

本資料は 2007年 6月 27日 日付けで登録区分、
変更する。

[技術情報室]

遠心清澄モックアップ装置 清澄性能試験（I）報告書

1987年3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

配 布 限 定

PNC 機N8410 87-62

1987年 3 月



遠心清澄モックアップ装置

清澄性能試験（I）報告書

宮内 裕，根本 利隆，西岡 博

小島 久雄，林 正太郎

要 旨

目的： 高速炉燃料リサイクル試験施設の清澄工程への適用を想定し，遠心清澄装置の開発を進めている。

方法： 昭和59年度に製作した遠心清澄モックアップ装置を使用した機械的性能試験，清澄性能試験等を実施した。

結果： 試験により以下の結果を得た。

- (1) 清澄ボウルの振動は，スラッジ捕集量に比例して増加する。振動にもとづく捕集量の上限は設計値（2 kg）を若干上回ると考えられる。
- (2) 定格運転条件（3,000rpm, 100ℓ/hr）での限界粒子径は0.75μm前後である。
- (3) 二段清澄により，軸受負荷を減少し，軸受寿命を延長しうる可能性がある。
- (4) ドーンレイ型清澄装置による性能試験を実施したところ，PNC型機に近い清澄性能を持つことがわかった。

本装置はFBR燃料リサイクル試験施設の清澄工程用機器として必要な性能をほぼ満足する。

今後，装置の高性能化に関する検討，周辺装置の開発を行う。

目 次

1. 概 要	1
2. 試験方法	2
2.1 装置概略	2
2.2 試験手順	6
2.2.1 試験内容	6
2.2.2 試験液の選定	7
2.2.3 試験液の調整	7
2.2.4 サンプリング	8
2.3 分析方法	18
2.3.1 分析内容	18
2.3.2 粒子濃度分析	18
2.3.3 粒径分布測定	18
2.4 測定方法	19
3. 試験結果および考察	20
3.1 機械的性能	20
3.1.1 ボウル振動の検討	20
3.1.2 給液のリーク率	25
3.2 清澄性能	28
3.2.1 清澄性能の安定性	28
3.2.2 運転条件の検討	30
3.2.3 試験液液性の検討	35
3.3 二段組み合わせ試験	39
3.3.1 清澄性能	39
3.3.2 機械的性能	42
3.3.3 評 価	42
3.4 ドーンレイ型性能試験結果	45
3.4.1 機械的性能	45
3.4.2 捕集性能評価試験結果	49

3.5	運転中の知見	54
3.5.1	遠隔保守上の問題点	54
3.5.2	起動, 停止手順に関する検討	55
4.	まとめ	60
5.	今後の課題	61
5.1	PNC型遠心清澄装置の詳細性能評価	61
5.2	スラッジ捕集容量の確認	61
5.3	スラッジ捕集量の検出	61
5.4	スラッジ処理に関する検討	61
5.4.1	スラッジ洗浄操作	61
5.4.2	スラッジ保管形態の検討	62
5.5	清澄システムの検討	62
5.6	遠隔保守化	63
5.7	清澄性能の向上	63
5.8	ボウル構造の改良	64
5.9	清澄工程に関する条件の明確化	64
6.	データ集	67
7.	参考文献	76
付録1.	用語の定義	77
〃 2.	部分捕集効率について	81
〃 3.	Dounreay (ドーンレイ) 型遠心清澄機に関する説明	86
〃 4.	スラッジ洗浄操作に関する検討	93
〃 5.	参考資料	95

1. 概 要

高速炉燃料再処理試験施設の給液清澄工程用機器として遠心清澄装置の開発を行ってきた。昭和59年度には既設の清澄工程モックアップ装置に組み込むかたちで遠心清澄モックアップ装置（PNC型遠心清澄機）を製作し、据え付けた。この装置を用いて、61年度より各種試験を開始した。以下に各種試験の結果を示す。

