅の増加は、大きい条件の場合の値のほぼ2倍程度になっている。この違いは、ボウル内壁のスラッジ付着状況の違いによるものである。

### 2.4.2 清澄性能

分散媒として水、模擬スラッジとしてアルミナ (公称平均粒径  $0.4\text{ }\mu\text{m}$   $\phi$  単種 /  $1.5\text{ }\mu\text{m}$   $\phi$  と  $2.2\text{ }\mu\text{m}$   $\phi$  混合) を使用して試験を実施し、捕集効率を求めた。

処理量  $100\text{ l/h}$ 、運転時間  $6\text{ h/day}$  の定格運転 ( $6000\text{ rpm}$ ) 条件下で清澄運転を実施した。

捕集効率は、粒径の大小により、ボウル内壁のスラッジ付着状況が異なり、その状況が捕集効率に影響を与えていると考えられる。従って、粒径  $0.5\text{ }\mu\text{m}$   $\phi$  で捕集効率を比較すると、粒径の大小により、 $94\sim 99\%$  に分布している。

#### 2.4.3 スラッジ洗浄

スラッジ堆積量 1 kg 当たり洗浄水量 20 l の条件で、洗浄状況を確認した。

スラッジ粒径の大きい場合は、十分洗浄可能である。ただし、粒径が小さい場合には、洗浄後もスラッジ付着があり、水量不足が見られ、洗浄水量の増加が必要である。

#### 2.4.4 給液リーク率

給液ノズル吐出流速 4m/sec, 給液ノズル口径 3 mm φ の条件で、給液方向および給液高さをパラメータとして、試験を実施した。

給液方向は、ボウル内壁に対して、90° に給液した場合が、給液リーク率 0.2% 程度と低くなる。

給液高さは、従来の給液高さ（ボウル下面より 25mm 上）で給液するより、高い位置で給液した方が給液リーク率が低くなる（0.04% 程度）ということがわかった。

現在、給液高さを変更した場合の影響を調べるため、清澄性能、連続運転時間等に関して検討中である。

表 2.2.1 仕様表 (高性能機)

	仕 様
1. 設計性能	
(1) 定格回転数	6 0 0 0 r p m
(2) 周速	1 2 6 m / s e c
(3) ボウル内壁 における遠心力	8 0 0 0 G
(4) ボウル危険速度	1 次 1 0 0 0 r p m 2 次 1 4 0 0 0 r p m
(5) 軸受許容温度	8 2 °C
2. 機器仕様	
(1) ボウル寸法	φ 4 0 0 × H 3 0 0 mm
(2) 回転軸径	φ 5 0 mm
(3) 材質	T i - 6 A l - 4 V
(4) 軸受緩衝体	バネ + オイルダンパ

表 2.2.2 試験条件 (その1)

## 給液リーク率試験 Run 205-1~8

Run No.	試験液	給液流量 ( $l/h$ )	回転数 (rpm)	給液時間 (min)	給液ノズル*1 の形状	給液ノズル*2 鉛直方向位置			
205-1	純水	100	6000	180	図 2.2.4 参照	ボウル下面より 25 mm			
205-2					図 2.2.5 参照				
205-3					図 2.2.6 参照				
205-4					図 2.2.7 参照				
205-5									ボウル下面より 90 mm
205-6								図 2.2.4 参照	ボウル下面より 155 mm
205-7									ボウル下面より 220 mm
205-8									

\*1 各ノズルの給液方向を図 2.2.8 に示す。

\*2 各ノズルの鉛直方向位置を図 2.2.9 に示す。

表2.2.3 試験条件(その2)

## 清澄性能試験 Run 201. 202

Run No.	模擬スラッジ	スラッジ濃度 (g/l)	給液流量 (l/h)	回転数 (rpm)	給液時間 (min)	推定最低 スラッジ量 (g)	分散媒	累積体積分布
201-1 202-1	アルミナ (1.5 : 2.2 $\mu\text{m}\phi$ = 2 : 1 wt%)	3.33	100	6000	360	2000	純水	Phoenix 模擬液 (図3.1.3)
201-2 202-2				5500				
201-3 202-3	アルミナ 平均公称粒径 0.4 $\mu\text{m}\phi$			6000				

表2.2.4 試験条件(その3)

## スラッジ洗浄試験 Run 201. 202

Run No.	正逆反転周期 (s/cycle)	回転数 (rpm)	洗浄水吐出圧力 (kgf·G/cm <sup>2</sup> )	洗浄水流速 (l/s)	スラッジ堆積量 (g)
201-1	一方向	30	15	0.48	2001
201-2					2062
201-3					1463
201-1					1998
202-2					1871
202-3					1524
					1524

表 2.2.5 清澄工程対象溶液の特徴

		実液条件	模擬液条件
処理量 (kg HM/day)		240	—
スラッジ量 (kg/day)		4	—
液中スラッジ濃度 (g/l)		3	3.33
分散媒	組成	U, Pu 硝酸溶液	純水 (20°C)
	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	$1.4 \times 10^3$	$1.0 \times 10^3$
	粘性 (Pa·s)	$1.7 \times 10^{-3}$	約 $1.0 \times 10^{-3}$
スラッジ	組成	Mo, Tc, Ru, Rh, Pd	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	$7 \times 10^3$	$3.99 \times 10^3$
	粒径 (μmφ)	約 1.5 (50wt%平均)	0.4 / 1.5 / 2.2 (公称平均)
K' 値 (= (ρ <sub>P</sub> - ρ <sub>L</sub> ) / η)		$3.3 \times 10^3$	約 $3 \times 10^3$

表 2.2.6 サンプルの量及び目的

サンプリングポイント	サンプル名称	サンプル量	分析項目	サンプリング目的
S-1	原液 (V-4)	200 ml	粒子濃度/粒度分布	原液調整結果 (粒子濃度, 及び粒子分析状態) の確認
S-2	供給液 (CCI-t)	200 ml	粒子濃度/粒度分布	捕集効率の検討, 及び清澄前後の粒度分布の変化, さらにこれらの経時変化, 又は運転条件の影響
S-3	清澄液 (CCO-t)	1~2 l	粒子濃度/粒度分布	
S-4	清澄液 (V-7)	1~2 l	粒子濃度/粒度分布	平均的捕集効率の算出, 粒度分布の代表サンプルとして使用
S-5	スラッジ (V-8)	1~2 l	粒子濃度	スラッジの減容率評価, 及びマスバランスの確認



表 2.3.1 給液リーク率

Run No.	給液ノズル*1 の形状	給液ノズル*2 鉛直方向位置	給液リーク率*3 (%)
205-1	図 2.2.4 参照	ボウル下面より 25 mm	0.23
205-2	図 2.2.5 参照		0.60
205-3			0.21
205-4			1.91
205-5	図 2.2.7 参照		37.5
205-6	図 2.2.4 参照	ボウル下面より 90 mm	0.05
205-7		ボウル下面より 155 mm	0.05
205-8		ボウル下面より 220 mm	0.05

\*1 各ノズルの給液方向を図 2.2.8 に示す。

\*2 各ノズルの鉛直方向位置を図 2.2.9 に示す。

\*3 給液リーク率 =  $\frac{3 \text{ 時間のリーク量}}{3 \text{ 時間の給液流量 (} = 306 \ell \text{)}} \times 100 (\%)$

表 2.3.2 洗浄濃度

Run No.	洗浄水濃度 (g/ℓ)
201-1	0.10
201-2	0.04
201-3	11.3
202-1	0.13
202-2	0.10
202-3	6.90

(スラッジ堆積量 1 kg 当たり 20 ℓ 洗浄水)

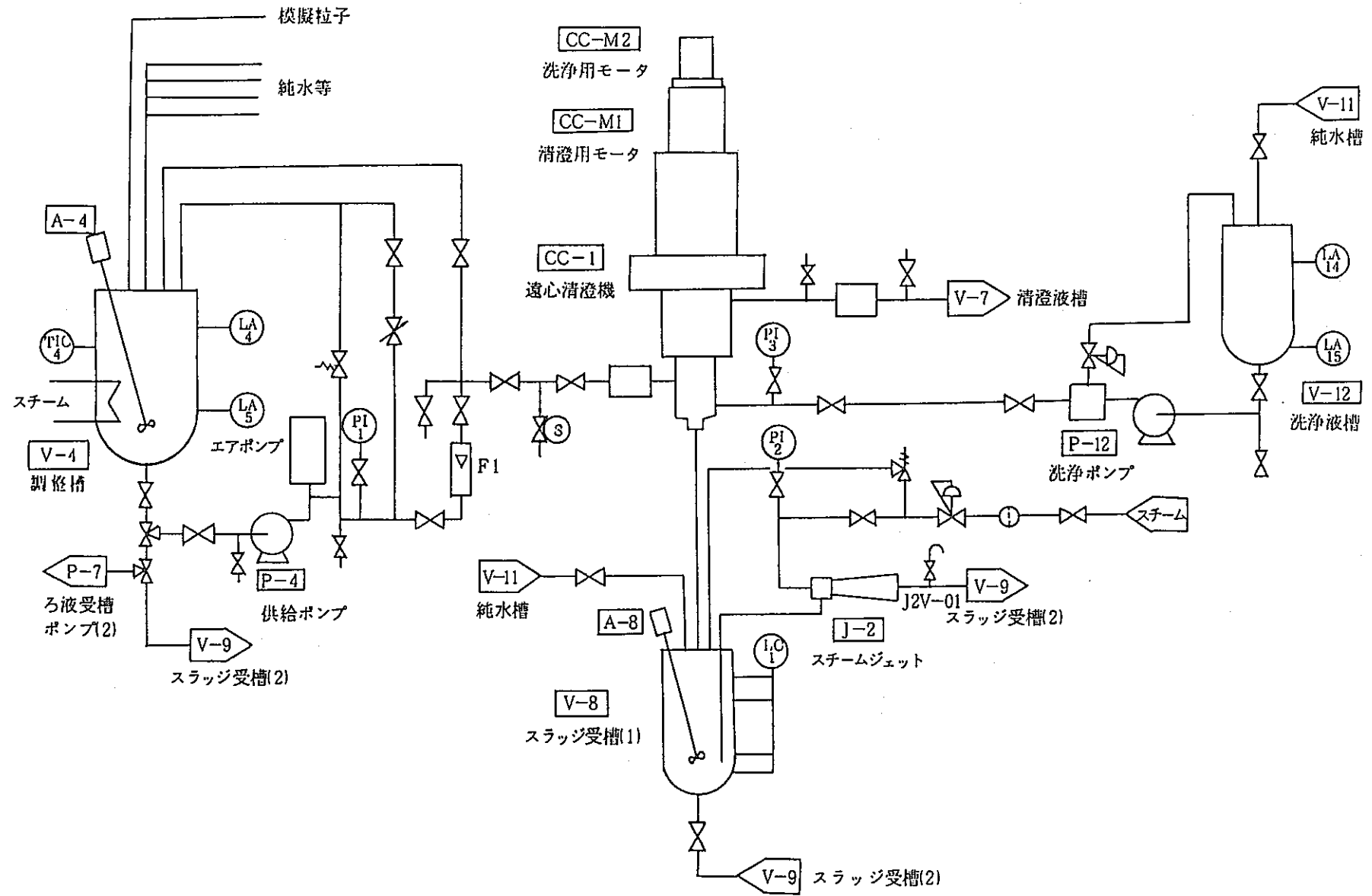


図 2. 2. 1 遠心清澄モックアップ装置フロー図 (高性能機)

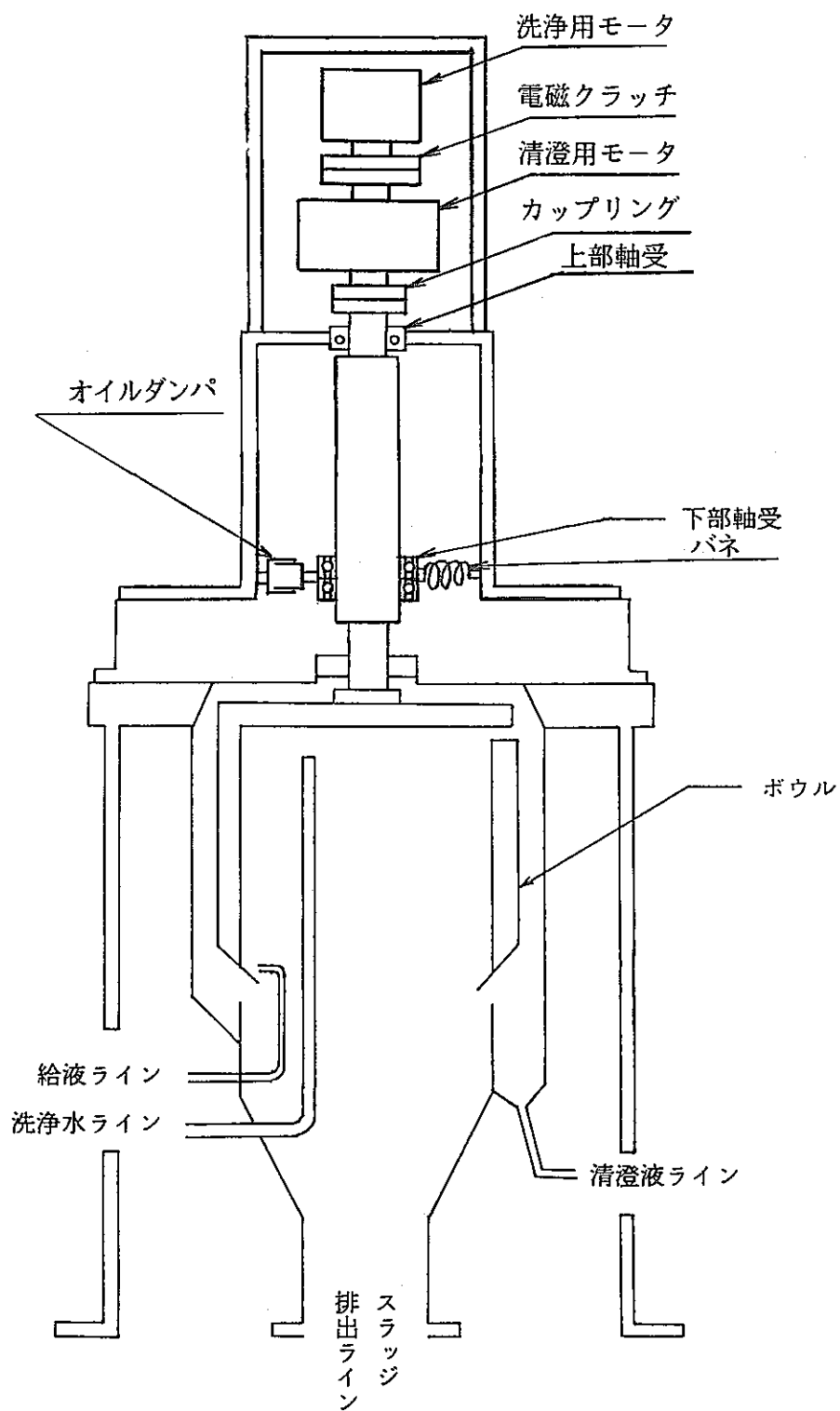


図 2.2.2 遠心清澄装置概略構造図

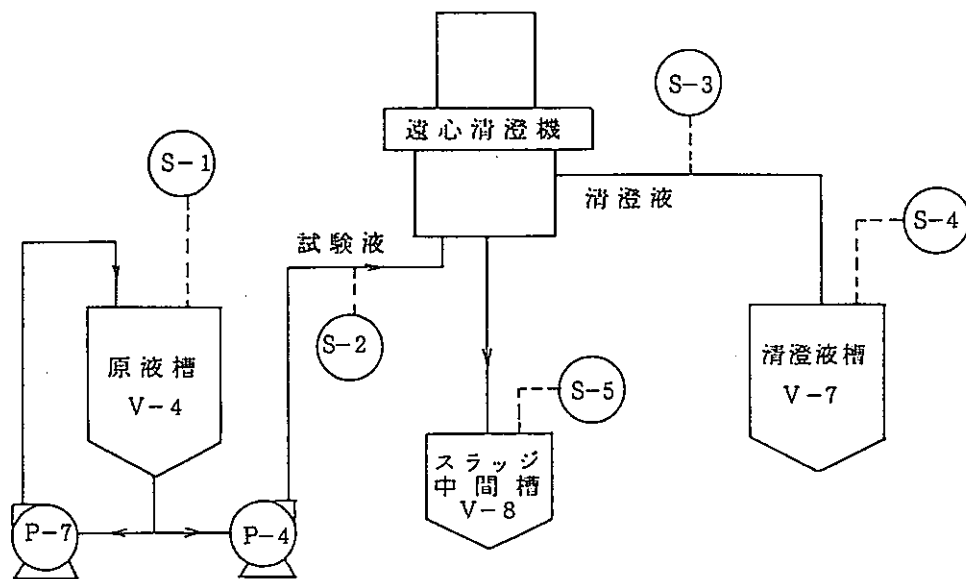


図 2. 2. 3 主なサンプリングポイント

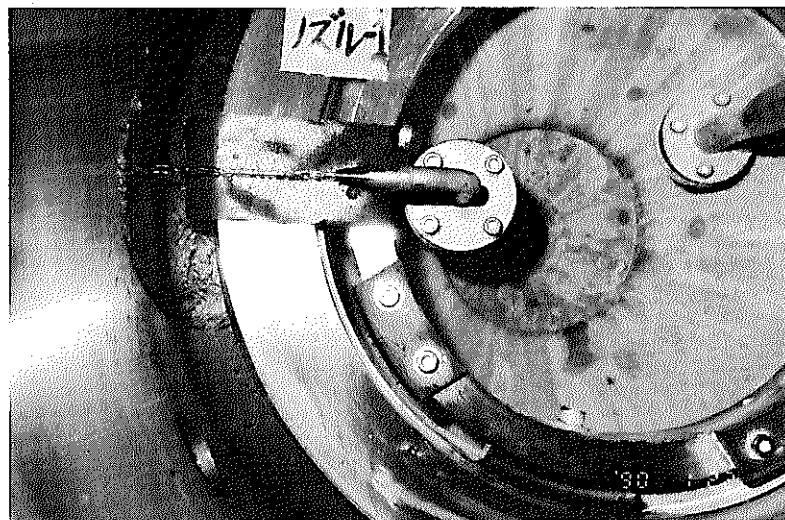
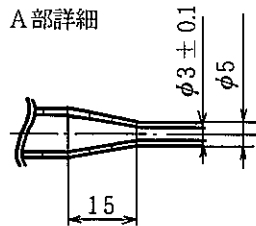
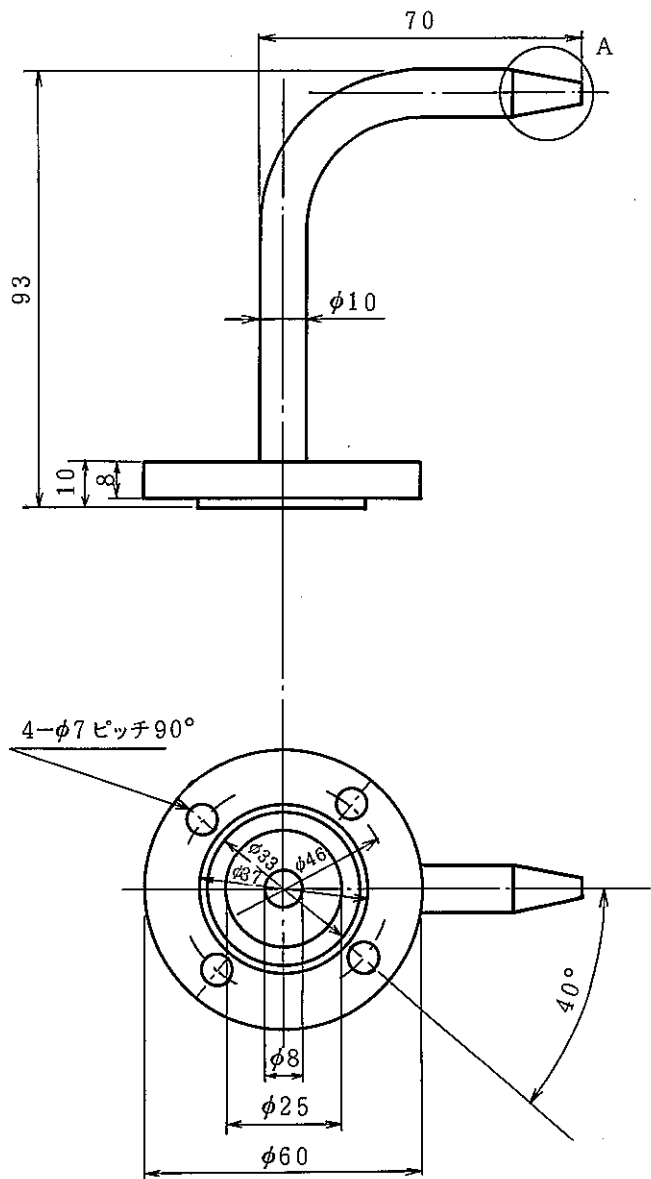