- ・装置運転の習熟をかねて、機械的性能試験を実施した。試験流体として水を使用し、供給流量およびボウル回転数をそれぞれ0～420ℓ/hr、0～3,300rpmの範囲で変動させ運転したところ、ボウルの振動、軸受温度等異常無く運転出来ることが確認された。また、この間の液リーク率すなわち給液の内ボウルからスラッジ側に失われる液の比率を測定したところ、定格運転（100ℓ/hr、3,000rpm）で約0.5%との結果を得た。
- ・模擬不溶解残渣として熔融アルミナ（公称平均粒子径0.4～2.5μm）、酸化セリウム（0.85μm）等、分散媒として水、砂糖水等を使用して清澄性能に関する試験を行い、捕集効率*の測定を行った。定格運転条件（100ℓ/hr、3,000rpm）下での捕集効率は、公称粒径1.3μmの粒子に対して99%以上であった。また、この場合の限界粒子径**は0.75μm前後であった。
- ・遠心清澄機を二段直列に使用した場合を想定して試験を行った。清澄性能は二段のうち高回転の段を単独で使用した場合と同程度の値であったが、二段ともボウル振動が非常に低いレベルにとどまることがわかった。
- ・本装置との性能比較を行うためにVERO社（英）製遠心清澄機（通称ドーンレイ型）を用いて試験を行った。標準的条件（100ℓ/hr、20,000rpm）で使用した場合、PNC型に近い捕集効率を有するが、捕集容量がPNC型と比較して小さいため、スラッジの捕集に伴って急激に捕集効率が悪化する。

* 付録1 参照

** 付録2 参照

2. 試験方法

2.1 装置概略

遠心清澄モックアップ装置の概略フローを図2.1.1に示す。清澄性能試験時のフローは概略以下の通りである。

調整槽V-4で調整された試験液はポンプP-4を経て遠心清澄機に供給される。遠心清澄機本体の概略構造は図2.1.2に示すよう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、ボウル内面下部に液を吹きつける。液は遠心力により径方向に押しつけられた状態（定格で2,000Gに相当）で上方へ流れ、上部のせきをこえて流出する。この間に固形分は沈降（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。

ボウル内面に付着したスラッジの洗浄は、以下の手順で行う。

試験液の供給停止時点では、液（約5ℓ）とスラッジがボウル内面に保持されている。ここで回転を停止すると液は下方におちる。さらにボウルを低速回転（洗浄モード：0～15rpm）させ、洗浄ポンプ（P-12）経由で洗浄水を吹きつける。これによってスラッジは下方におち、スラッジ受槽（V-8）に回収される。

このスラッジを含むスラリー（その他、本モックアップ装置で発生する廃液は）は、重力フロー、又はスチームジェット（J-2：S62.4時点で未使用）によって廃液槽（V-9）に送り、必要に応じて中和処理等を行った上、清澄モックアップ装置に付属の廃液ろ過設備でスラッジを除去し、第二応用試験棟1F床中央部のピットに放出する。

ドーンレイ型清澄機の試験時には図2.1.3に示すように遠心清澄モックアップ装置の給液系に接続し、試験を行った。装置駆動用エアは、本体計装用エアを使用した。

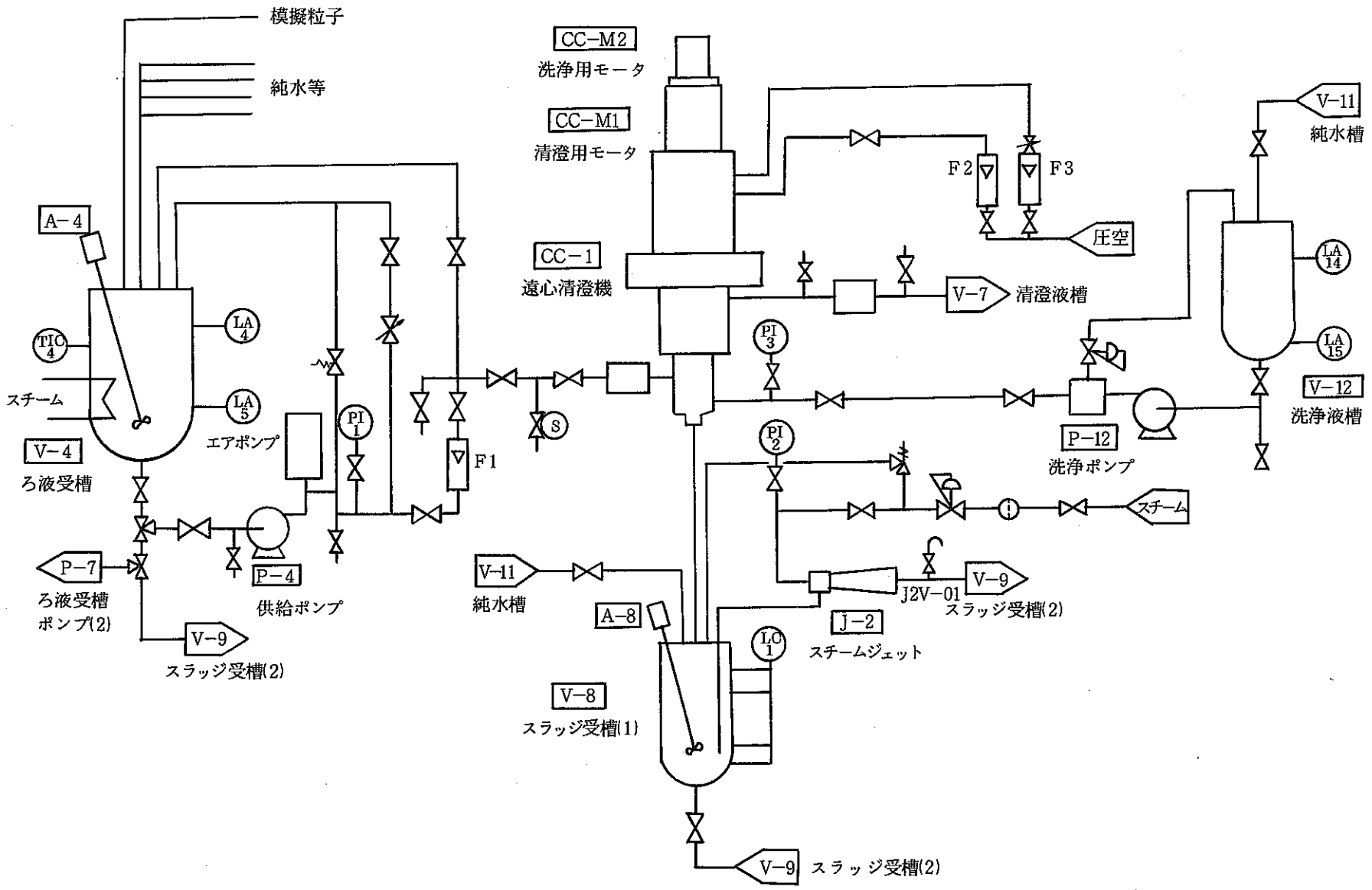


図 2.1.1 遠心清澄モックアップ装置フローシート

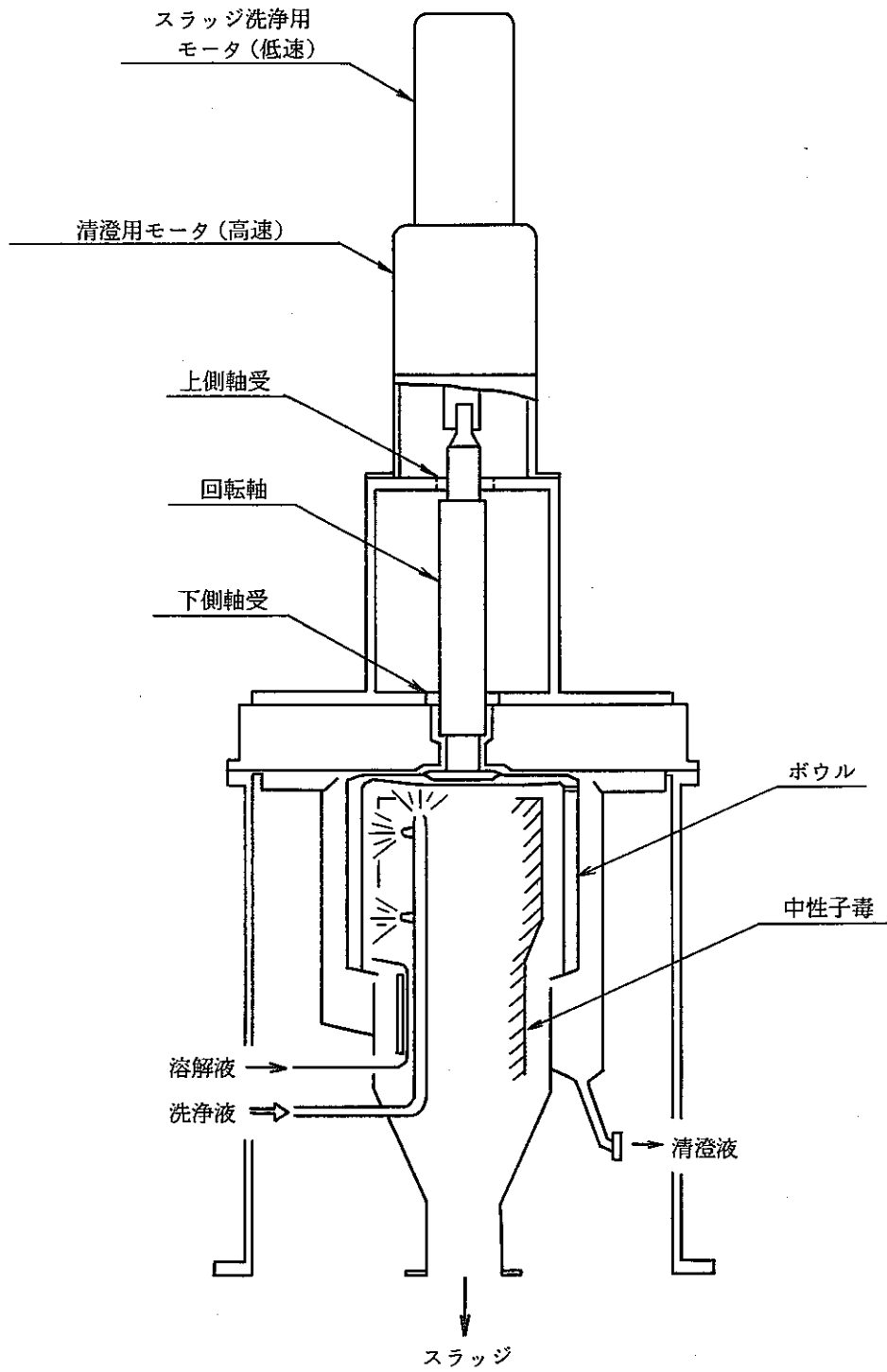


図 2.1.2 遠心清澄装置概略構造

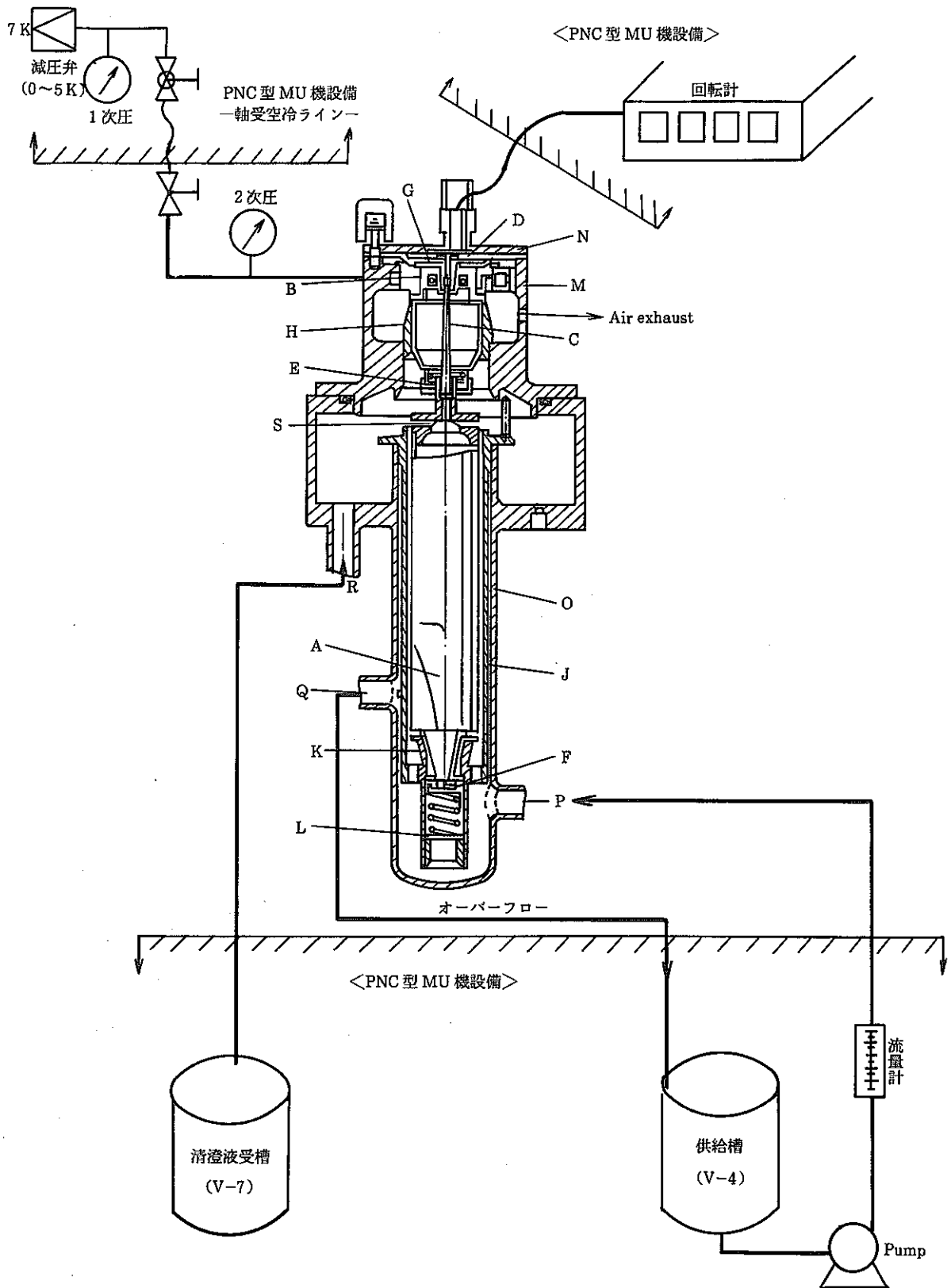


図 2.1.3 試験フロー図

2.2 試験手順

2.2.1 試験内容

S 60～61年度に実施した試験の概略を以下に述べる。

(1) 機械的性能試験

ボウル回転時の振動の程度，異常の有無の確認を目的とする。試験流体は水を使用，ボウル回転数，供給液量をパラメータとし，長時間運転，パラメータのステップ変化等を行う。表 2.2.1 に主な条件を示す。測定項目はボウル回転数，消費動力，ボウル振動幅，液リーク量，軸受温度である。

なお，以後の試験においても，上記の測定記録は行う。

(2) 清澄性能評価試験

各種運転条件下での清澄性能を測定し，最適運転条件検討のためのデータを得る。試験液として，水（常温又は40～50℃に加熱）又は砂糖水に，模擬不溶解残渣としてアルミナ，酸化セリウム等を分散させたものを使用し，これらの組成，及び回転数，供給液量等の運転条件をパラメータとして試験を行う。