図 2.2.4 給液ノズル-1

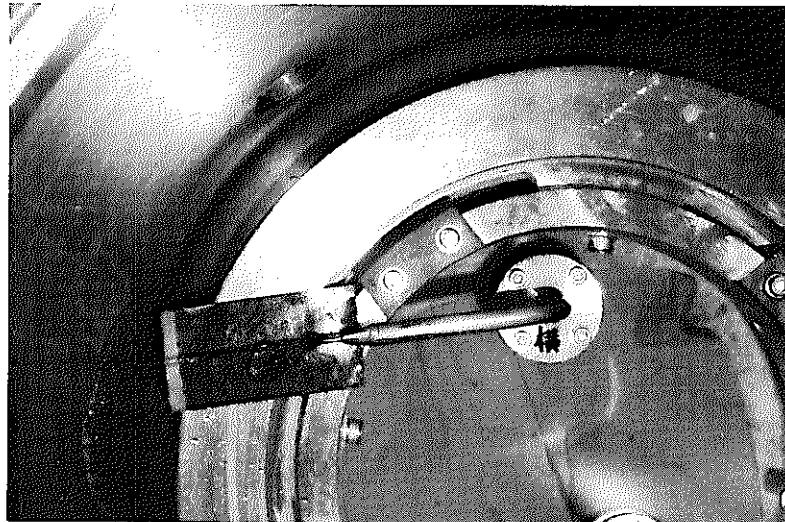
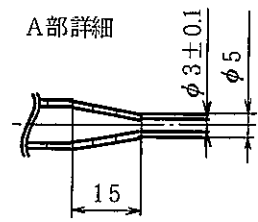
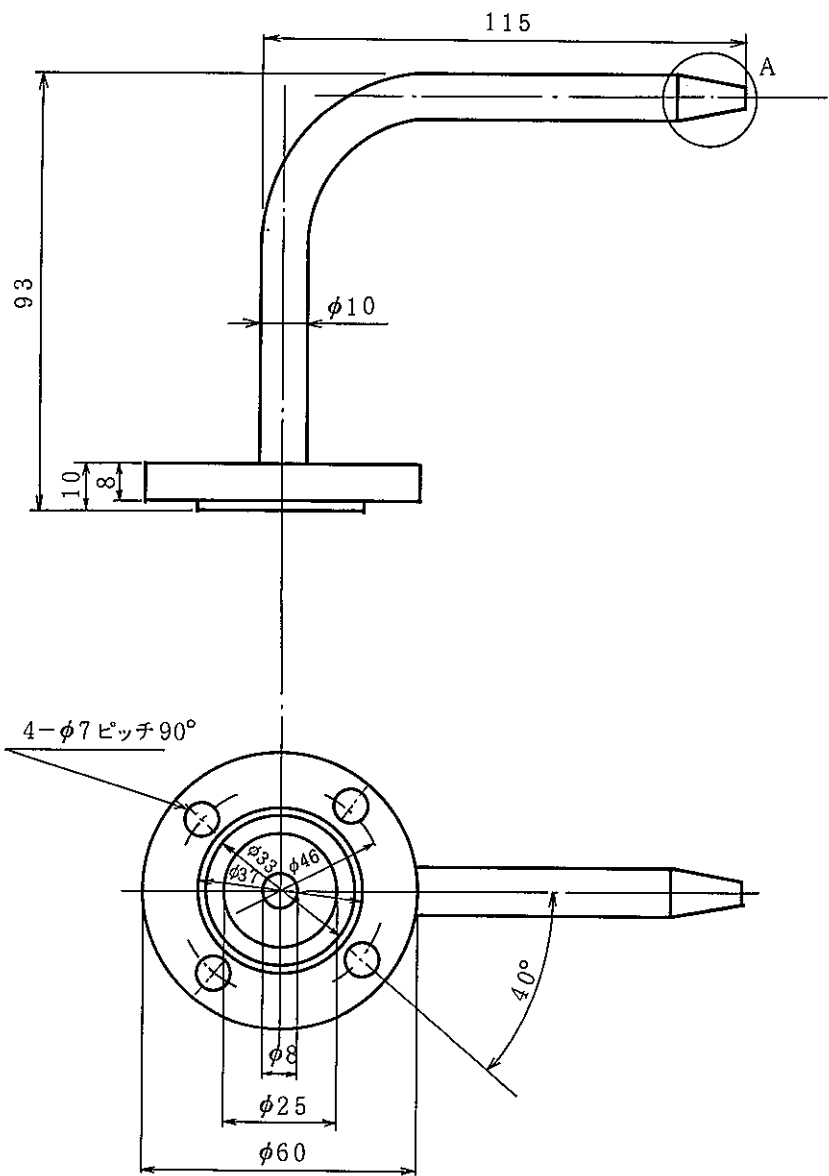


図 2.2.5 給液ノズル-2, 3

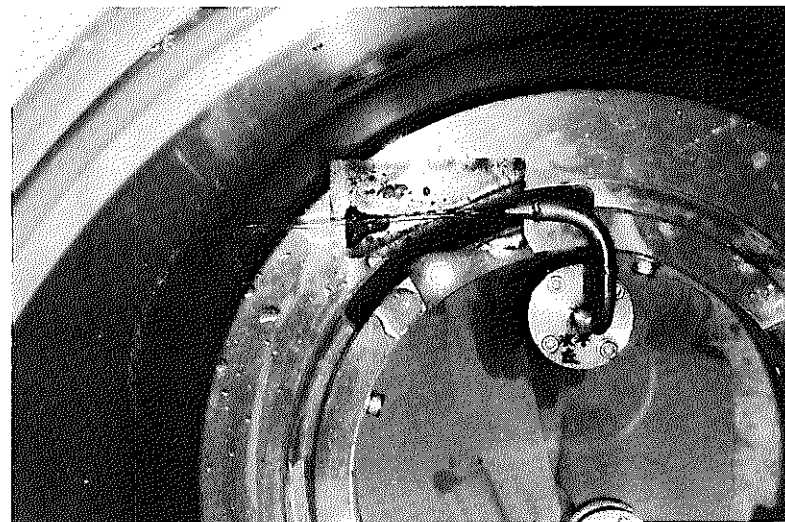
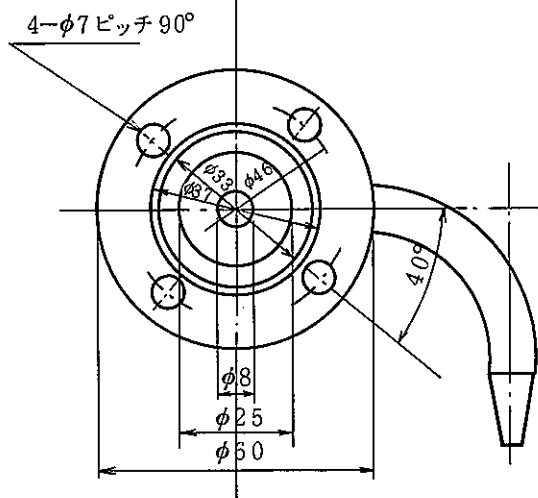
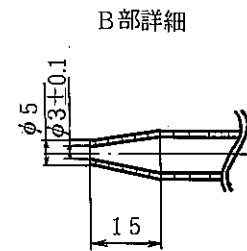
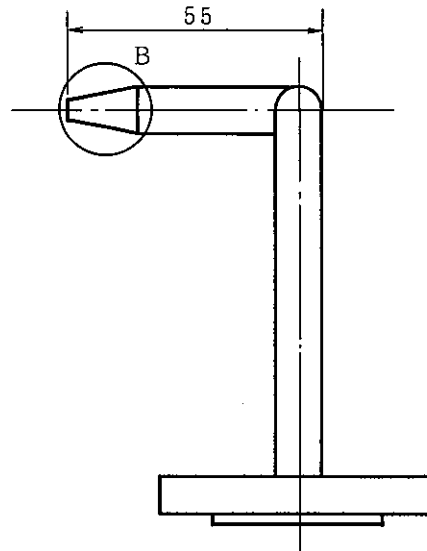
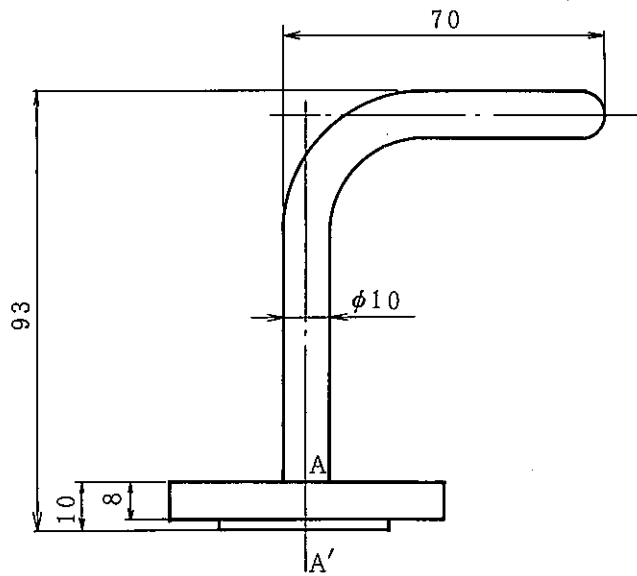


図 2. 2. 6 給液ノズル-4

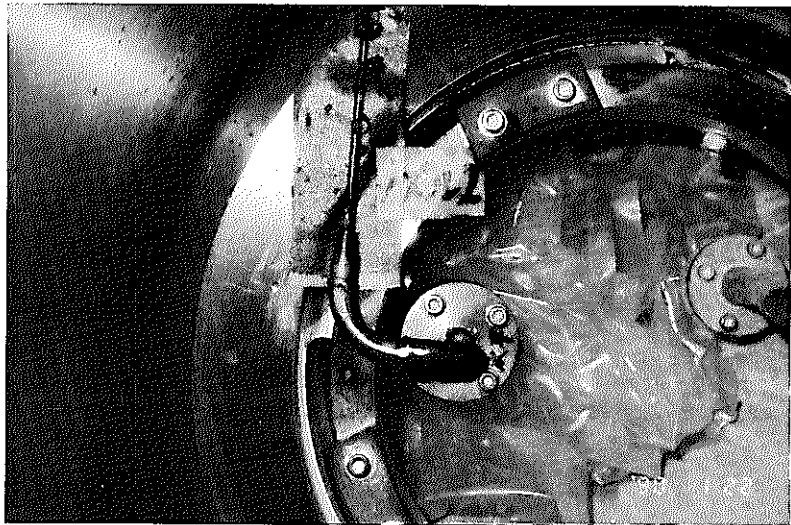
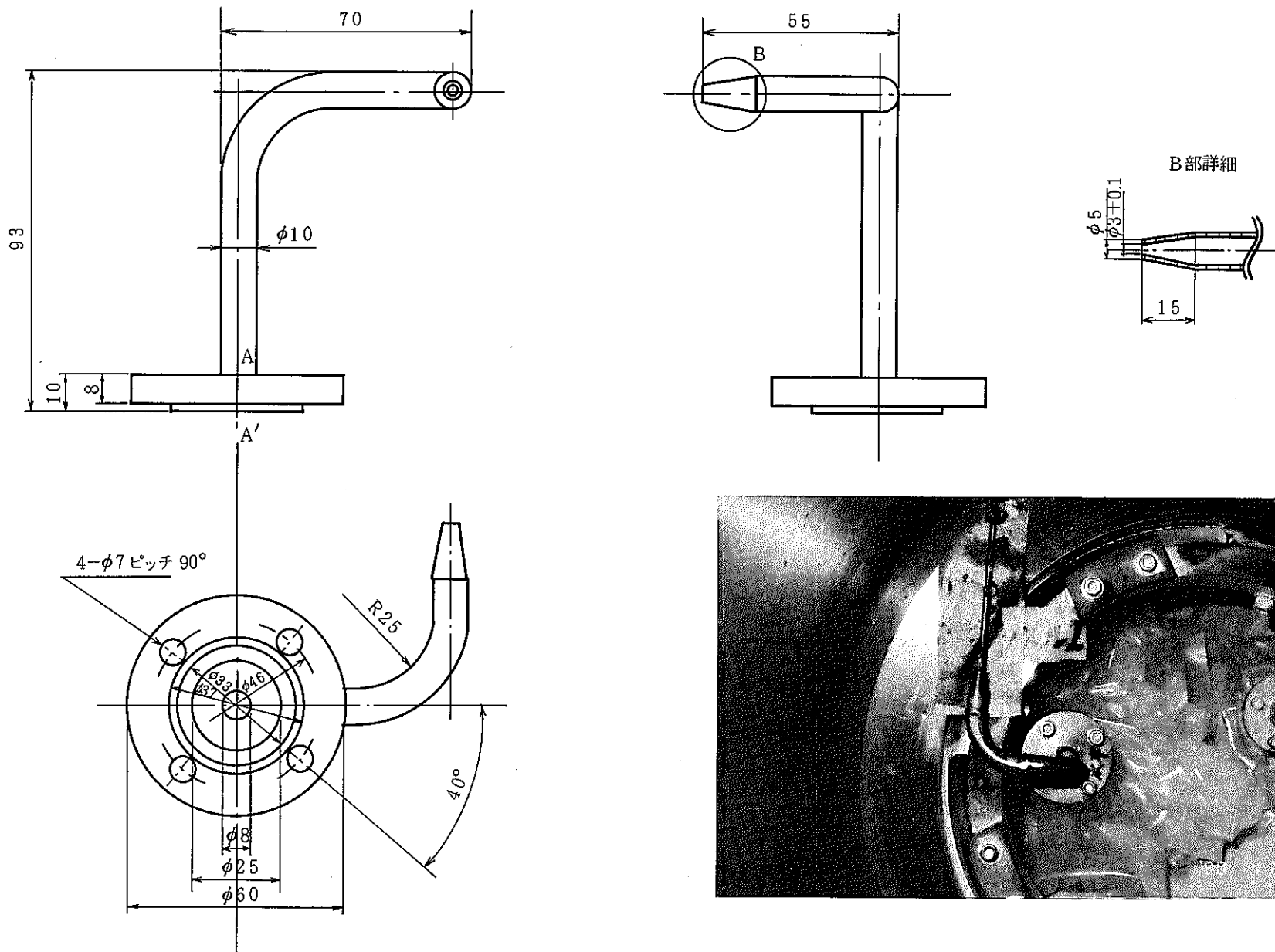


図 2. 2. 7 給液ノズル-5



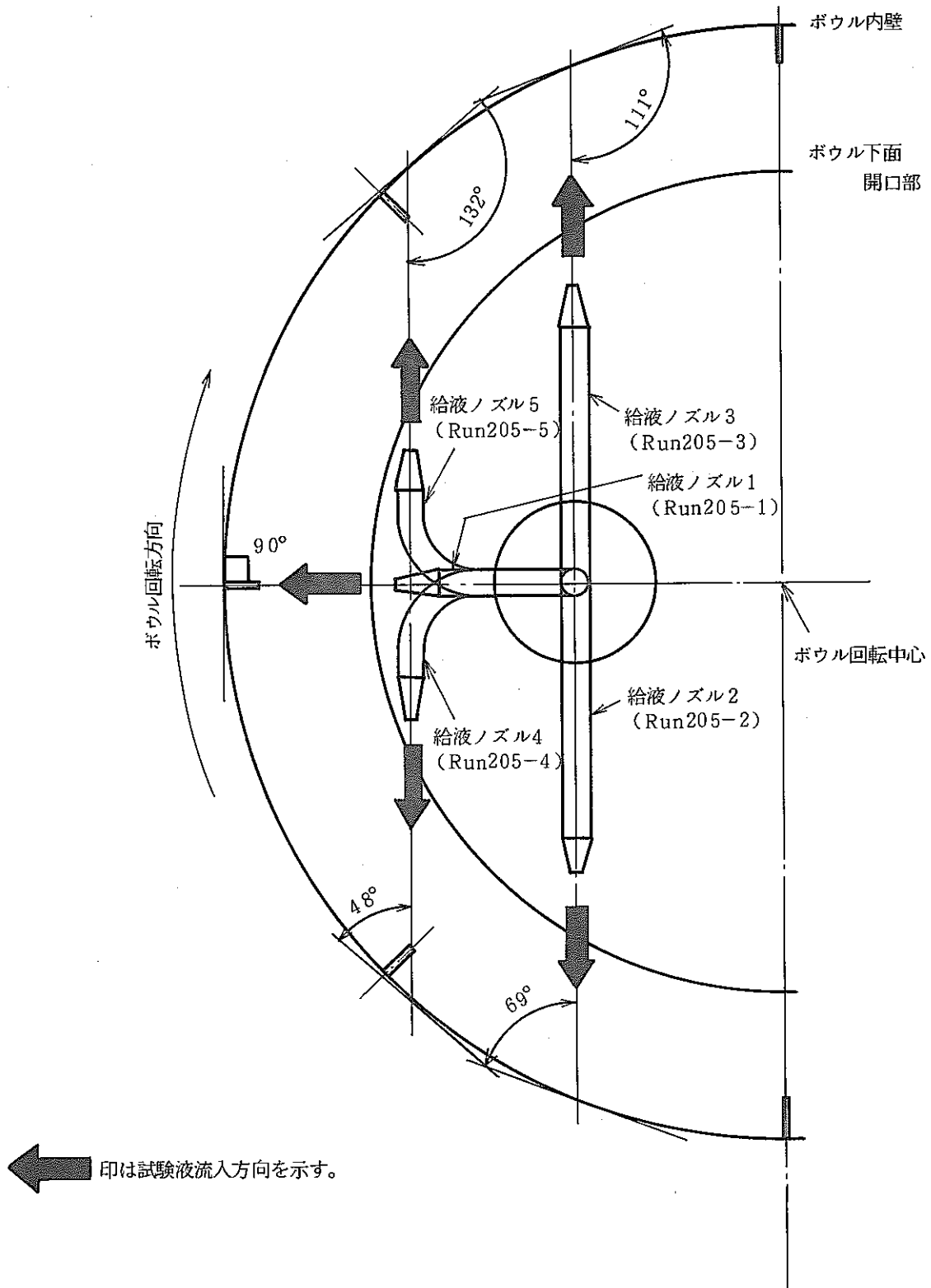


図 2. 2. 8 試験液流入方向

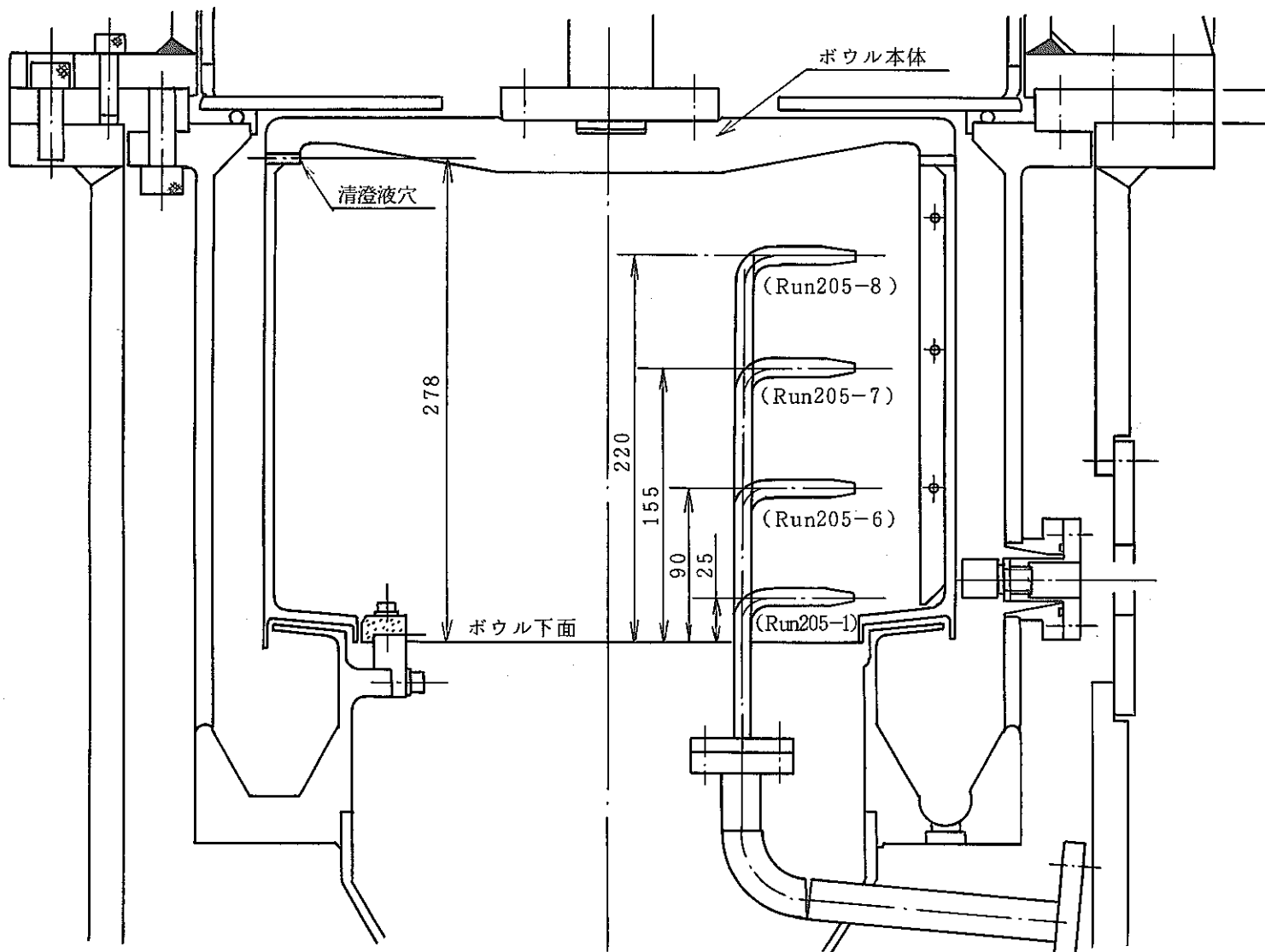


図 2. 2. 9 給液ノズル鉛直方向位置

ボール、軸振動幅とスラッジ堆積量  
(Run 201-1)

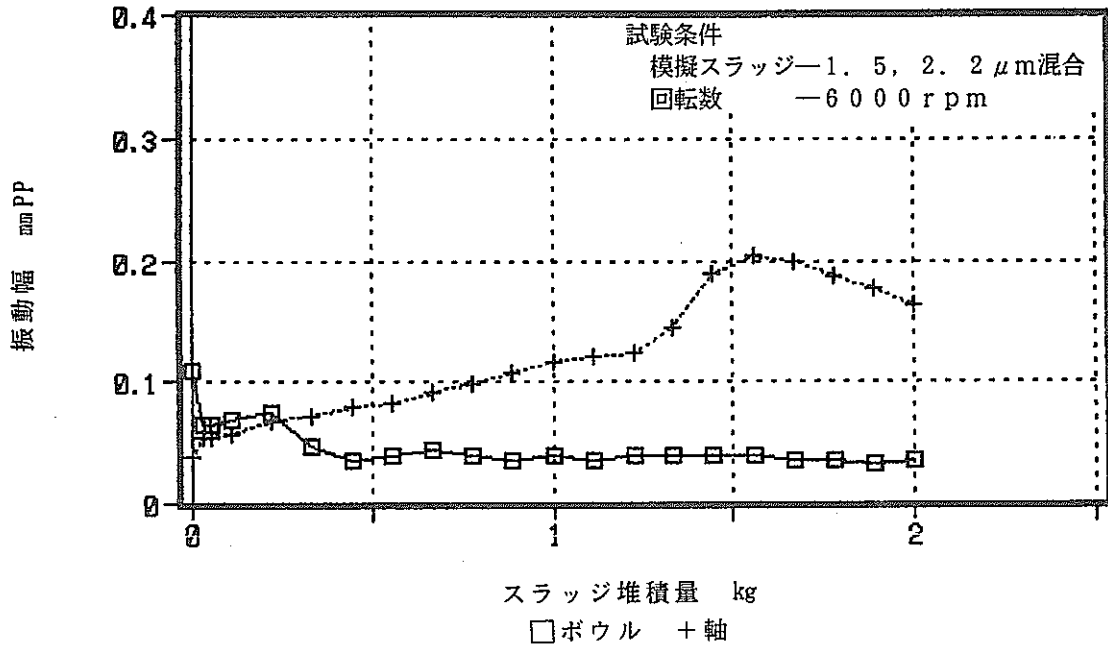


図 2.3.1 ボール・軸振動幅とスラッジ堆積量 (Run201-1)

ボール、軸振動幅とスラッジ堆積量  
(Run 201-2)