表 2.2.2，2.2.4，2.2.6～2.2.7 に主な試験条件を示す。

(3) 二段組み合わせ試験

遠心清澄機を二段直列に配置することにより，清澄性能，機械的性能の改善が可能かどうかの検討を目的とする。

調整槽（V-4）で調製した試験液を清澄し，清澄液槽（V-7）に貯めた状態で，調整槽，供給系およびボウル内面を純水で洗浄した後，清澄液を調整槽へ移送する。この液を用いて，再度清澄操作を行う。この各ステップにおいて，清澄性能，ボウル振動等についての測定を行う。主な試験条件を表 2.2.5 に示す。

(4) ドーンレイ型性能試験

ドーンレイ型（英，VERO社製，付録3参照）遠心清澄機の性能評価のため，各種試験を行った。必要な駆動エア量，振動等について実測し，カタログとの比較を行った外に，表 2.2.3 に示す条件で，清澄機能の測定を行った。

なお，表 2.2.1～2.2.7 の配列は試験実施順に従っている。

2.2.2 試験液の選定

試験液組成の決定にあたっては、高速炉燃料再処理試験施設概念設計(Ⅲ)で与えられた予想値(表2.2.8参照)を基準とし、最近の文献等のデータを参考として検討を行った。

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ると考えられるのは、液、粒子の比重、液の粘性及び粒子径である。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。

$$V = \frac{dH}{dt} = \frac{g(\rho_p - \rho_l)}{18\eta} Dx^2 \quad \dots\dots\dots ①$$

遠心場においては

$$V = \frac{dR}{dt} = \frac{R\omega^2(\rho_p - \rho_l)}{18\eta} Dx^2 \propto \frac{(\rho_p - \rho_l)}{\eta} Dx^2 \quad \dots\dots\dots ②$$

$$K = \frac{\rho_p - \rho_l}{\eta} Dx^2 \quad \dots\dots\dots ③$$

- | | |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| ρ_p : 粒子密度 (g/cm ³) | g : 重力加速度 (cm/sec ²) |
| ρ_l : 液 " (g/cm ³) | R : 回転半径 (cm) |
| η : 液粘性 (Poise) | ω : 角速度 (rad/sec) |
| Dx : 粒子径 (cm) | V : 沈降速度 (cm/sec) |
| | H : 粒子位置 (cm) |