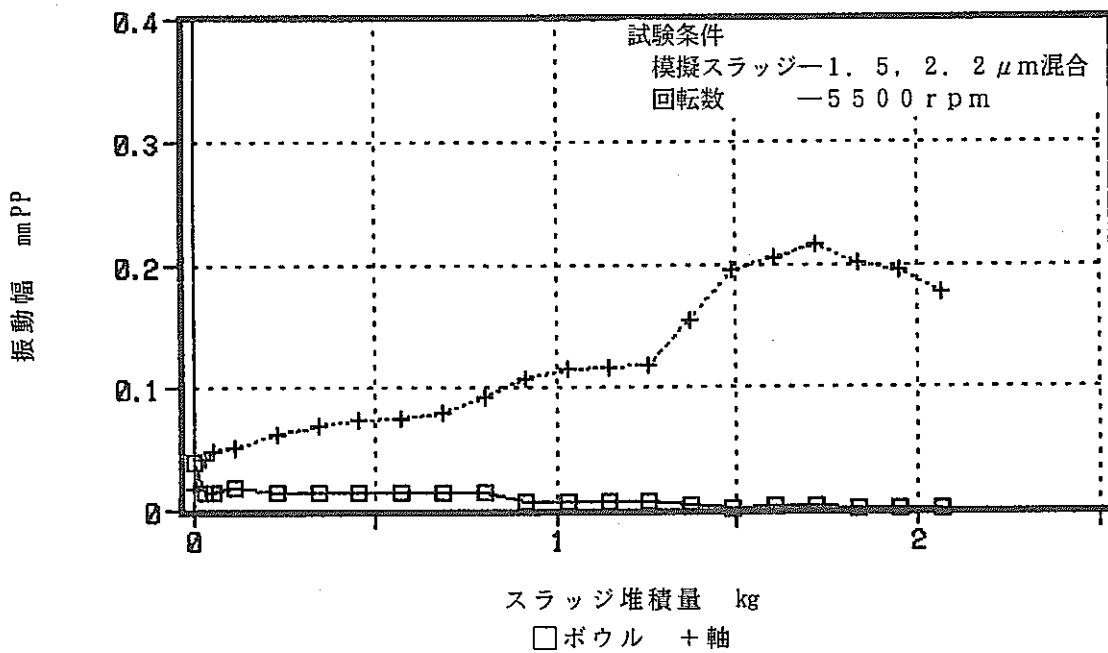


図 2.3.2 ボール・軸振動幅とスラッジ堆積量 (Run201-2)

ボール、軸振動幅とスラッジ堆積量  
(Run 201-3)

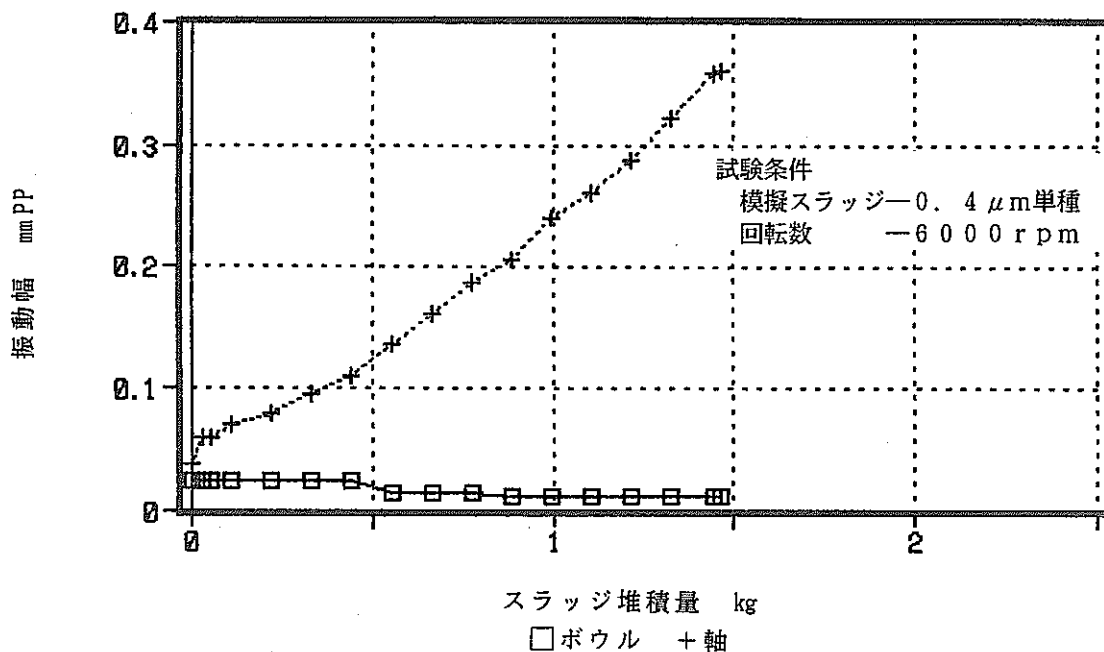


図 2.3.3 ボール・軸振動幅とスラッジ堆積量 (Run201-3)

ボール、軸振動幅とスラッジ堆積量  
(Run 202-1)

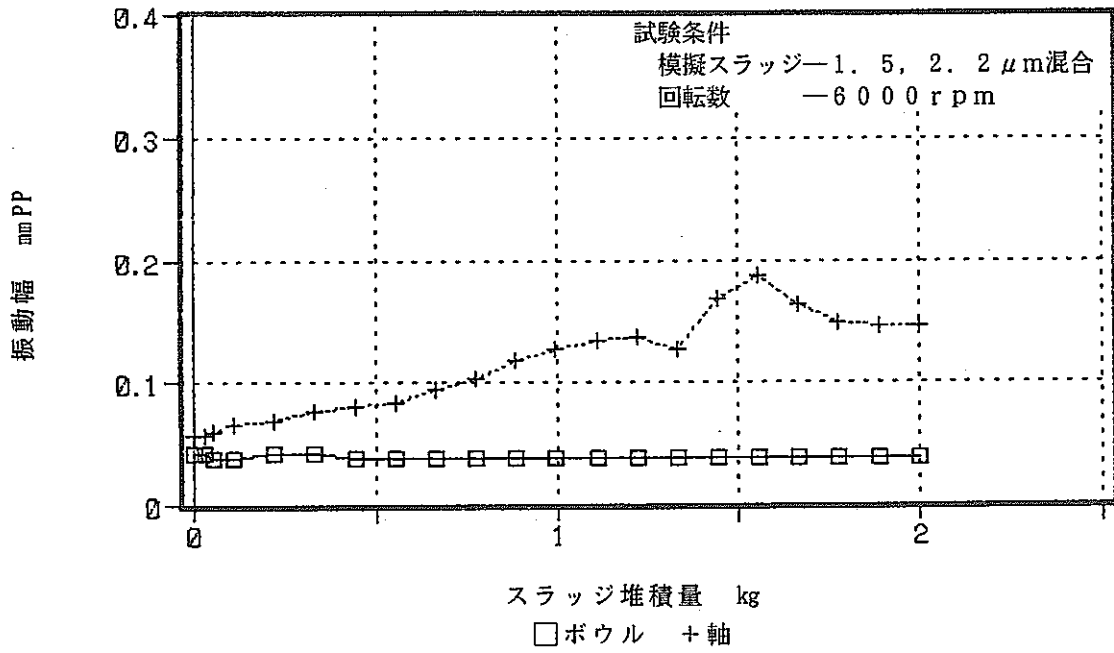


図 2.3.4 ボール・軸振動幅とスラッジ堆積量 (Run202-1)

ボール、軸振動幅とスラッジ堆積量  
(Run 202-2)

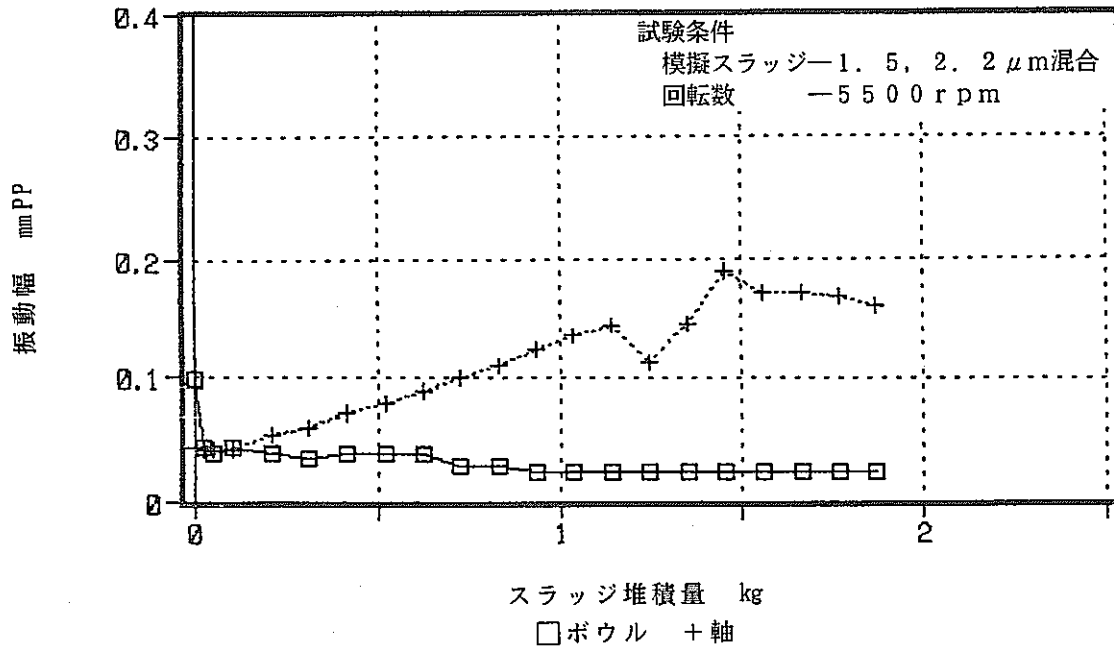


図 2.3.5 ボール・軸振動幅とスラッジ堆積量 (Run202-2)

ボウル、軸振動幅とスラッジ堆積量  
(Run 202-3)

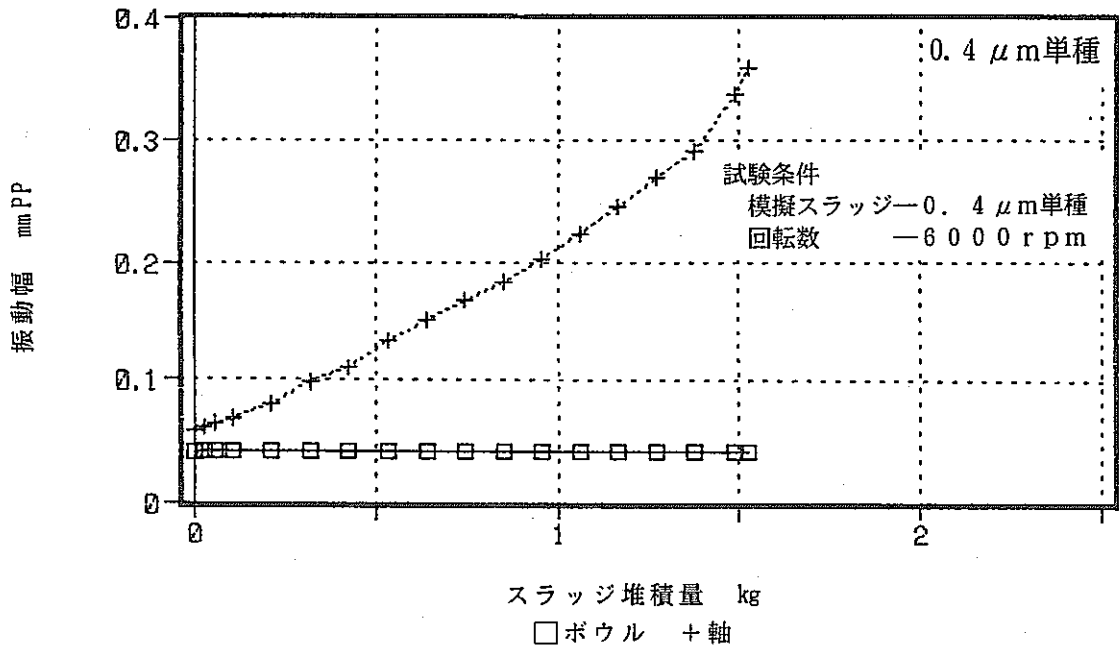
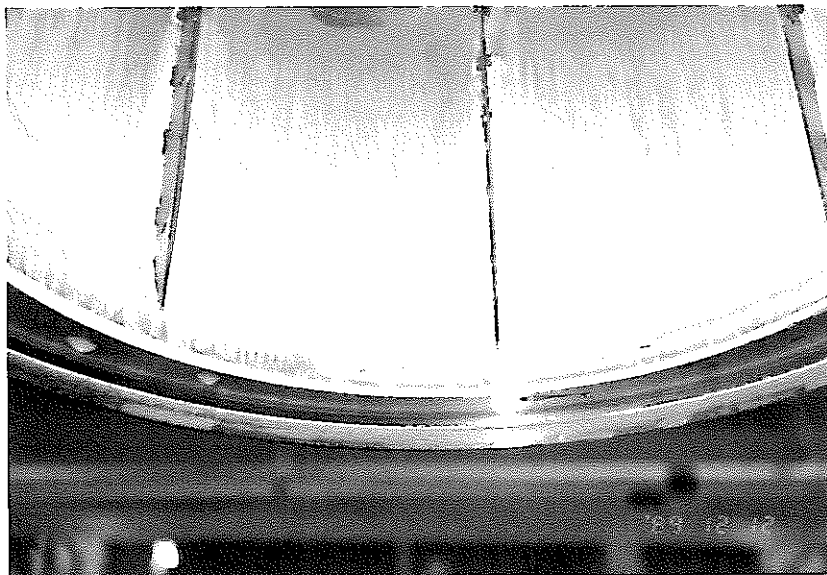
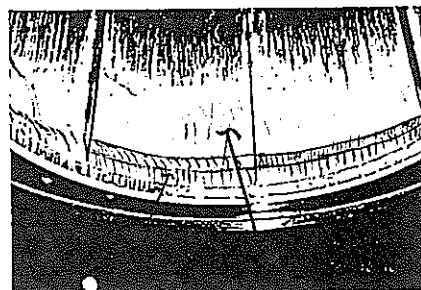


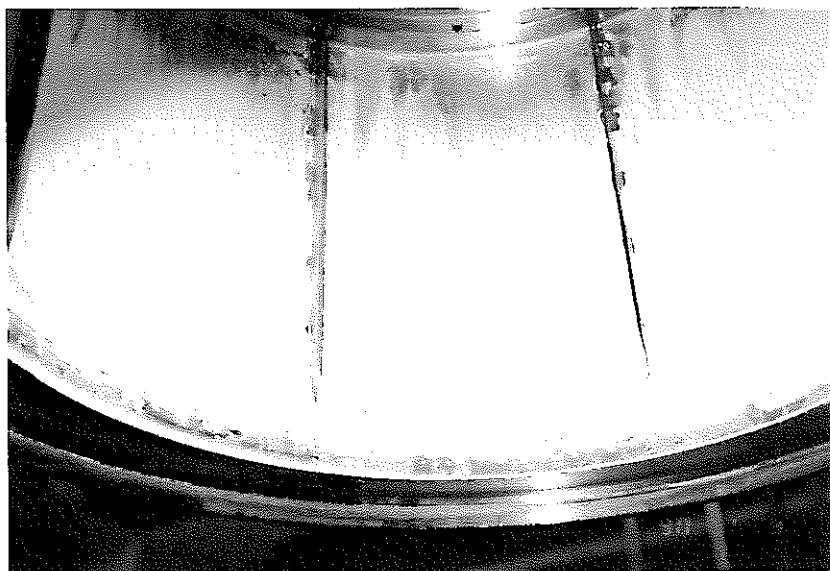
図 2.3.6 ボウル・軸振動幅とスラッジ堆積量 (Run202-3)



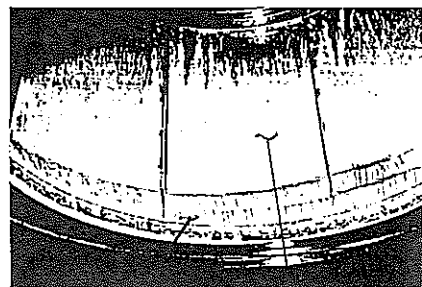
(1) Run202-1  
(1.5・2.2  $\mu$ m 混合)



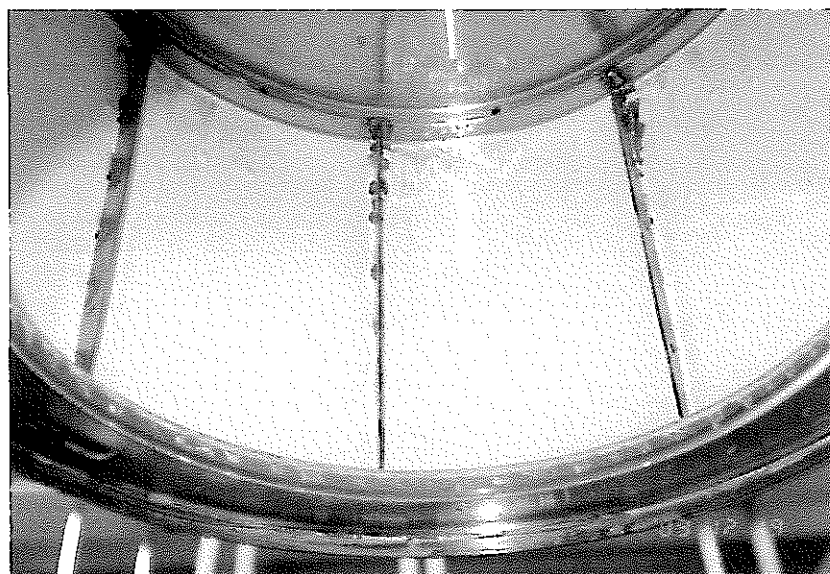
深さ20mmの  
スラッジ層      深さ3mmの薄い  
スラッジ層



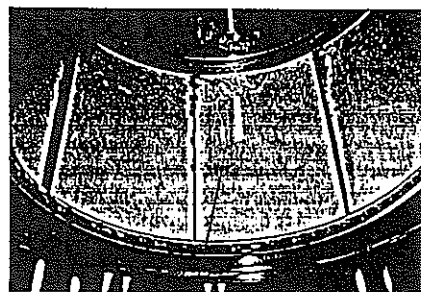
(2) Run202-2  
(1.5・2.2  $\mu$ m 混合)



深さ20mmの  
スラッジ層      深さ3mmの薄い  
スラッジ層



(3) Run202-3  
(0.4  $\mu$ m 単種)



深さ5mm程度の薄いスラッジ層  
が均一に拡がっている。

図 2.3.7 清澄運転後のスラッジ付着状況

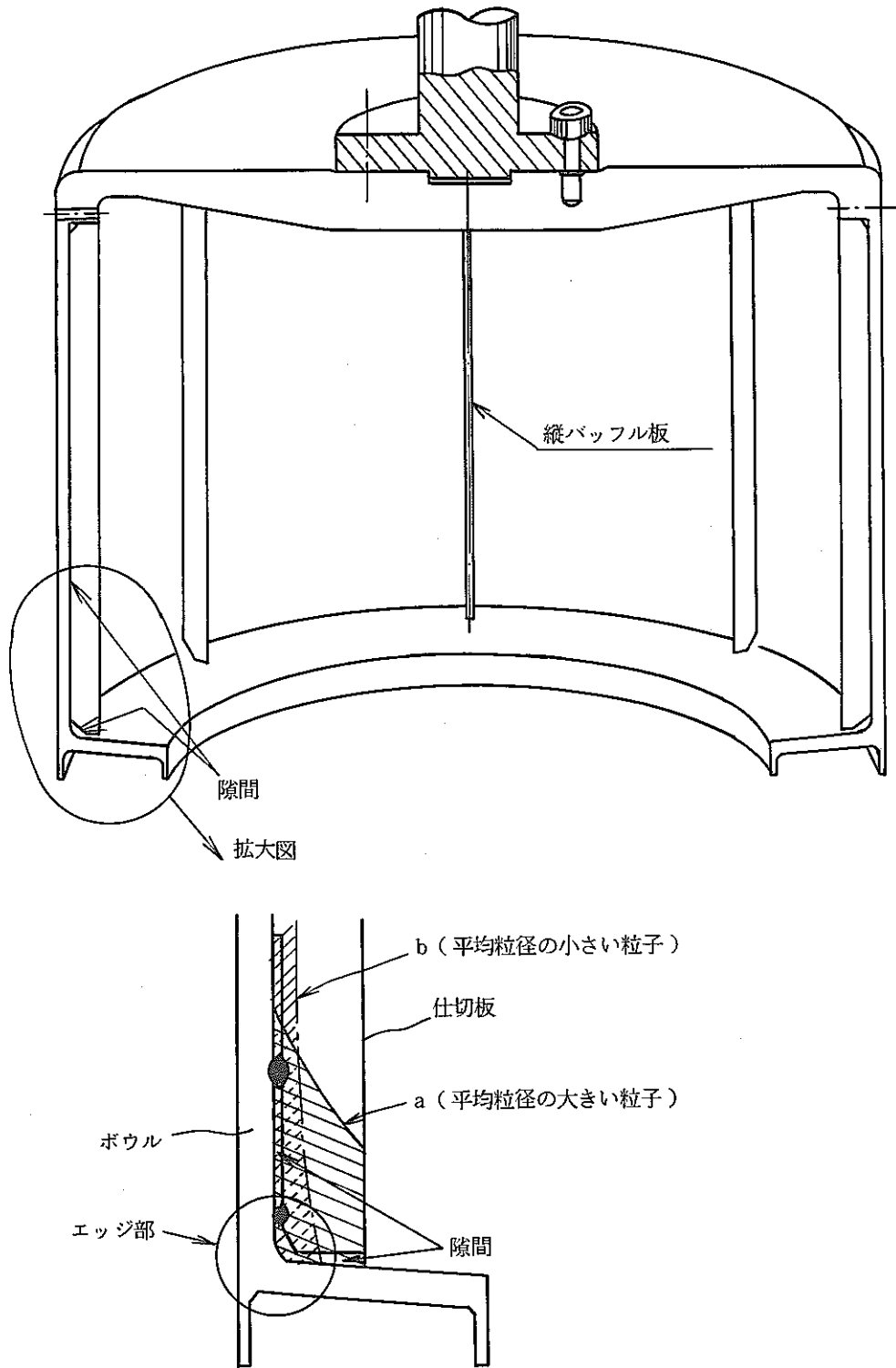


図 2.3.8 ボウル構造とスラッジ堆積状況



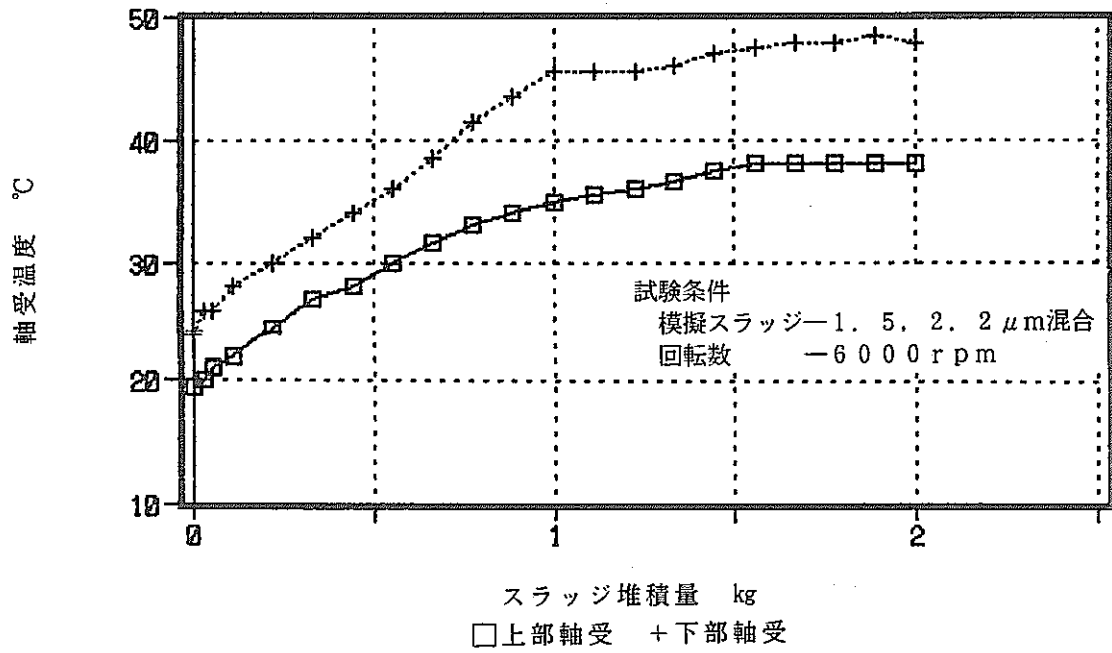


図 2.3.9 軸受温度とスラッジ堆積量 (Run201-1)

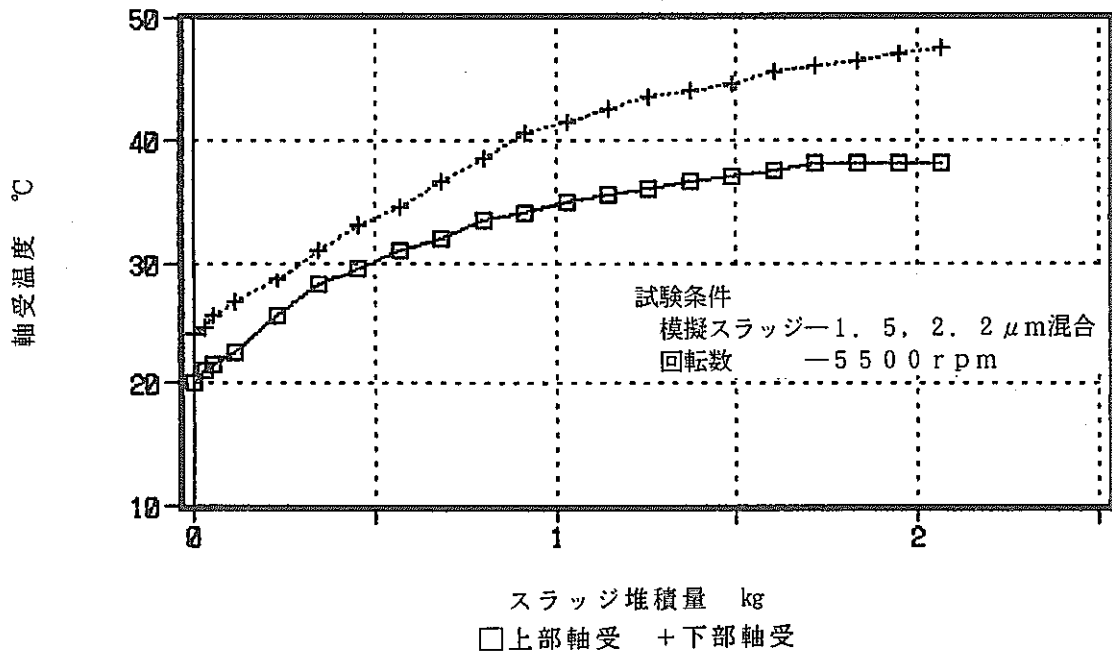


図 2.3.10 軸受温度とスラッジ堆積量 (Run201-2)

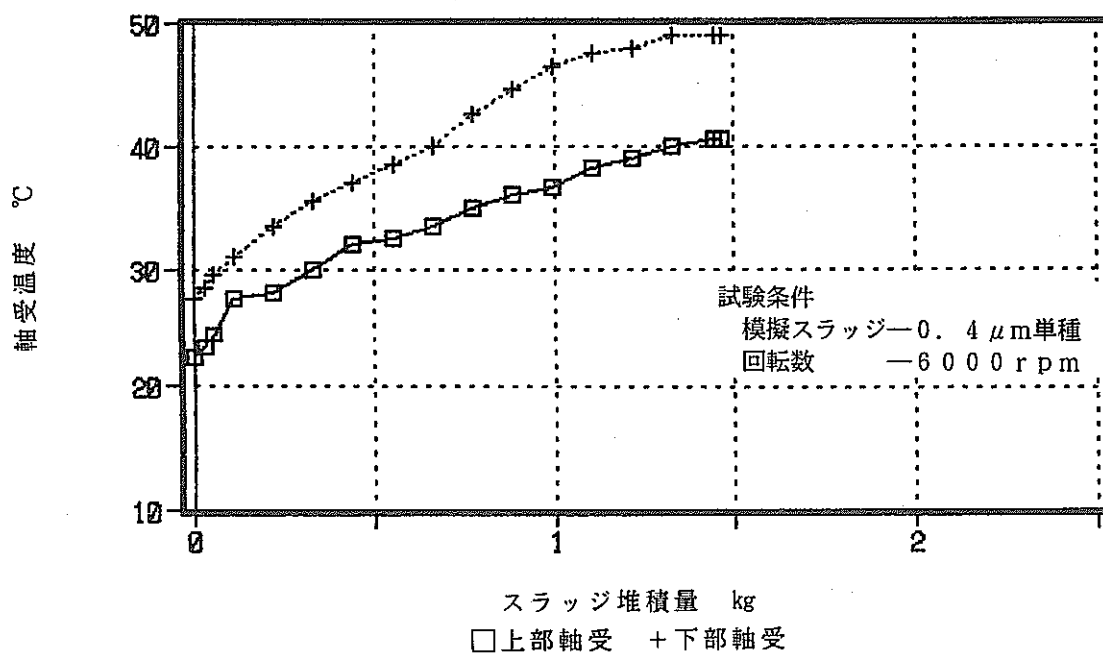


図 2.3.11 軸受温度とスラッジ堆積量 (Run201-3)

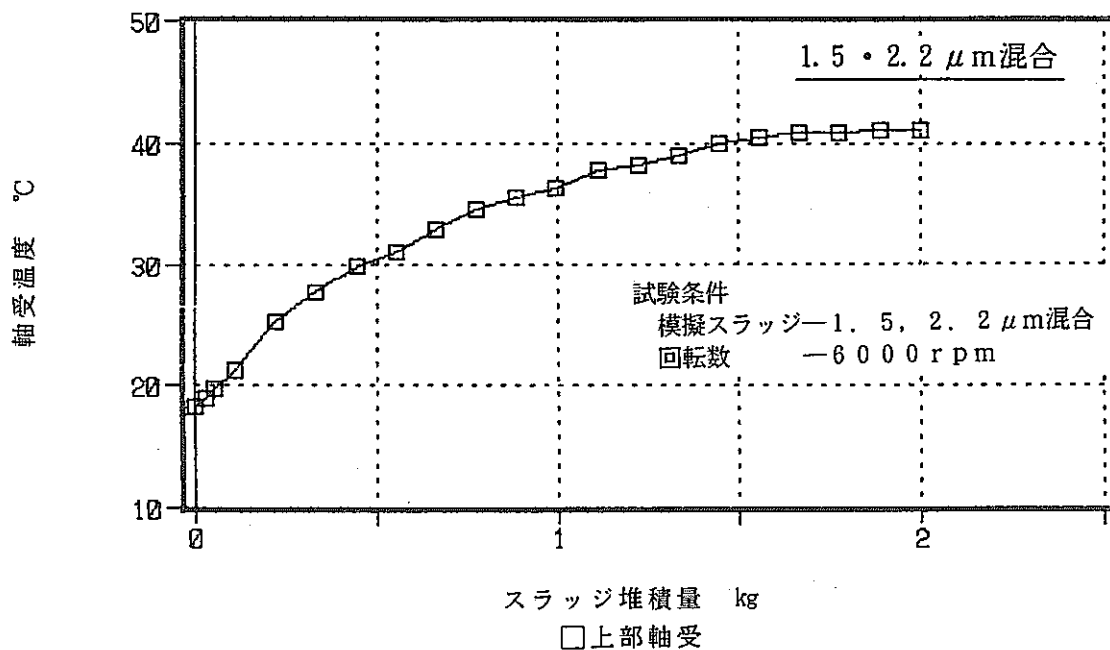


図 2.3.12 軸受温度とスラッジ堆積量 (Run202-1)

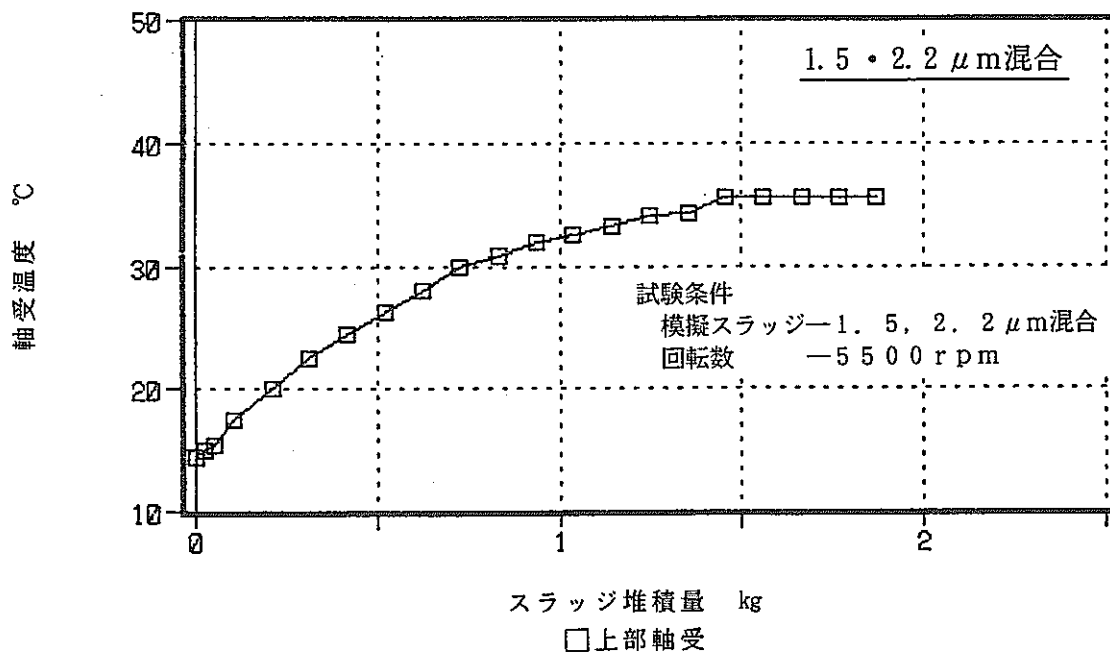


図 2.3.13 軸受温度とスラッジ堆積量 (Run202-2)

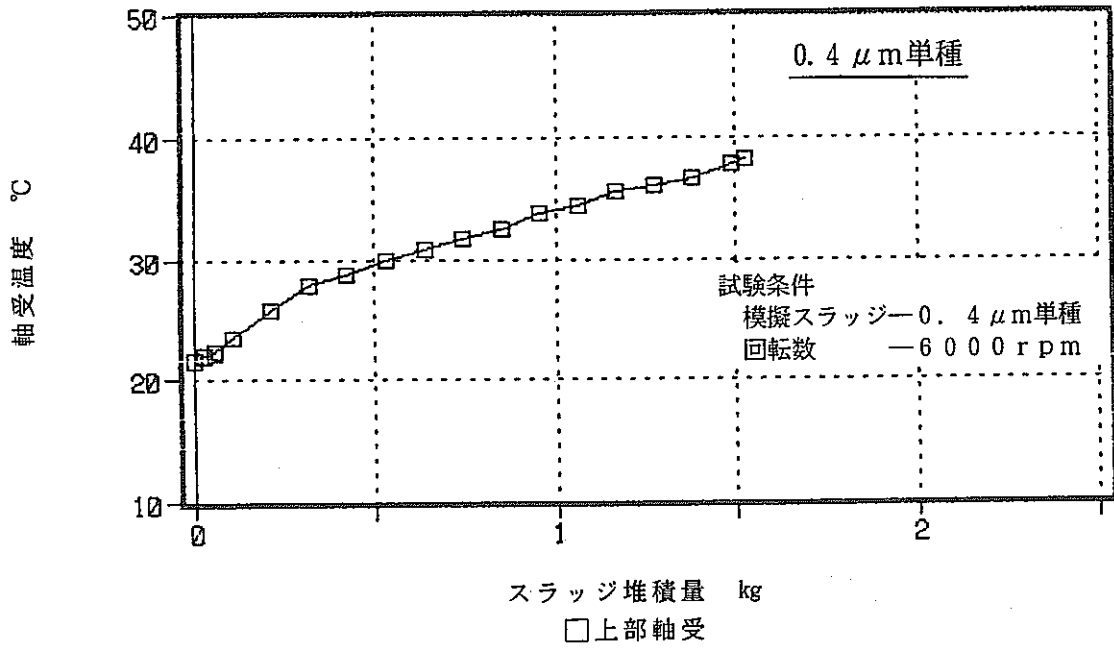


図 2.3.14 軸受温度とスラッジ堆積量 (Run202-3)

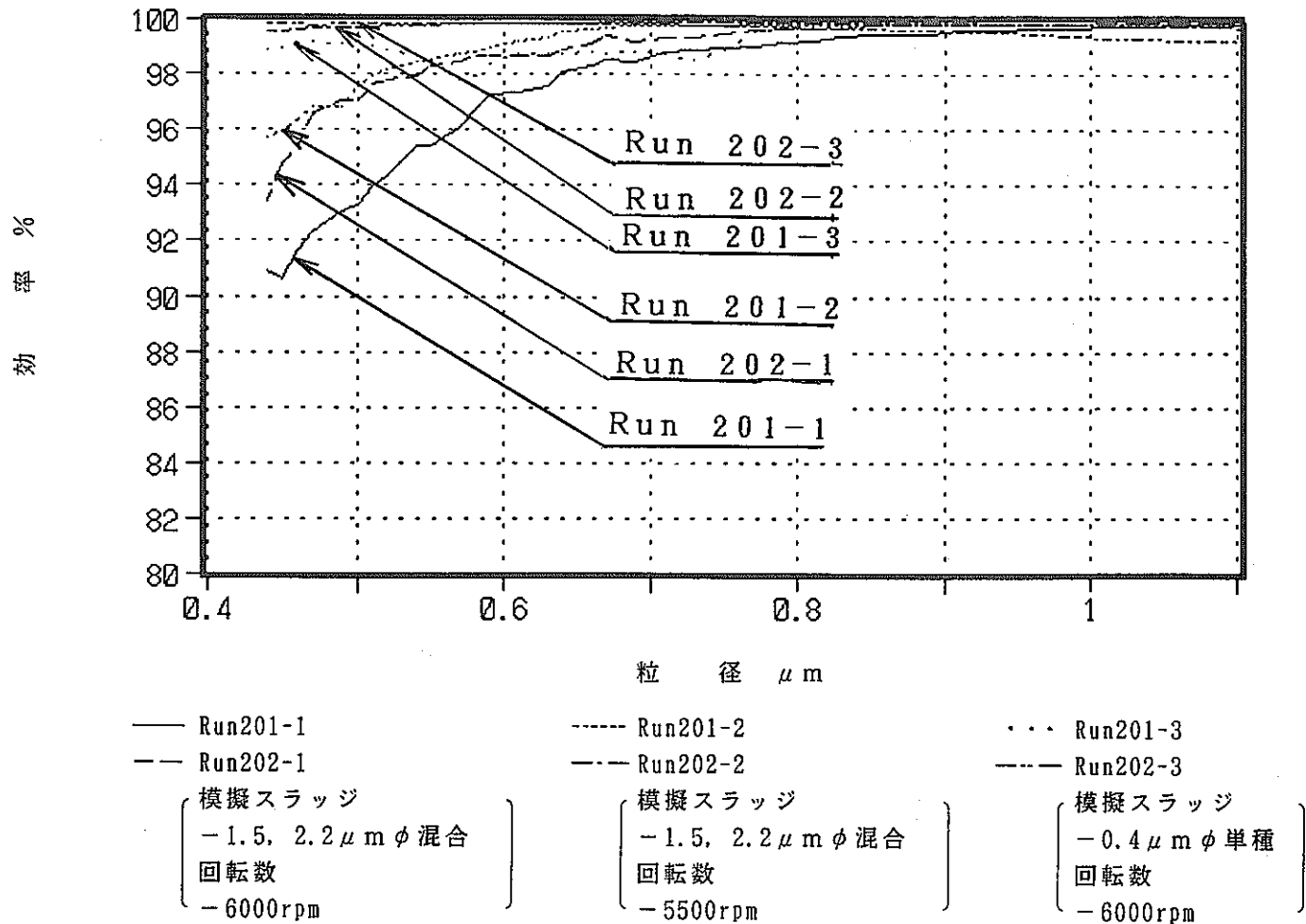
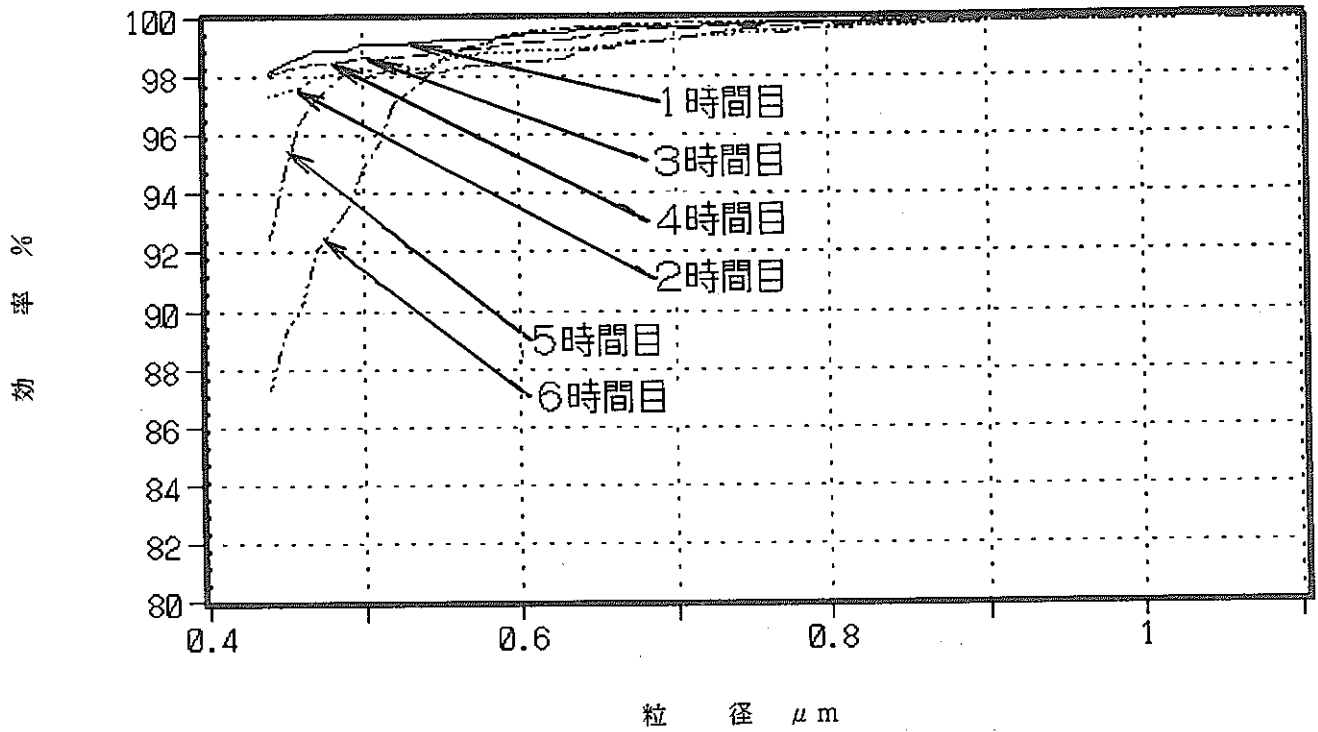
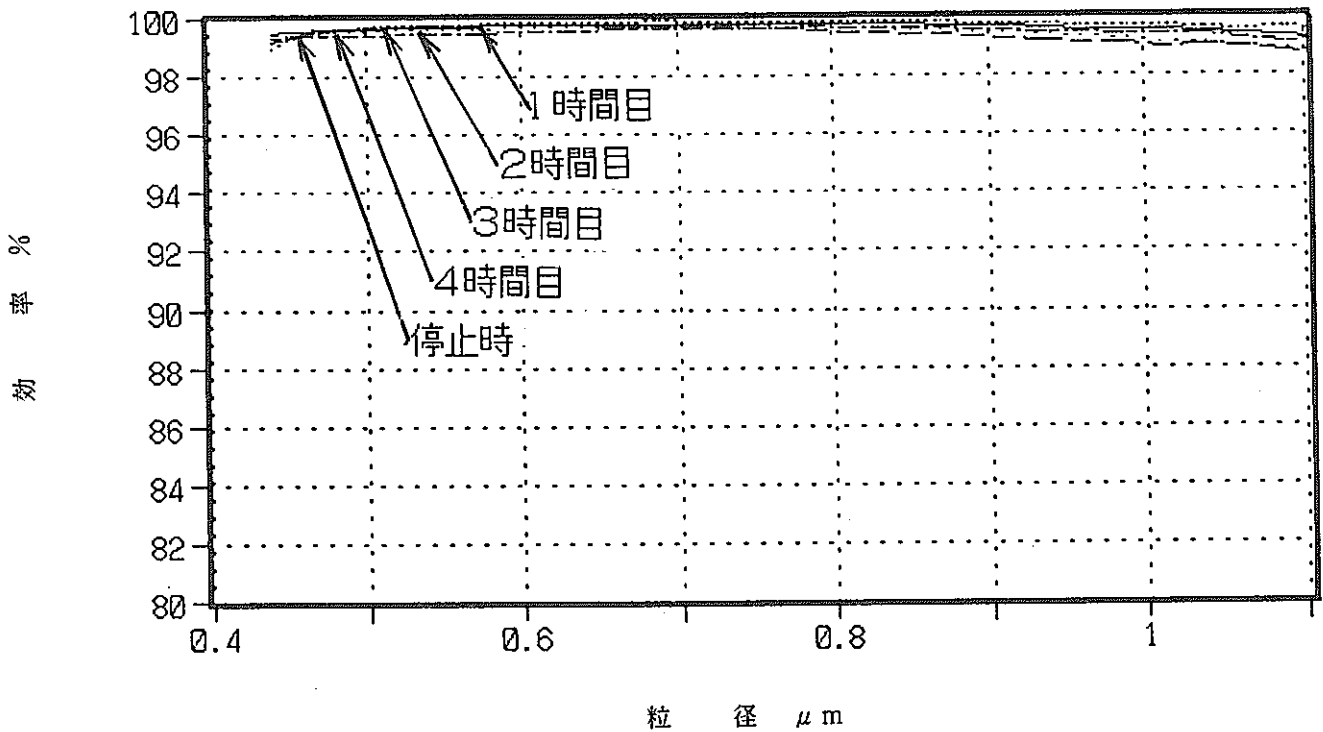


図 2.3.15 捕 集 効 率

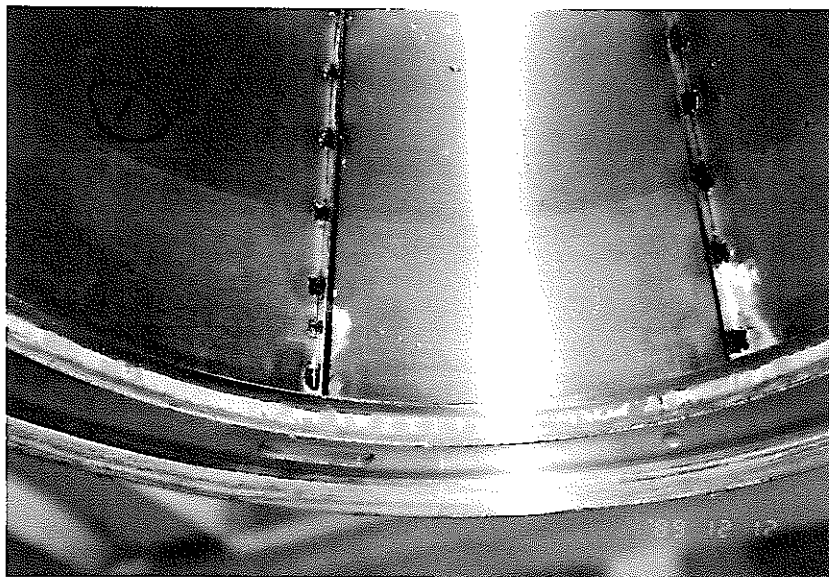


(1) スラッジ粒径の大きい条件 (1.5/2.2 μm φ 混合)

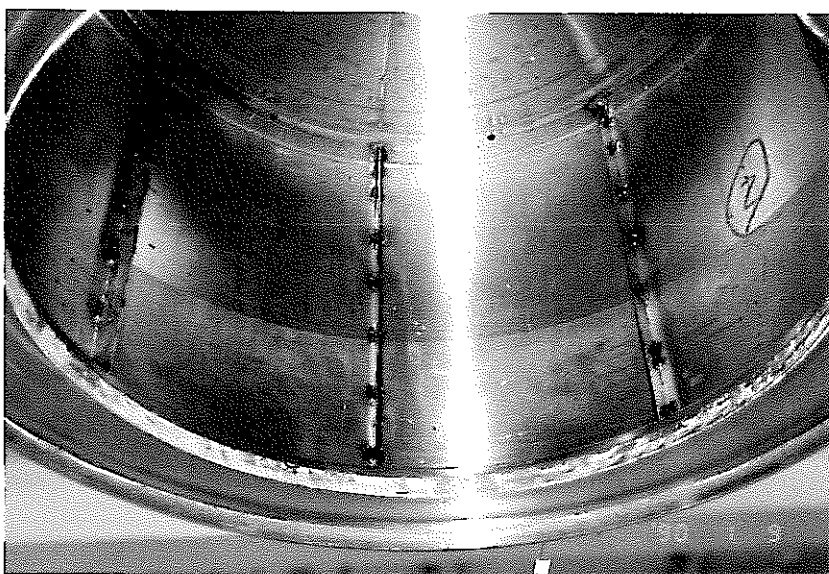


(2) スラッジ粒径の小さい条件 (0.4 μm φ 単種)

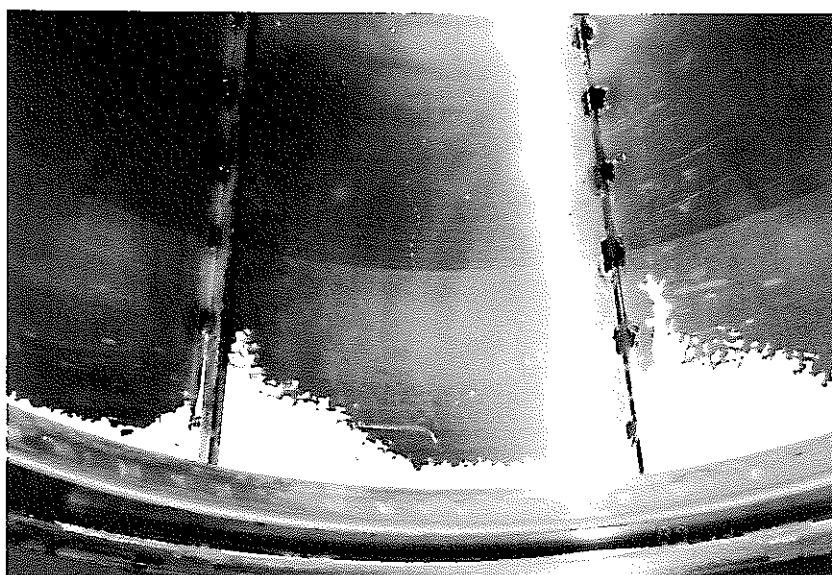
図 2.3.16 捕集効率 (時間変化)



(1) Run202-1  
(スラッジ粒径  
の大きい条件)



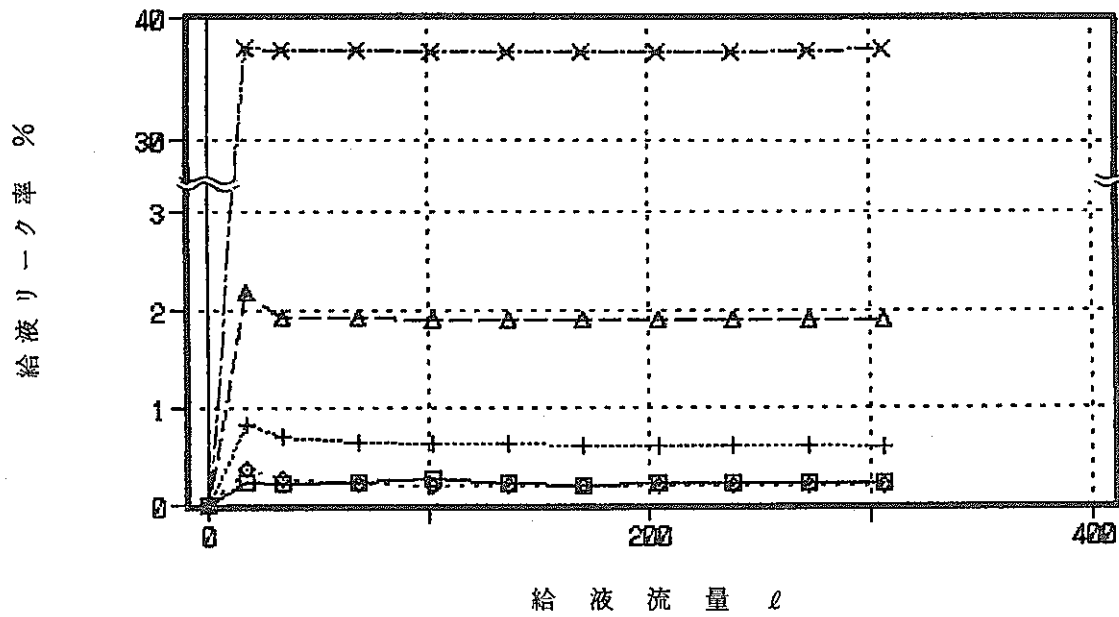
(2) Run202-2  
(スラッジ粒径  
の大きい条件)



(3) Run202-3  
(スラッジ粒径  
の小さい条件)

図 2. 3. 17 洗浄後のスラッジ付着状況

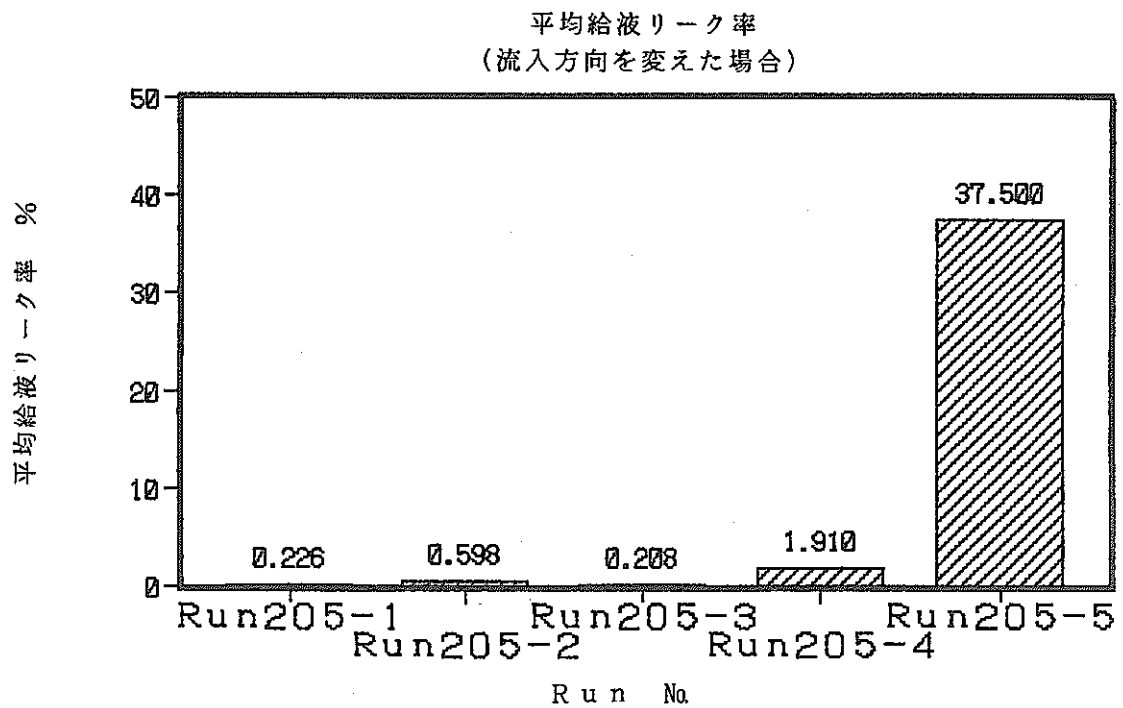
給液リーク率と給液流量  
(Run205)



図中記号	Run No.	給液ノズルNo	備考
□	Run 205-1	1	図2.2.8参照
+	Run 205-2	2	図2.2.8参照
◇	Run 205-3	3	図2.2.8参照
△	Run 205-4	4	図2.2.8参照
×	Run 205-5	5	図2.2.8参照

図 2.3.18 給液リーク率と給液流量

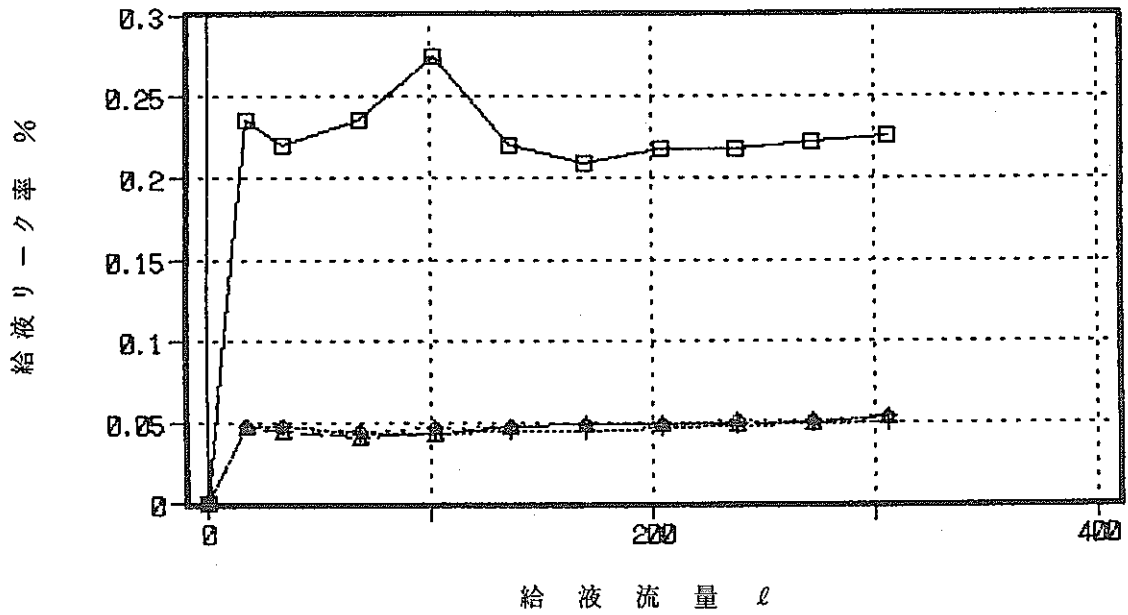




Run No.	給液ノズルNo	備考
Run205-1	1	図2.2.8参照
Run205-2	2	図2.2.8参照
Run205-3	3	図2.2.8参照
Run205-4	4	図2.2.8参照
Run205-5	5	図2.2.8参照

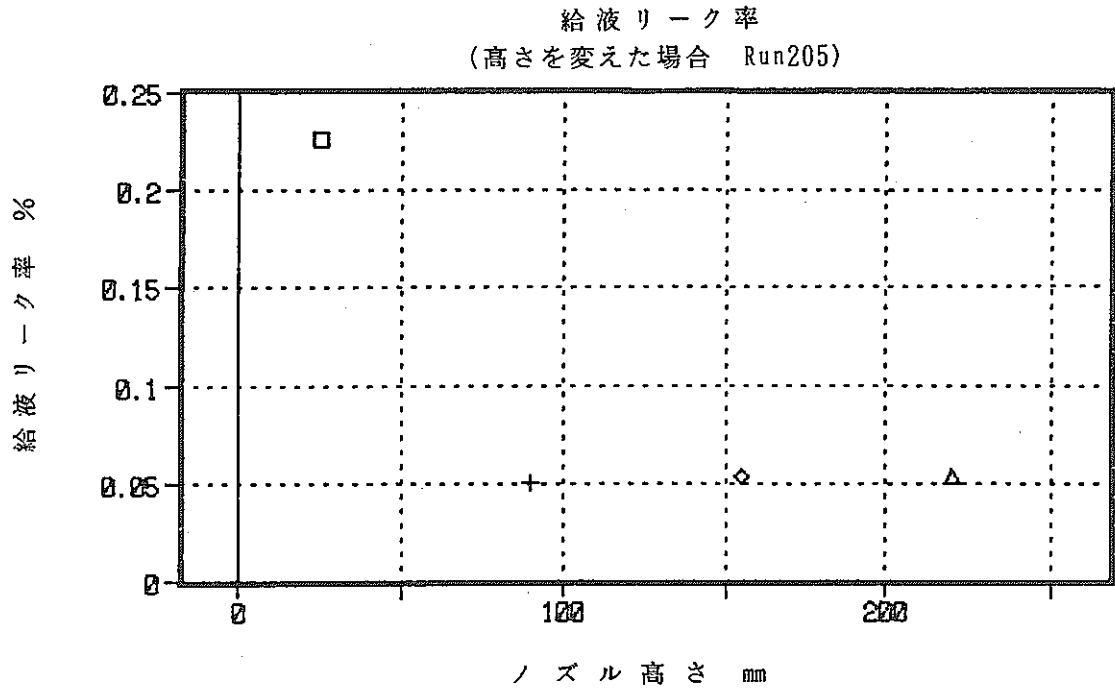
図 2.3.19 給液リーク率 (給液方向を変えた場合)

給液リーク率と給液流量



図中記号	Run No.	給液ノズル高さ	備考
□	Run 205-1	ポウル下面から25mm	図2.2.9参照
+	Run 205-6	ポウル下面から90mm	図2.2.9参照
◇	Run 205-7	ポウル下面から155mm	図2.2.9参照
△	Run 205-8	ポウル下面から220mm	図2.2.9参照

図 2.3.20 給液リーク率と給液流量



図中記号	Run No.	給液ノズル高さ	備考
□	Run205-1	ボウル下面から25mm	図2.2.9参照
+	Run205-6	ボウル下面から90mm	図2.2.9参照
◇	Run205-7	ボウル下面から155mm	図2.2.9参照
△	Run205-8	ボウル下面から220mm	図2.2.9参照

図 2.3.21 給液リーク率 (給液高さを変えた場合)

### 3. サブクリティカル機と高性能機の性能比較

#### 3.1 サブクリティカル機の評価

##### 3.1.1 開発経緯

高速炉燃料再処理施設の清澄工程機器として、遠心清澄装置の開発を実施してきた。昭和59～63年度に、サブクリティカル機（定格回転数3000rpm）を東海事業所 第2 応用試験棟に設置し、下記に示す各種の性能試験を実施した。

- ① 機械的性能試験
- ② 清澄性能試験
- ③ 二段組合せ性能試験
- ④ ドーンレイ型との比較試験
- ⑤ スラッジ洗浄試験

試験結果は参考文献5), 6), 7)参照。

##### 3.1.2 仕様

図3.1.1 にサブクリティカル機の場合の遠心清澄モックアップ装置フロー図を示す。表3.1.1 にサブクリティカル機の仕様、図3.1.2 に概略構造を示す。

##### 3.1.3 性能評価

項3.1.1 で示した試験項目の内、特に、遠心清澄機の機器として重要である性能（下記に示す項目）を総合的観点より評価する。

- ① 機械的性能
- ② 清澄性能
- ③ スラッジ洗浄
- ④ リンシング性能
- ⑤ 給液リーク率比較

##### (1) 機械的性能

試験条件を表3.1.2 に示し、以下に試験結果を示す。

##### 1) ボウル振動

スラッジ堆積量の増加に伴うボウル振動幅の変化を図3.1.4 に示す。

スラッジ堆積量の増加とともにボウル振動幅は増加傾向にあるが、標準運転条件下では、運転基準値（ボウル振動幅 0.6mm<sup>p-p</sup>）以下であり、運転上支障がない事が確認された。

2) 軸受温度

清澄運転時、軸受部に摩擦熱が生じ、軸受温度が上昇する。

本サブクリティカル機の場合、エア吹き付けによる空冷効果により、軸受が冷却され、標準運転条件（定格回転数3000rpm, 給液流量100ℓ/hr×6hr/day）で、上部軸受温度24℃, 下部軸受温度36℃となる。この値は、軸受許容温度（グリス劣化温度に左右される）82℃と比較しても、運転上問題のある値ではない。

(2) 清澄性能

試験条件を表3.1.3, 試験結果（捕集効率）を図3.1.5に示す。

図より、粒径が小さい領域（0.5μmφ付近）では、捕集効率にばらつきが生じているが、限界捕集効率は全ケース共 約1μmφである。

(3) スラッジ洗浄

清澄試験後、下記条件で洗浄を実施した結果、目視により、十分洗浄可能であると確認された。

試験条件\*1

スラッジ1kg当りの洗浄水量	20 ℓ/kg
吐出圧力	15 kgf/cm <sup>2</sup>
吐出流量	0.45 ℓ/sec
ボウル回転数	30 rpm

注記 \*1 ..... 参考文献 5)参照

## (4) リンシング性能

U、P uを含むボウル内残留液の回収を目的として、清澄運転終了後にスラッジ洗浄を行う前にボウル内に残留している清澄液を清澄ラインへ追い出す必要がある。この操作をリンシングという。

ボウル内の液の交換は押し出しによる交換よりも、液の完全混合による希釈後、清澄ラインへオーバーフローすることがわかっていることから、リンシング試験（回転数3000rpm、流量100ℓ/hr）では、ボウル内残留液中の濃度を1/10以下に希釈するのに必要なリンシング液量を把握するための試験を実施した。

図3.1.6にボウル内残留液のリンシング効果を示す。

ボウル内残留液中の濃度を1/10以下に希釈するのに必要なリンシング液量は、ボウル内にスラッジがない場合、約15ℓで、スラッジが有る場合、約20ℓとなった。

## (5) 給液リーク率

給液ノズルより供給された液の一部がスラッジ排出ラインに流れ込み、これが給液損失となる。この損失分の給液量に対する比を給液リーク率と呼ぶこととする。

サブクリティカル機の給液部の概略構造を図3.1.7に示す。

RETFの設計条件である給液流量100ℓ/hrにおいて給液リーク率が最も小さくなる給液ノズル口径を決定することとした。給液ノズル口径に対する給液リーク率を図3.1.8に示す。図より、給液リーク率が最小となり、スラッジによる閉塞の可能性を考慮して、ノズル口径を3mmφ（給液速度4.1m/s）とする。

さらに、給液リーク率低減のために、ノズル吹き付け角度を80°、90°、98°と変え、給液リーク率を測定した結果、90°の場合が最も給液リーク率が小さくなり、0.05%以下まで低減できた。

### 3.2 サブクリティカル機と高性能機の性能比較

表 3.2.1 にサブクリティカル機と高性能機の主な仕様を、表 3.2.2、表 3.2.3 に比較に用いた定格運転下の試験条件を示す。その試験結果を表 3.2.4 に示す。

#### 3.2.1 機械的性能

##### (1) ボウル振動

図 3.2.1 にボウル振動幅の変化を示す。

両機のボウル振動幅の差異は、表 3.2.5 に示す様に、サブクリティカル機用ボウルが一次危険速度を越えない範囲で使用しているため、一次振動モードの回転であるのに対して、高性能機用ボウルは一次危険速度と二次危険速度の間で使用しているため、二次振動モードの回転をする。そのため、サブクリティカル機はボウルに堆積するスラッジの量が増加するとボウル振動幅が増加する傾向にあるのに対して、高性能機はほぼ一定の値を示す。いずれも、運転許容値を十分に下回って安定である。

##### (2) 軸受温度

表 3.2.4 に 6 時間定格清澄運転後のサブクリティカル機および高性能機の軸受温度の変化を示す。

サブクリティカル機の場合、エアタービンによる空冷効果と回転数の違いにより発生する摩擦熱が少ないため、高性能機より軸受温度が低い。

しかし、軸受許容温度が 82℃であり、高性能機の場合でも十分低い値を示しており、定格運転条件下で十分耐えられる。

#### 3.2.2 清澄性能

図 3.2.2 に清澄試験後の清澄液の捕集効率を示す。

図より、粒径が小さい領域で、清澄運転時の回転数を増した効果が明確に表れている。

#### 3.2.3 給液リーク率

表 3.2.4 に従来の給液位置（ボウル下面より 25mm 上）の給液リーク率を示す。

表に示す通り、サブクリティカル機の場合、約 0.04%、高性能機の場合、約 0.2% であり、定格回転数を 2 倍にすることにより、給液リーク率が約 5 倍になっている。

この原因は、清澄回転数を増すことにより、バフ板からの給液水の跳ね返りが増加したことによると考えられる。

次に、給液高さを変えた場合の給液リーク率の変化について述べる。

給液ノズル高さを従来高さ（ボウル下面より25mm上）より高くすると、給液リーク率が約0.04%まで小さくなる。（従来高さの場合の1/5）ただし、給液ノズル高さを高くした場合の清澄性能への影響を、今後検討する必要がある。



表3.1.1 仕様表 (サブクリティカル機)

	仕 様
1. 設計性能	
(1) 定格回転数	3 0 0 0 r p m
(2) 周速	6 3 m / s e c
(3) ボウル内壁 における遠心力	2 0 0 0 G
(4) ボウル危険速度	1 次 4 2 0 0 r p m
(5) 軸受許容温度	8 2 °C
2. 機器仕様	
(1) ボウル寸法	φ 4 0 0 × H 3 0 0 mm
(2) 回転軸径	φ 8 0 mm
(3) 材質	S U S 3 0 4 L
(4) 軸受緩衝体	ゴム

表 3.1.2 試験条件 (その1)

## 機械的性能試験 Run 1 2 1

Run No.	模擬スラッジ	スラッジ濃度 (g/l)	給液流量 (l/h)	回転数 (rpm)	給液時間 (min)	推定最低 スラッジ量 (g)	分散媒	累積体積分布
1 2 1	アルミナ (1.5 : 2.2 $\mu\text{m}\phi$ = 2 : 1 wt%)	3.33	100	3000	360	2000	純水	Phoenix 模擬液 (図 3.1.3)

表 3.1.3 試験条件 (その2)

## 清澄性能試験 Run 1 2 0

Run No.	模擬スラッジ	スラッジ濃度 (g/l)	給液流量 (l/h)	回転数 (rpm)	給液時間 (min)	推定最低 スラッジ量 (g)	分散媒	累積体積分布
1 2 0 - 1 ~ 4	アルミナ (1.5 : 2.2 $\mu\text{m}\phi$ = 2 : 1 wt%)	3.33	100	3000	440	3000	純水	Phoenix 模擬液 (図 3.1.3)

表 3.2.1 仕様比較

	サブクリティカル機	高性能機
1. 設計性能		
(1) 定格回転数	3 0 0 0 r p m	6 0 0 0 r p m
(2) 周速	6 3 m / s e c	1 2 6 m / s e c
(3) ボウル内壁 における遠心力	2 0 0 0 G	8 0 0 0 G
(4) ボウル危険速度	1 次 4 2 0 0 r p m	1 次 1 0 0 0 r p m 2 次 1 4 0 0 0 r p m
(5) 軸受許容温度	8 2 °C	8 2 °C
2. 機器仕様		
(1) ボウル寸法	φ 4 0 0 × H 3 0 0 m m	φ 4 0 0 × H 3 0 0 m m
(2) ボウル軸径	φ 8 0 m m	φ 5 0 m m
(3) ボウル材質	S U S 3 0 4 L	T i - 6 A l - 4 V
(4) 軸受緩衝体	ゴム	バネ + オイルダンパ

表 3.2.2 試験条件 (その1)

## 清澄性能試験

Run No.	模擬スラッジ	スラッジ濃度 (g/l)	給液流量 (l/h)	回転数 (rpm)	給液時間 (min)	推定最低 スラッジ量 (g)	分散媒	累積体積分布
サブクリティ カル機	アルミナ (1.5 : 2.2 $\mu$ m $\phi$ = 2 : 1 wt%)	3.33	100	3000	360	2000	純水	Phoenix 模擬液 (図 3.1.3)
高性能機				6000				

表 3.2.3 試験条件 (その2)

Run No.	給液流量 (l/h)	回転数 (rpm)	給液ノズル*1 の形状	給液ノズル*2 鉛直方向位置	備 考
サブクリティ カル機	100	3000	図 2.2.4 参照	ボウル下面より 25mm	給液ノズル口径 $\phi$ 3mm
高性能機		6000			

\*1 各ノズルの給液方向を図 2.2.8 に示す。

\*2 各ノズルの鉛直方向位置を図 2.2.9 に示す。

表 3.2.4 サブクリティカル機と高性能機の比較

	サブクリティカル機	高性能機	備 考
1. 機械的性能			
(1) ボウル振動	スラッジ増加に従い増加傾向	スラッジ増加に関係なく、約 0.05 mm (p-p) でほぼ一定	サブクリティカル機と高性能機のボウルの重量、および回転速度が異なるため、振動特性が違う
(2) 軸振動	—————	スラッジ増加に従い増加傾向	
(3) 軸受温度	最高 約 40℃	最高 約 50℃	仕様上は問題なし (軸受許容温度 82℃)
2. 清澄性能			
(1) 全体捕集効率	約 99%	約 99%	
(2) 限界捕集粒径*1	約 1 μm φ	約 0.85 μm φ	
(3) 0.5 μm φ に対する部分捕集効率	約 82%	約 99%	粒径が小さい領域で清澄運転時の回転数を増した効果が明確に表れる
3. 給液リーク率			
(1) 従来の給液高さ (ボウル下面より 25 mm 上)	約 0.04%	約 0.2%	約 5 倍 回転速度の違いによりバツフル板からのね返り方が違う
(2) 給液高さを高くした場合 (ボウル下面より 90, 155, 200 mm 上)	—————	約 0.04%	ボウル下部のエッジ部の影響 (図 2.3.8 参照)  サブクリティカル機の場合も高性能機と同様な効果があると推測されるが、有効分離長を短縮するため、清澄性能への影響が考えられる

\*1 限界捕集粒径 — 付録 1 (用語の定義) 参照

表 3.2.5 サブクリティカル機と高性能機の回転中の振動モード

	サブクリティカル機	高性能機
定格回転中の速度域	定格回転数 < 一次危険速度 (3000rpm) (4200rpm)	一次危険速度 < 定格回転数 < 二次危険速度 (1000rpm) (6000rpm) (14000rpm)
定格回転中の振動モード		

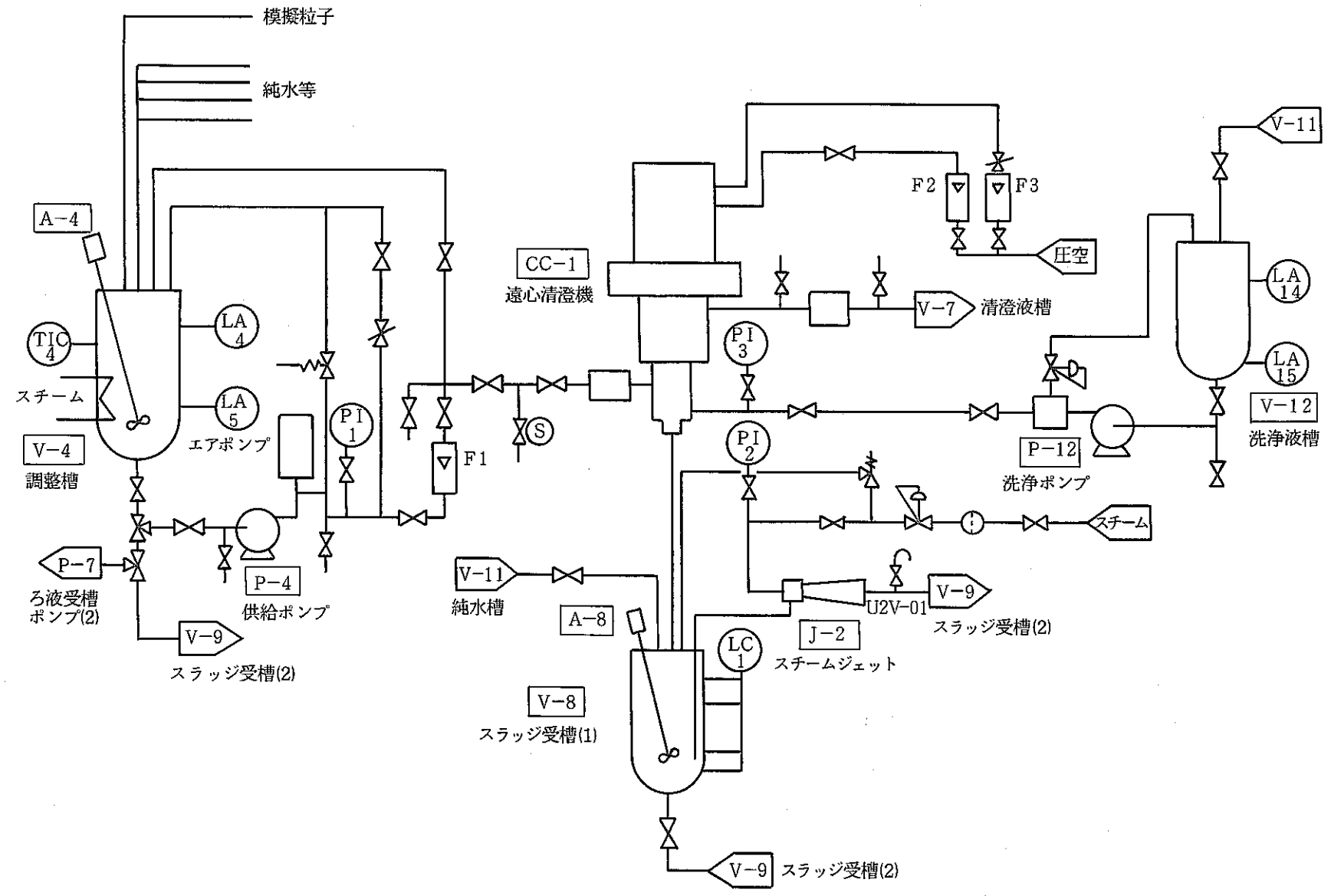


図 3. 1. 1 遠心清澄モックアップ装置フロー図 (サブクリティカル機)

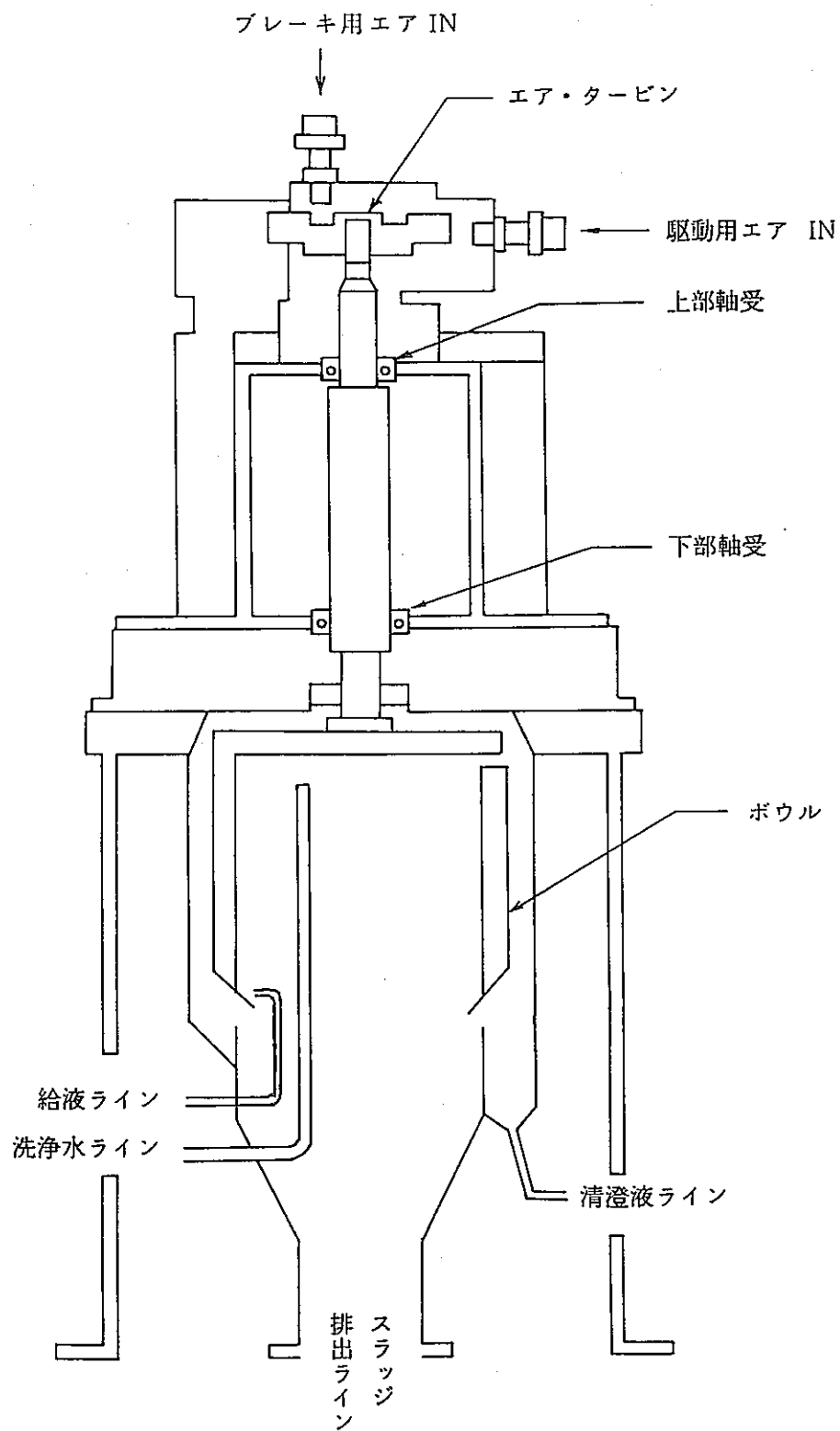


図 3. 1. 2 遠心清澄装置概略図



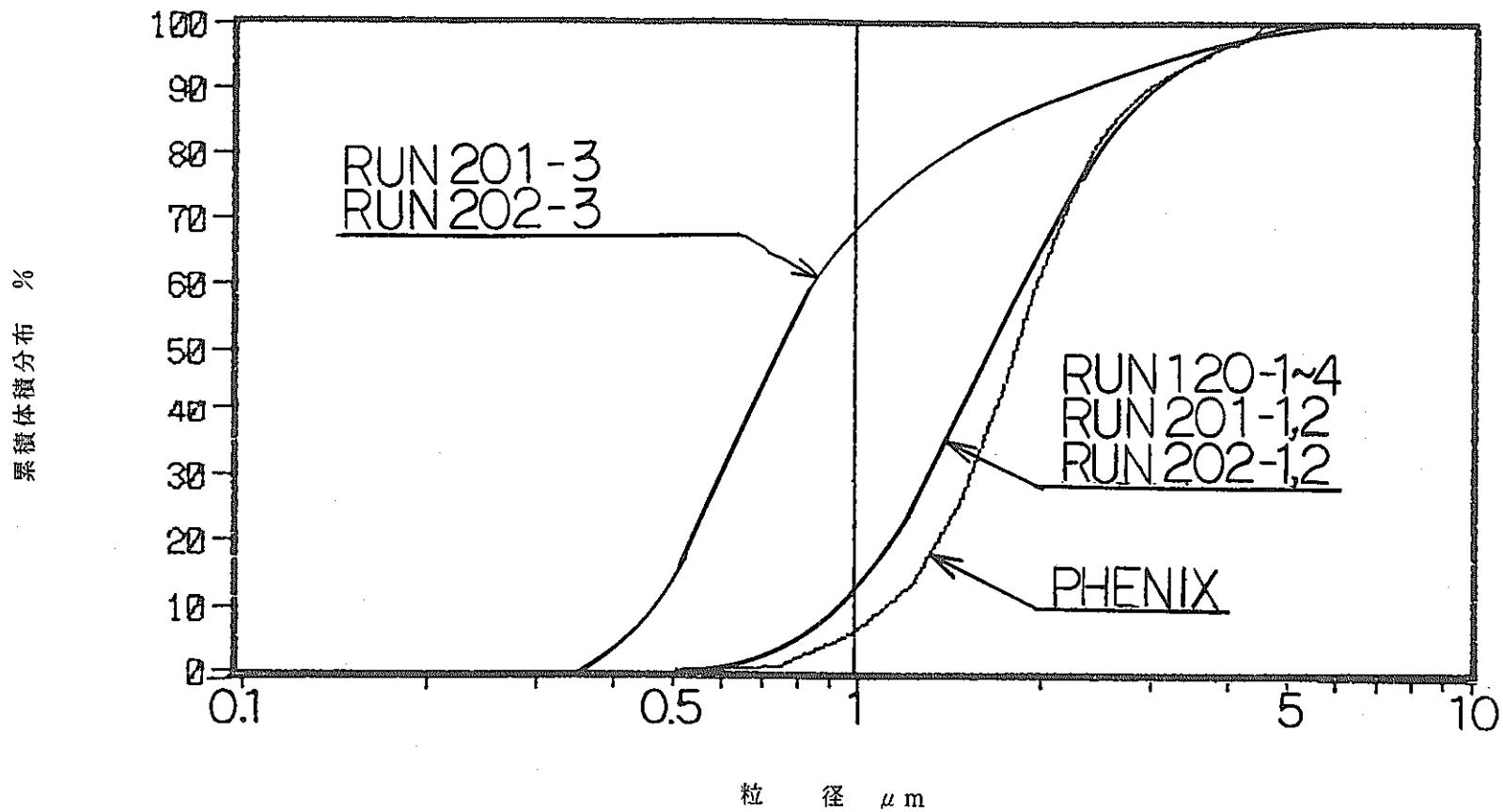


图 3.1.3 粒子体积分布

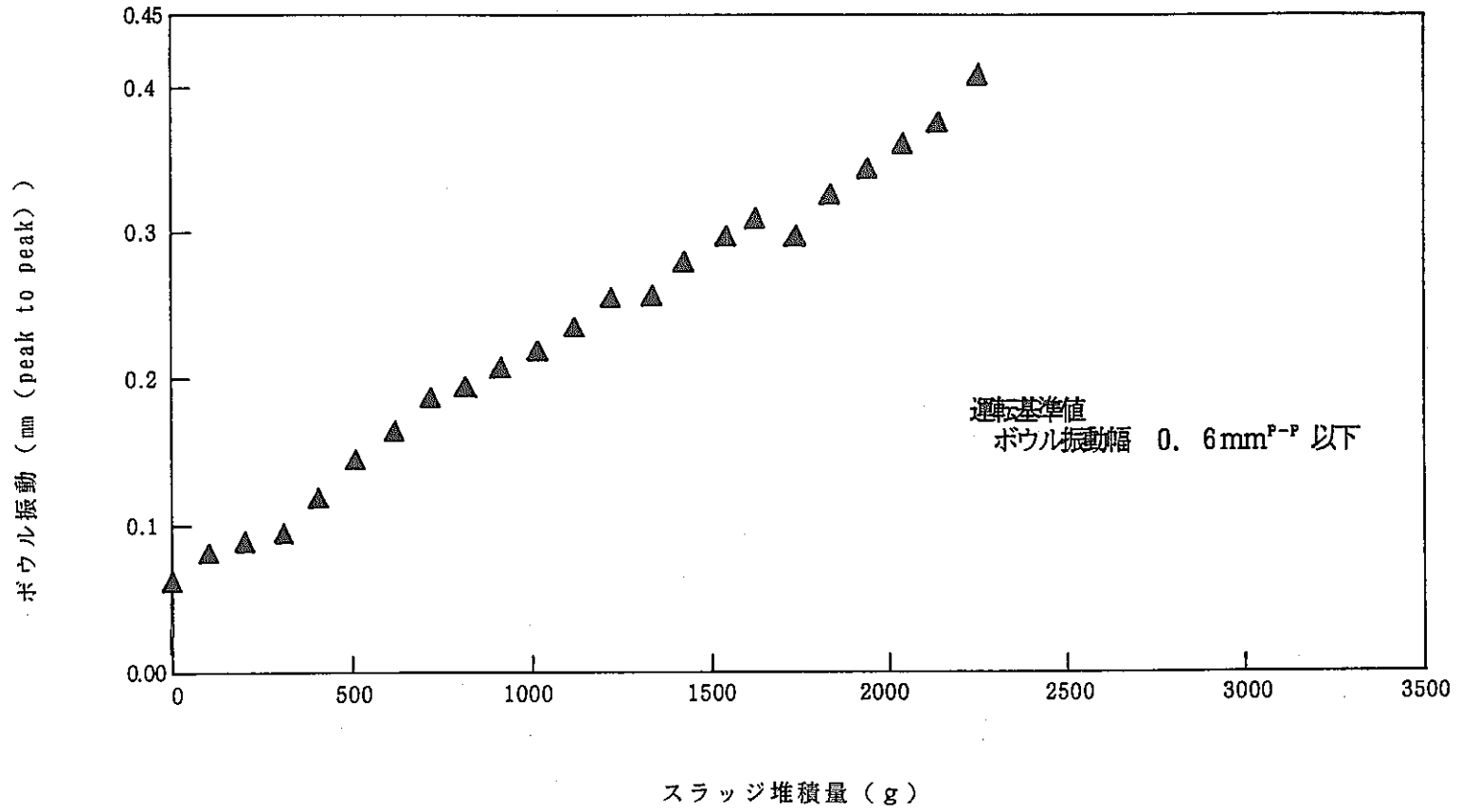


図 3. 1. 4 ボウル振動幅とスラッジ堆積量 (サブクリティカル機, Run121)

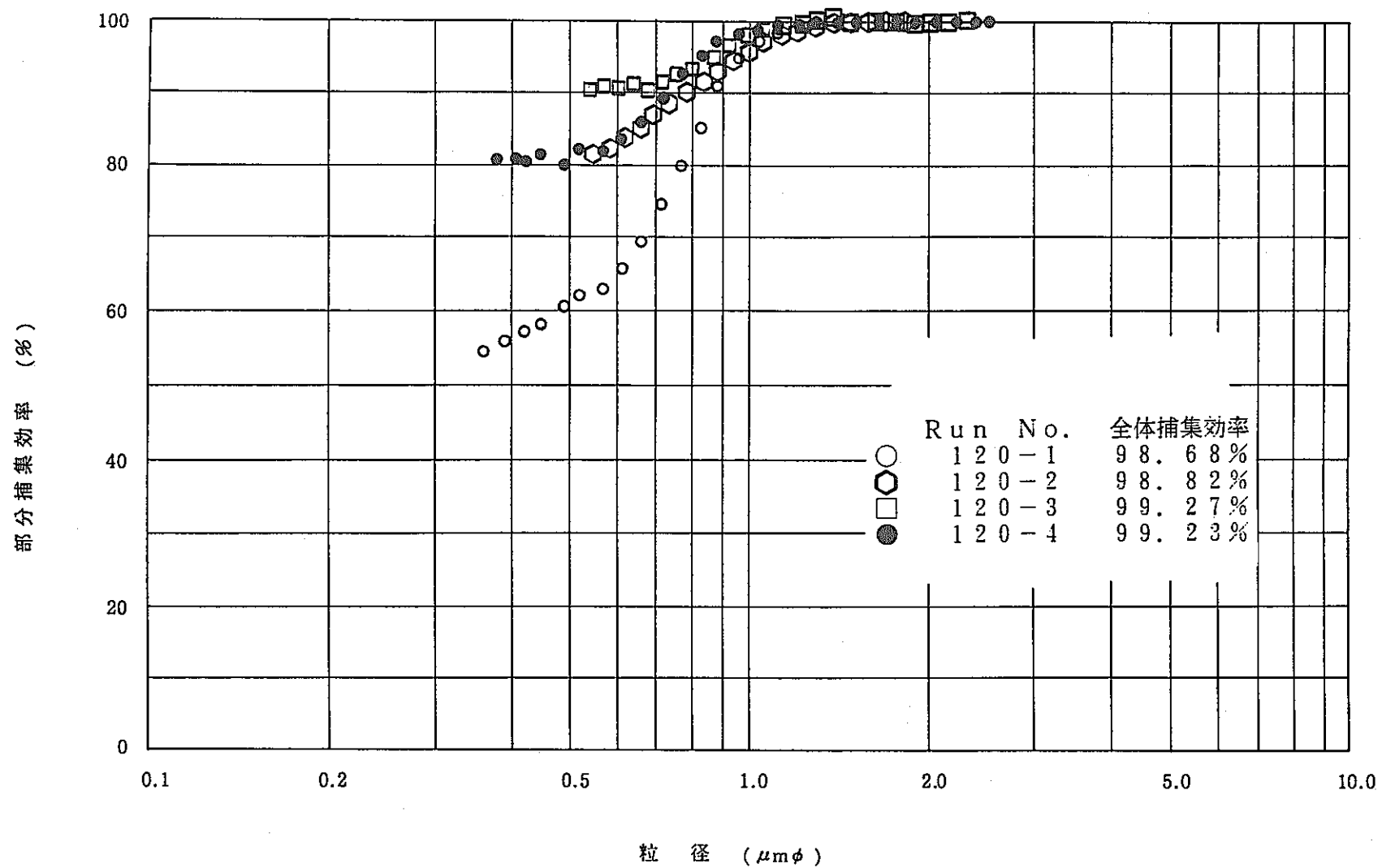


図 3.1.5 捕集効率 (サブクリティカル機)

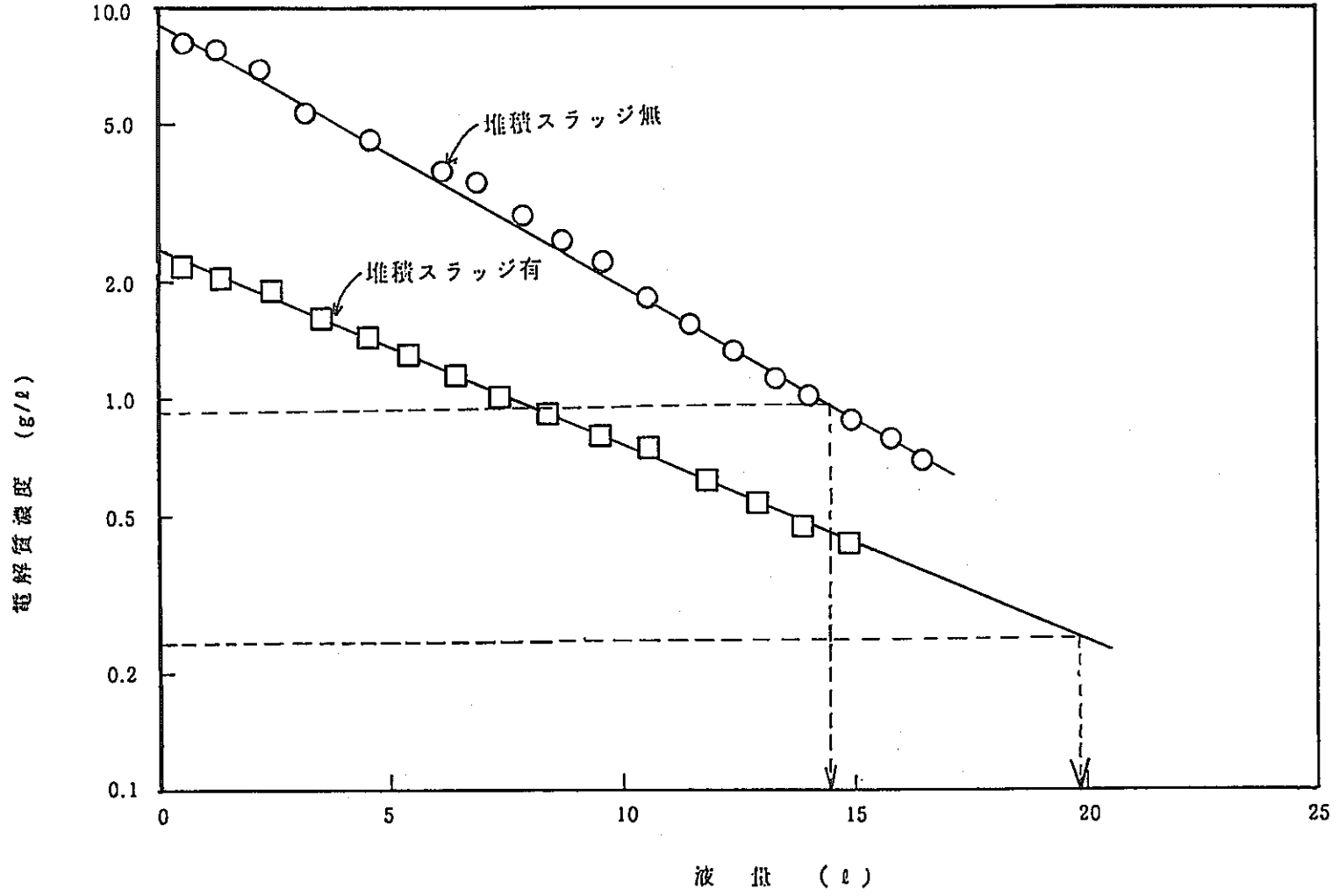


図 3.1.6 ボウル内残留液のリンシング（追い出し）効果

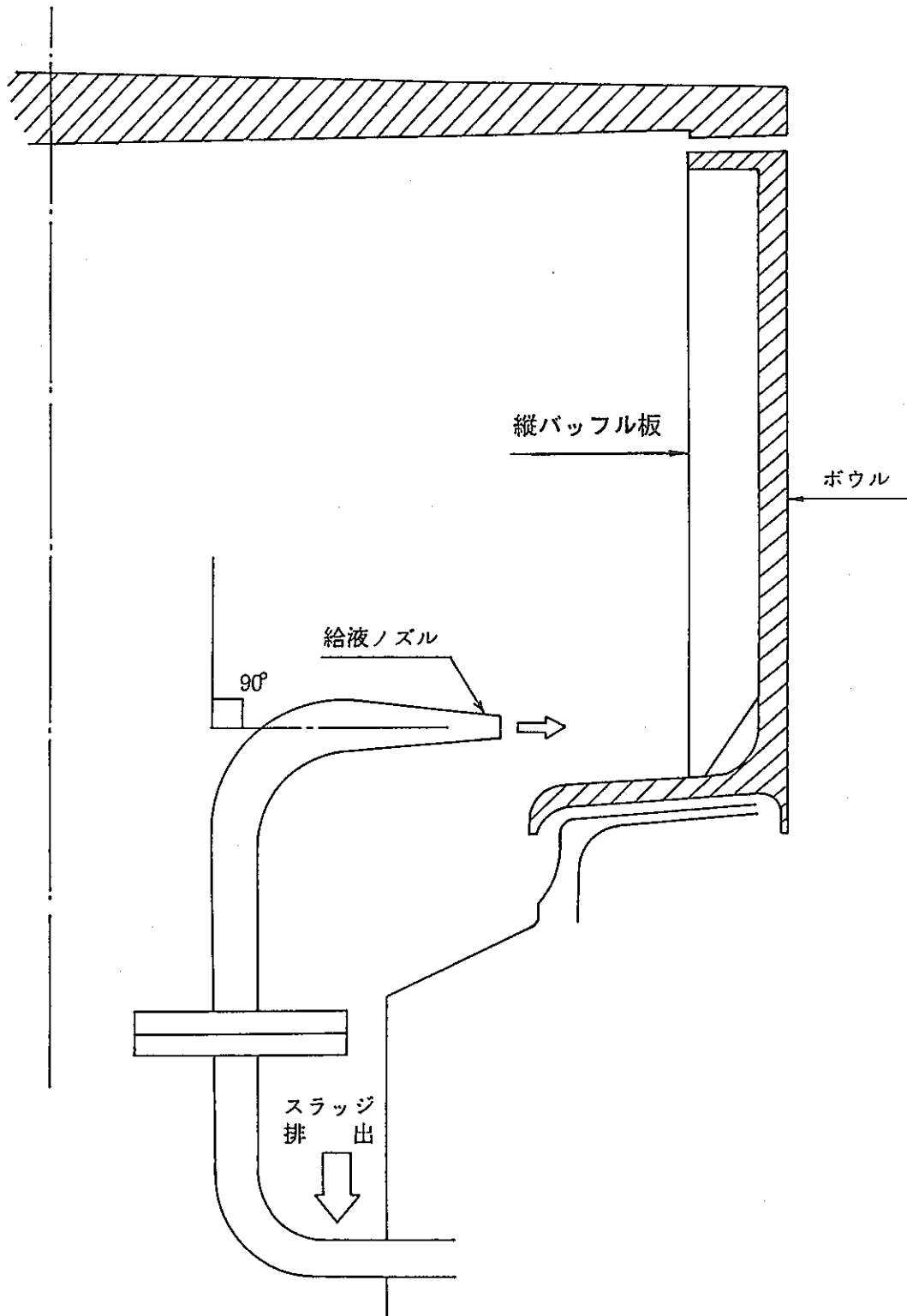


図 3.1.7 改良後の給液ノズル部の概略

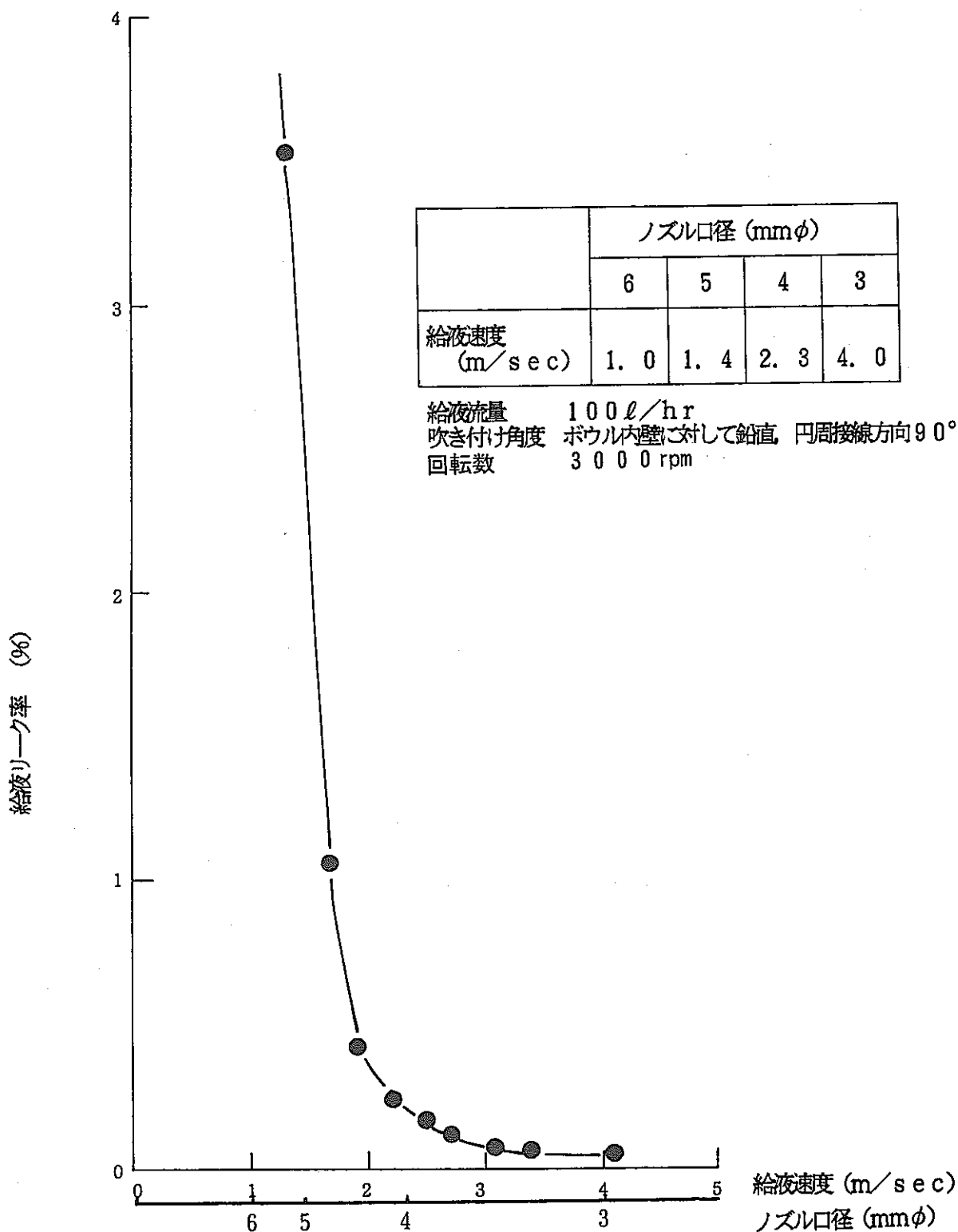


図 3.1.8 ノズル口径に対する給液リーク率

ボール振動幅とスラッジ堆積量

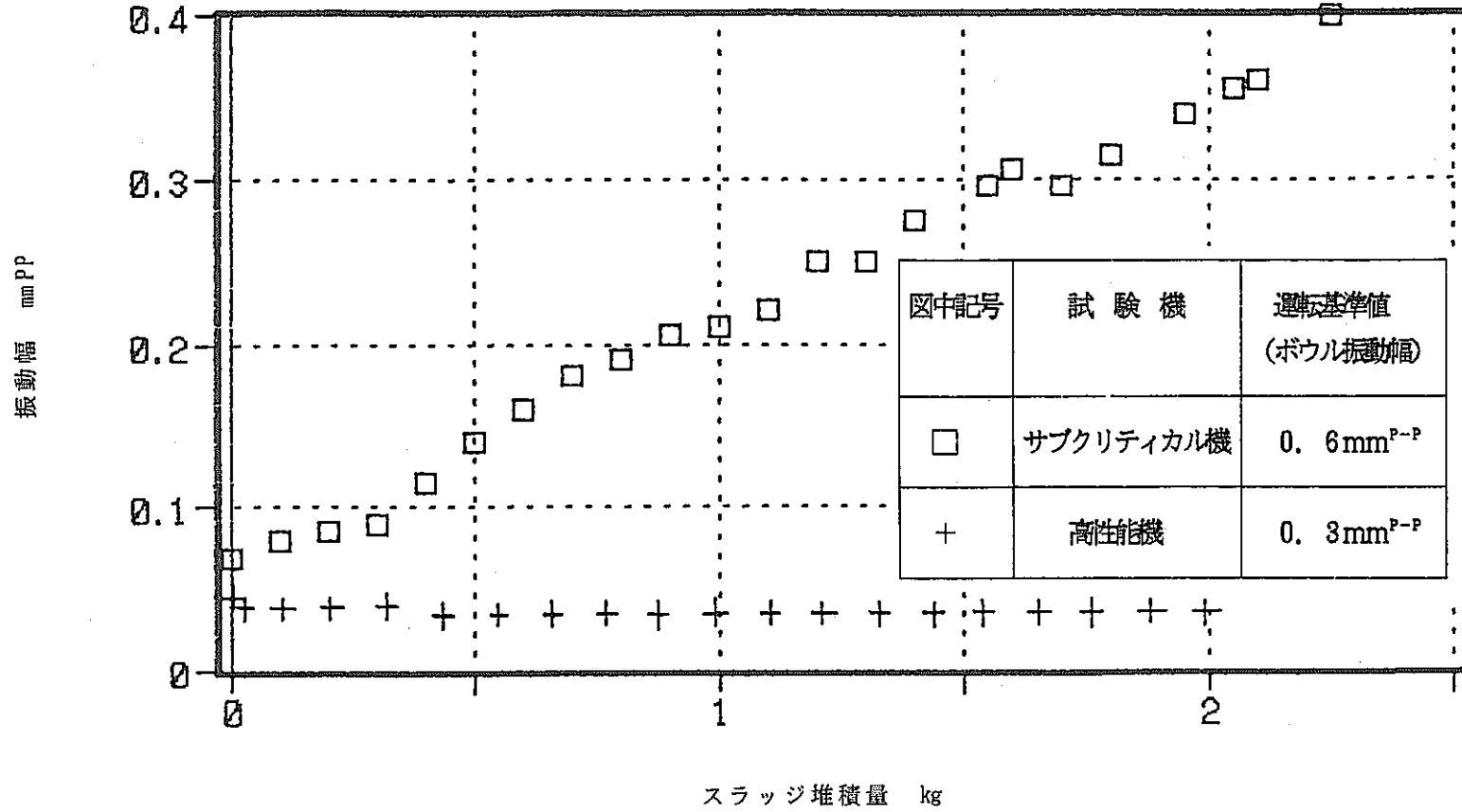


図 3.2.1 ボール振動幅とスラッジ堆積量

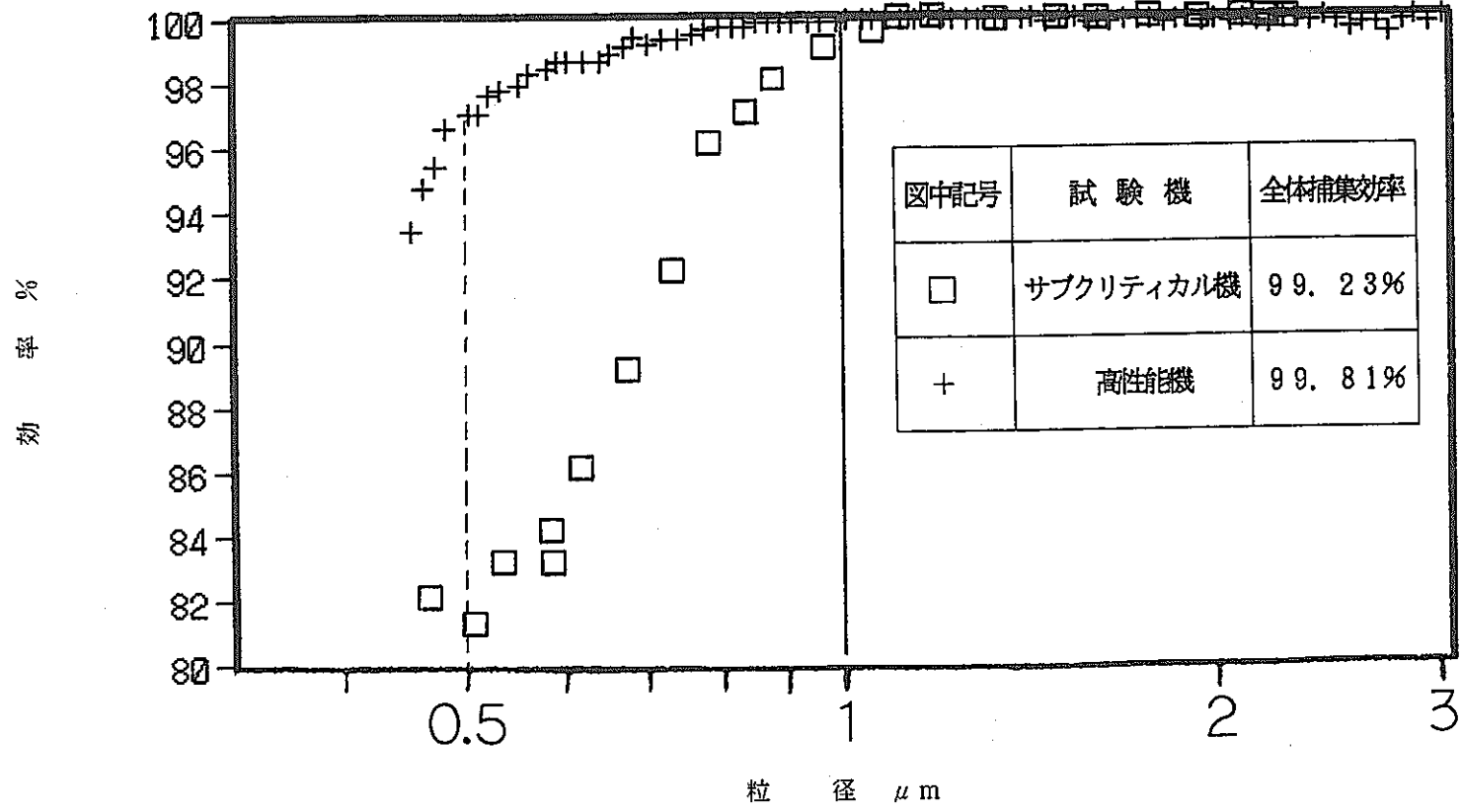


図 3.2.2 捕集効率



## 4. 今後の課題

高性能機の性能向上に係わる今後の課題として、以下に示す項目の検討を予定している。

### 4.1 給液リーク率と清澄性能

本試験結果より、給液ノズル高さを高くすると、給液リーク率が小さくなることがわかった。しかし、一般的に考えると、給液ノズル高さを高くすると清澄性能（捕集効率）の低下を生じさせる恐れがある。そこで、今後は、給液ノズル高さをパラメータとして清澄性能試験を実施し、ボウル・軸振動幅、捕集効率、および清澄運転時間の面から最適ノズル高さを求める。

### 4.2 運転安定性の改良

スラッジ粒径の大小、ボウル内壁面のスラッジ付着位置の違いによる振動特性、横バツフル板の液流動への影響・効果、振動に対する架台の影響を検討する。

### 4.3 リンシング性能評価

高性能機に於ける最適リンシング条件の確認を実施する。

## 5. 参 考 文 献

- 1) 榑東芝：遠心清澄モックアップ装置の製作 完成図書 (1985)
- 2) 榑東芝：遠心清澄モックアップ装置の改造 完成図書 (1987)
- 3) 榑東芝：遠心清澄モックアップ装置の改造（高性能機）完成図書 (1989)
- 4) 榑東芝：遠心清澄モックアップ装置のダンパ改造（高性能機） 完成図書 (1990)
- 5) 宮内，他：遠心清澄モックアップ装置性能試験（Ⅰ） 報告書  
PNC-SN8410-87-062, (1987)
- 6) 永井，他：遠心清澄モックアップ装置性能試験（Ⅱ） 報告書  
PNC-ZN8410-88-033, (1988)
- 7) 永井，他：遠心清澄モックアップ装置性能試験（Ⅲ） 報告書  
PNC-ZN8410-89-024, (1989)
- 8) 日刊工業新聞社：粉体工学用語辞典 粉体工学会編 (1981)
- 9) 丸善(株) : 化学工学便覧（改訂4版） 化学工学協会編 (1990)
- 10) 榑東芝 : 遠心清澄機の改良設計研究報告書  
PNC-ZJ6164-86-004(1), (1990)

## 付録－1 用語の定義

- ・ 捕集効率 : 一般に全体捕集効率を指す。→部分捕集効率, 総合的捕集効率
- ・ 全体捕集効率 : 試験液(けん濁液)を清澄する際の清澄効果の指標  
供給した試験液中の粒子のうち捕集され(取りのぞかれ)た粒子の比  
(一般に重量比)を示す。

$$\text{全体捕集効率} : E_i = \left\{ 1 - \frac{C_o}{C_i} \right\} \times 100 (\%)$$

$C_i$  : 供給液スラッジ濃度 (g/l 又は ppm)

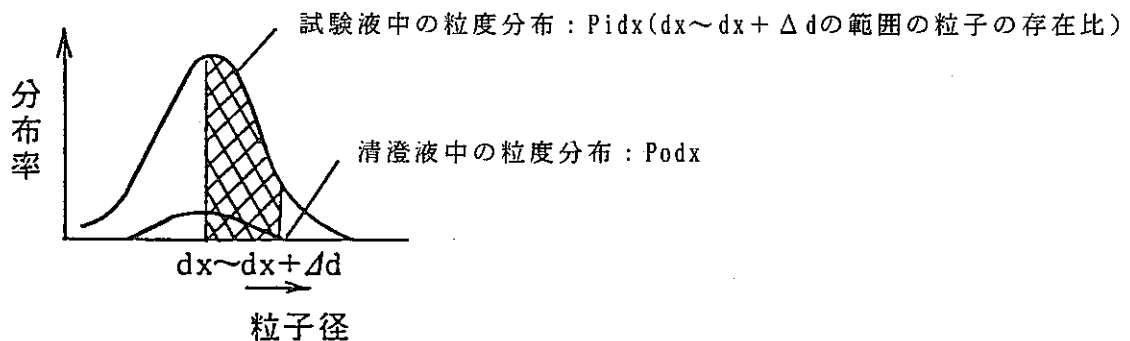
$C_o$  : 清澄液スラッジ濃度 (g/l 又は ppm)

測定方法については § 2.3.2 参照

- ・ 清澄効率 : 試験液(けん濁液)を清澄する際の清澄液中の粒子濃度

$$\text{清澄効率} : E_c = \frac{C_o}{C_i} \times 100 (\%)$$

- ・ 部分捕集(又は分離)効率 : 供給試験液中の粒子のうち特定の粒径(範囲)の粒子に対する捕集効率



すなわち, 液中に存在する粒径  $dx \sim dx + \Delta d$  の粒子の濃度を  $C_{dx}$  とすると

$$C_{dx} = P_{dx} \cdot C, \quad C = \int_0^{\infty} C_{dx}$$

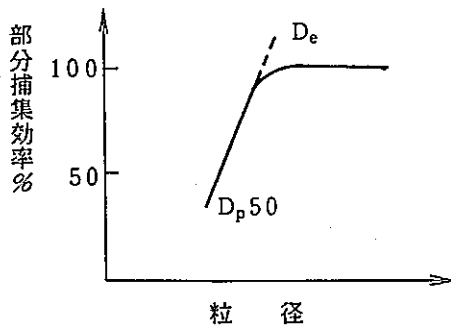
このとき

$$E_{dx} = \left\{ 1 - \frac{C_{o, dx}}{C_{i, dx}} \right\} \times 100 (\%) = \left\{ 1 - \frac{P_{o, dx} \cdot C_o}{P_{i, dx} \cdot C_i} \right\} \times 100 (\%)$$

$C_{o, dx}$  : 試験液中の粒径  $dx \sim dx + \Delta d$  の粒子の濃度

$C_{i, dx}$  : 清澄液中の粒径  $dx \sim dx + \Delta d$  の粒子の濃度

部分捕集効率を粒径に対してグラフ化することにより、部分捕集効率曲線（下図参照）が得られる。



この曲線は清澄装置の性能を表すもので、理論的には給液中の粒子の粒度分布と濃度とこの曲線の積分によって全体捕集効率の推定が可能である。

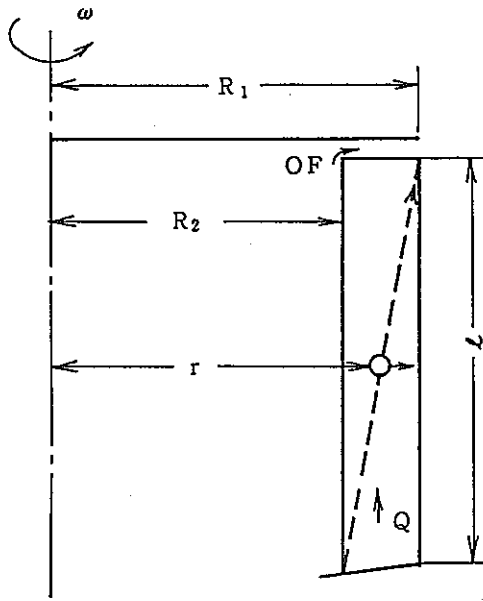
なお、一般（粉体工学関係）に部分捕集（分離）効率50%の粒径を  $D_{p, 50}$  : 分離粒径と呼ぶが、本書中では曲線の立ち上がり部を延長し100%との交点を推定し、これを  $D_e$  限界捕集粒径（測定）と定義し、清澄性能の指標としている。

参考：㈱東芝による委託試験報告等では、部分捕集効率99%の粒子径を限界捕集粒径と称している。

・限界捕集粒径（測定／計算値）

限界捕集粒径（測定値） $D_{e, m}$ については部分捕集効率の項参照。

限界捕集粒径（計算値） $D_{e, c}$ については以下の方法で算出する。



OF : オーバフロー

$R_1$  : ボウル半径 ; (m)

$R_2$  : 液面半径 ; (m)

$l$  : 有効分離長 ; (m)

$Q$  : 給液流量 ; ( $m^3/s$ )

$\omega$  : 角速度 ; ( $rad/s$ )

( $= 2\pi N$ ,  $N$ 回転数)

$r$  : 回転軸から粒子までの距離 ; (m)

$D$  : 粒径 ; (m $\phi$ )

$\rho_p$  : 粒子密度 ; ( $kg/m^3$ )

$\rho_1$  : 液密度 ; ( $kg/m^3$ )

$\eta$  : 液粘性 ; (Pa $\cdot$ s)

粒子の沈降速度を  $\frac{dr}{dt}$  とするとき、ストークスの式により、

$$\frac{dr}{dt} = \frac{r \omega^2 (\rho_p - \rho_1)}{18 \eta} D^2$$

液の滞留時間  $T$  は、

$$T = \frac{\pi (R_1^2 - R_2^2) l}{Q}$$

任意の粒子 (粒径  $D$ ) が捕集されるための条件は、 $\int_0^T \frac{dr}{dt} \cdot dt \geq (R_1 - R_2)$

$\int_0^T \frac{dr}{dt} \cdot dt \geq (R_1 - R_2)$  の場合の  $D$  を限界捕集粒径  $D_{0m}$  と称する。

このとき

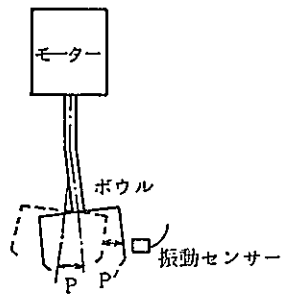
$$D_{0m} = \left[ \frac{18 \eta Q l n \frac{R_1}{R_2}}{(\rho_p - \rho_1) \pi \ell \omega^2 (R_1^2 - R_2^2)} \right]^{1/2}$$

- ・遠心効果 : 重力の倍数で測った遠心力の大きさ。回転半径  $\gamma$  で、一定の角速度  $\omega$  で回転する物に働く遠心力は  $\gamma \omega^2$ 、重力加速度を  $g$  とすると遠心効果  $Z$  は

$$Z = \frac{\gamma \omega^2}{g} \text{ である。} \quad (\text{粉体工学用語辞典より})$$

なお遠心清澄モックアップ装置を定格条件 (3,000rpm) で運転した場合の遠心効果は約2,000G ( $m/s^2$ ) である。

- ・ボウル振動 : 回転時に生じるボウル部の振動。軸受部に対する負荷の評価および異常



検出のため、軸振動又は軸受部がうける荷重等を測定しておくことが望ましい。本装置の場合測定対象はボウル部振動であるが、左図からわかるように、軸振動を表すことができる。

設計上、0.6mm<sup>P-P</sup>を限界値としている。

$$P \approx P'$$

なお、単位mm<sup>P-P</sup>はmm・peak to peak (全振幅)を示す。

- ・粒 径 : スラッジ又は模擬スラッジを構成する粒子の大きさを直径で示したもの。単位は一般に  $\mu m \phi$  ( $10^{-6} m \phi$ ) を使用する。粒径と略する場合もある。

- ・平均粒径 : 粒径が不均一な多数の粒子から構成される粒子群について、それを何らかの意味で代表する仮想的な粒子を対応させるとき、その粒径を一般に平均粒径という。

本試験においては主に平均体積径 (平均体積を有する仮想球の直径  $D_v$ ) を使用する。

$$D_v = \left( \frac{\sum (n d^3)}{\sum n} \right)^{1/3}$$

$d$  : 個々の粒子の直径

$n$  : 粒径  $d$  の粒子の個数

その他、補助的に個数平均径を使用する場合もある。

$$D_i = \sum \left( \frac{n}{\sum n} \cdot d \right) = \frac{\sum (n d)}{\sum n}$$

- ・ 粒子濃度 : 溶解液中の固形分, 試験液中の模擬スラッジの濃度。溶質濃度と区別するために本報告書中ではこの表現を用いた。  
単位は  $\text{g} / \ell$  又は  $\text{mg} / \ell$  (ppm) とし, 1  $\ell$  の溶媒中に存在する固形物の重量 (g, mg) と定義する。
- ・ 粒度分布 : 重量 (体積) 分布および個数分布等があり, 表示方法として頻度分布と積算分布がある。本報告書では重量・頻度分布を主に用いた。

## 付録－２ 部分捕集効率について

遠心清澄機の清澄性能評価の指標として、部分捕集効率を測定値より求めているが、この意味について検討してみる。

部分捕集効率の定義はある一定の粒径の粒子が捕集される割合であり、式としては次のように表される。

$$E_{dx} = \left\{ 1 - \frac{C_{odx}}{C_{idx}} \right\} \times 100 (\%)$$

$$= \left\{ 1 - \frac{P_{odx} \cdot C_o}{P_{idx} \cdot C_i} \right\} \times 100 (\%)$$

$C_{idx}$  : 試験液中の粒径  $dx$  の粒子の濃度 ; (  $g/l$  )

$C_{odx}$  : 清澄液中の粒径  $dx$  の粒子の濃度 ; (  $g/l$  )

$C_o$  : 試験液中の粒子濃度 (  $= \sum_{dx=0}^{dmax} C_{odx}$  ) (  $g/l$  )

$C_i$  : 試験液中の粒子濃度 (  $= \sum_{dx=0}^{dmax} C_{idx}$  ) (  $g/l$  )

$P_o$  : 粒度分布 (  $\sum_{dx=0}^{dmax} P_{odx} = 1$  )

$P_i$  : 粒度分布 (  $\sum_{dx=0}^{dmax} P_{idx} = 1$  )

$E$  : 全体捕集効率 ; (  $\%$  )

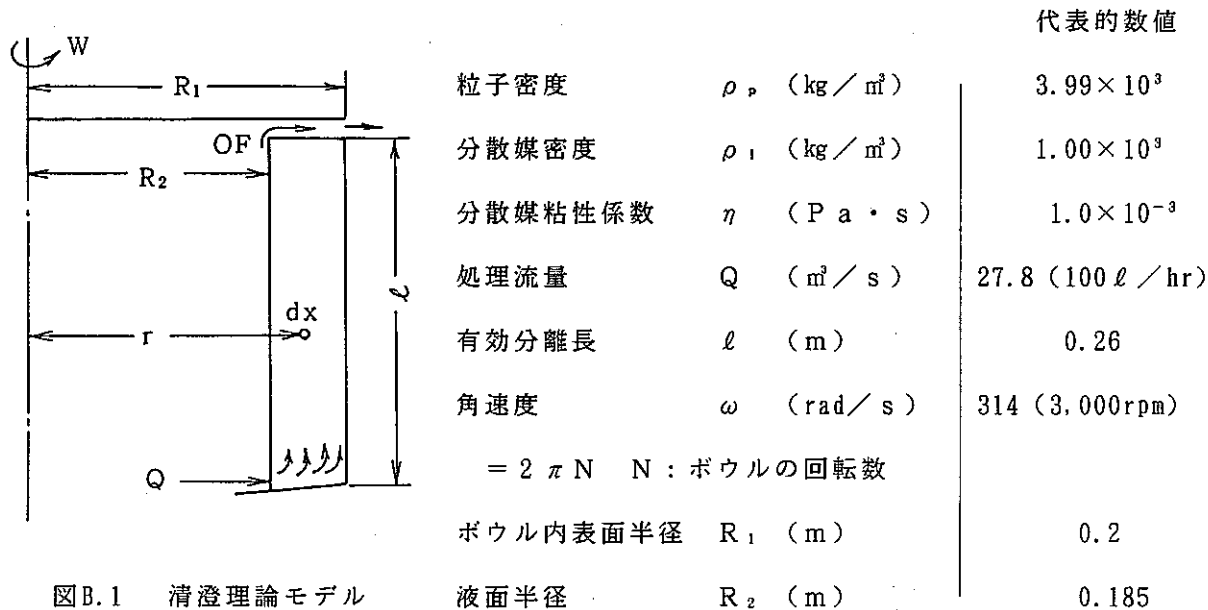
なお、ここで  $E = \left\{ 1 - \frac{C_o}{C_i} \right\} \times 100 (\%)$  となる。

以上は実測値から部分捕集効率を求める方法である。

これに対して、理論的に部分捕集効率を算出してみる。

遠心清澄機ポウル内の粒子の挙動はストークスの法則に従うものとする。理論モデルを次に示す。





図B.1 清澄理論モデル

このモデルにおいて、液の滞留時間  $T$  (sec) は次の式で表される。

$$T = \frac{\pi (R_1^2 - R_2^2) l}{Q} \dots\dots\dots ①$$

次に、ストークスの式により、位置  $r$  にある粒径  $dx$  (cm  $\phi$ ) の粒子の沈降速度は次式で表される。

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\gamma \omega^2 (\rho_p - \rho_1)}{18 \eta} dx^2 \dots\dots\dots ②$$

この式を積分し、時間  $T$  内に位置  $r$  から  $R_1$  まで粒子が沈降する場合の条件を得る。

$$\int_r^{R_1} \frac{1}{r} dr = \int_0^T \frac{\omega^2 (\rho_p - \rho_1)}{18 \eta} dx^2 \cdot dT \dots\dots\dots ③$$

$$l_n \frac{R_1}{r} = \frac{\omega^2 (\rho_p - \rho_1)}{18 \eta} dx^2 \cdot T \dots\dots\dots ④$$

④式に①式を代入すると

$$l_n \frac{R_1}{r} = \frac{\omega^2 (\rho_p - \rho_1)}{18 \eta} dx^2 \cdot \frac{\pi (R_1^2 - R_2^2) l}{Q} \dots\dots ⑤$$

⑤式を整理すると

$$dx^2 = \frac{18 \eta Q l_n \frac{R_1}{r}}{(\rho_p - \rho_1) \pi l \omega^2 (R_1^2 - R_2^2)} \dots\dots\dots ⑥$$

この式は遠心清澄機において、位置  $\gamma$  にある粒子が滞留時間中にボウル内表面位置まで移動する、すなわちボウルに捕集されるという状況がおりうる最小の粒径  $dx$  を示す。

⑥式において  $\gamma = R_2$  とおいた場合に得られる粒径  $d_e$  を一般に限界捕集粒径と呼ぶ。すなわち、 $dx \geq d_e$  の粒子は給液時点で液中のどの位置にあったとしても液がボウルを通過する間にボウル内表面位置まで沈降し、捕集されるということを意味する。

いいかえると、 $dx \geq d_e$  の粒子に関しては捕集効率 1 となる。

次に、 $dx < d_e$  の粒子について考えてみる。

この場合、式⑥からわかるように粒径  $dx$  の粒子は給液時点で位置  $\gamma$  又はそれ以上 ( $\gamma \sim R_1$ ) にあった場合にのみ捕集される。したがって、粒子が均一に分散しているとすれば、粒径  $dx$  の粒子群の捕集される割合  $P$  は以下の式で表される。

$$P = \frac{R_1^2 - r_2}{R_1^2 - R_2^2} \dots\dots\dots ⑦$$

(ただし  $dx < d_e$ )

⑦に⑥を代入すると

$$P = \frac{R_1^2}{R_1^2 - R_2^2} \left\{ 1 - \exp \left\{ -2 \frac{(\rho_p - \rho_l) \pi \ell \omega^2 (R_1^2 - R_2^2)}{Q \cdot 18 \eta} \cdot dx^2 \right\} \right\} \dots\dots ⑧$$

参考のため、限界捕集粒径  $d_e$  に対する  $dx$  の比によって⑧式を整理する。

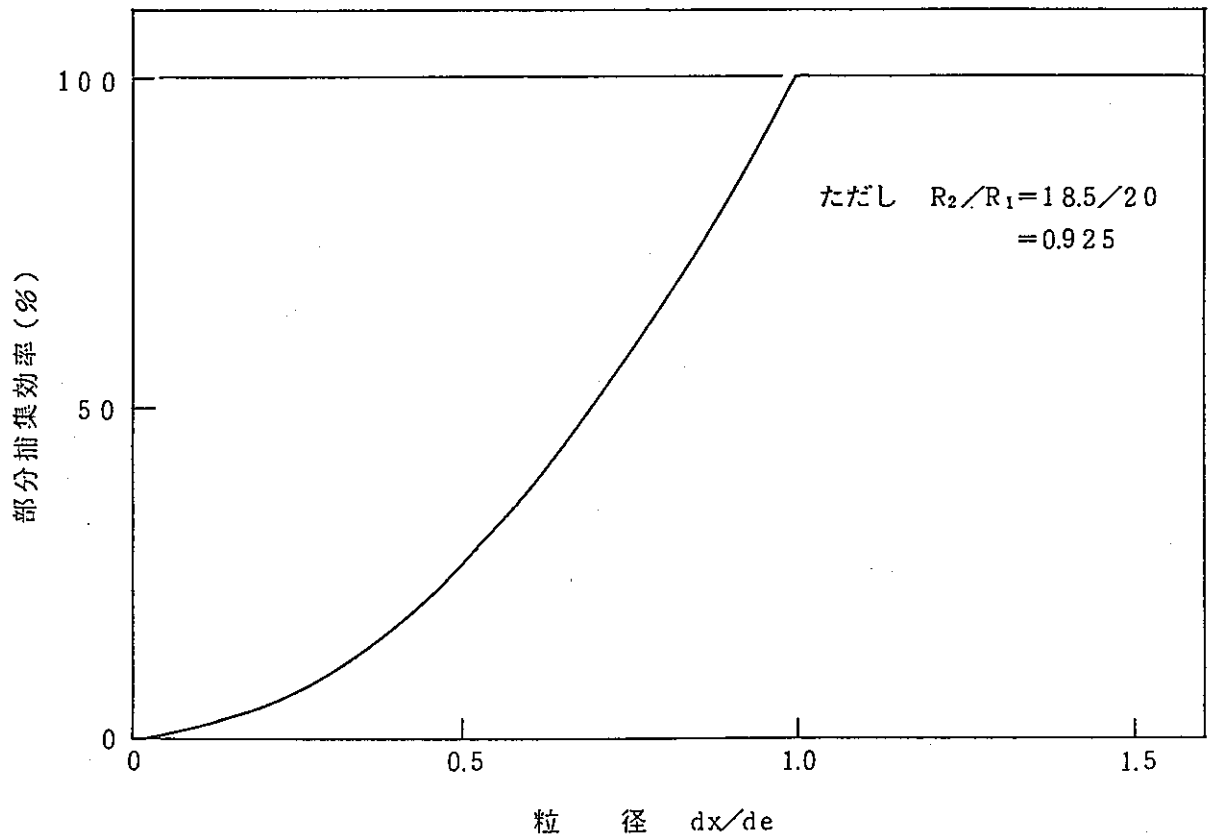
$$d_e^2 = \frac{18 \eta Q \ell_n \frac{R_1}{R_2}}{(\rho_p - \rho_l) \pi \ell \omega^2 (R_1^2 - R_2^2)} \dots\dots\dots ⑨$$

⑨式を⑧式に代入すると

$$P = \frac{1}{1 - \left\{ \frac{R_2}{R_1} \right\}^2} \left\{ 1 - \left\{ \frac{R_2}{R_1} \right\}^2 \left[ \frac{dx}{d_e} \right]^2 \right\} \dots\dots\dots ⑩$$

以上をまとめると、粒径  $dx$  の粒子に対する部分捕集効率  $P$  は以下のようになる。

$$P = \begin{cases} 1 & dx > d_e \\ \frac{1}{1 - \left\{ \frac{R_2}{R_1} \right\}^2} \left\{ 1 - \left\{ \frac{R_2}{R_1} \right\}^2 \left[ \frac{dx}{d_e} \right]^2 \right\} & dx \leq d_e \dots\dots ⑪ \end{cases}$$



図B.2 理論的部分捕集効率

付録3 給液リーク率の試験データ

Run No.	試 験 条 件						試 験 結 果			備 考
	試験液	運 転 条 件			給液ノズル条件		給液量 ( $\ell$ )	給液リーク量 (cc)	給液リーク率 (%)	
		回転数 (rpm)	給液流量 ( $\ell/h$ )	給液時間 (min)	ボウル内壁の円周接線 に対する角度( $^{\circ}$ )	ボウル下面からの給液 ノズルまでの高さ(mm)				
205-1	純水	6000	100	180	90	25	306	693	0.226	ボウル内壁鉛直方向 に対する角度 90
205-2					67			1831	0.598	ボウル内壁鉛直方向 に対する角度 90
205-3					111			635	0.208	ボウル内壁鉛直方向 に対する角度 90
205-4					48			5832	1.91	ボウル内壁鉛直方向 に対する角度 90
205-5					132			114877	37.5	ボウル内壁鉛直方向 に対する角度 90
205-6					90	154		0.05	ボウル内壁鉛直方向 に対する角度 90	
205-7					90	150		0.054	ボウル内壁鉛直方向 に対する角度 90	
205-8					220	164		0.054	ボウル内壁鉛直方向 に対する角度 90	

付録4 機械的性能の試験データ

Run No	試験条件							試験結果								
	模擬スラッジ			分散媒		運転条件		給液時間 (min)	モータ駆動力		振動幅 (mm <sup>P-P</sup> )		軸受温度 (°C)		スラッジ 堆積量 (g)	全体 捕集効率 (%)
	組成	公称平均粒径 ( $\mu\text{m}\phi$ )	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	組成	粘度 (Pa·s)	回転数 (rpm)	給液流量 ( $\ell/h$ )		電圧 (V)	電流 (A)	ボウル	軸	上部	下部		
206-1	アル ミナ	0.4	$4 \times 10^{-3}$	水	$1 \times 10^{-3}$	6000	100	360	186	14.5	0.0475	0.31	—	48	1942	98.7
206-2		1.56 (1.5:2.2 =2:1wt%)						360	187	14.3	0.0425	0.06	—	49	2130	99.8
206-3								251	185	14.6	0.14	0.35	34	—	1583	99.71
206-4		40						187	14.7	0.096	0.11	29.5	—	219	99.27	