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Dxがある程度の分布幅を持つため、これを除く

$$K' = \frac{\rho_p - \rho_l}{\eta} \quad \dots\dots\dots ④$$

を一定とする事で模擬を行う事とした。表2.2.9に選定した試験液の主要物性を示す。実液のK'値を約3として、この値をもとに試験条件を定めた。

2.2.3 試験液の調整

試験液の調整の原則的手順を以下に説明する。

- (1) 原液槽 (V-4) にミリポアフィルタを経由して所定量の純水を張りこむ。

- (2) 液レベルを確認し、原液調整用に10ℓ程度を分取する。
- (3) 分散媒の量と試験条件（予定粒子濃度）に応じて、模擬粒子を秤量する。
- (4) 原液調整用に分取した分散媒に分散剤（ヘキサメタリン酸ナトリウム）を0.2wt %の割合（10ℓに対して20g）で溶解する。
- (5) 上記の液に模擬粒子を加え、十分攪拌した後、超音波洗浄器に1分間かける。
- (6) この液を原液槽内の分散媒で希釈し、試験液とする。
- (7) 原液槽攪拌機及び、ポンプによる液循環を行う。
(原液調整後、試験終了まで続行する)

2.2.4 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、粒子分布等の分析を行う。主なサンプルングポイントを図2.2.1に示す。また、サンプルング量と目的を表2.2.10に示す。

表 2.2.1 試験条件表 (その1)

- 機械的性能試験 Run 1~12 -

Run No	運転条件		備 考	Run No	運転条件		備 考
	回転数 rpm	給液量 l/hr			回転数 rpm	給液量 l/hr	
1	3000	0	4hr 連続	8	600~3300	0	回転数をステップ状に変化
2	3300	0	4	9	500~3300	60	
3	3000	100	4	10	500~3300	100	
4	3000	200	4	11	550~3300	200	
5	3000	420	4	12	500~3360	420	
6	3000	300	4				
7	3000	60	2				

表 2.2.2 試験条件表 (その2)

- 清澄性能試験(I) Run 101~103 -

Run No	試 験 液			運 転 条 件		
	模擬不溶解残渣	濃 度	分散媒	回転数 (rpm)	給液量 (l/hr)	
101	Al ₂ O ₃ (2.5μm)*	3g/l	水 (常温)	3000	100	
				3300		
102	Al ₂ O ₃ (1.3μm)*	3g/l	水 (常温)	3300	100	
				3000	"	
				"	150	
				"	200	
				2500	"	
				"	100	
103	Al ₂ O ₃ (1.3μm)*	3g/l	水 (常温)	3000	100	6 hr 連続運転

*メーカ公称粒子径

表 2.2.3 試験条件表 (その3)

-ドーンレイ型性能試験 Run 104-

	試 験 液			運 転 条 件			
	模擬不溶解残渣	濃 度	分散媒	回転数 (rpm)	給液量 (ℓ/hr)		
104	/			水 (常温)	20000	100	
	Al ₂ O ₃ (1.3μm)	3g/ℓ	"	9500~ 25000	60	昇速	
				25000	60		
				20000	60		
				25000	100		
				20000	100		

表 2.2.4 試験条件表 (その4)

- 清澄性能試験(II) Run105~108 -

	試 験 液			運 転 条 件	
	模擬不溶解残渣	濃度(g/l)	分散媒	回転数 (rpm)	給液量 (l/hr)
105	Al ₂ O ₃ (1.3 μ m*)	3	純水+砂糖 (250g/l) 1.7 cP	3000	100
106	"	"	純水 (常温)	3300	100
				3000	100
				"	150
				"	200
				2500	200
				"	100
107	"	"	純水 (常温:1.0cP)	3000	100
				"	150
				"	200
				2500	"
				"	100
			純水 (60°C:0.5cP)	2500	100
				3000	100
				"	200
				"	250
				2500	200
				"	100
				2000	100
				"	200
				"	200
108	CeO ₂ (0.85 μ m)* (7.3g/cm ³)	3	純水 (常温)	3000	100
				"	150
				"	200
				"	250
				3300	100
				2500	100
				"	200
				"	250
				2000	250
				"	200
				"	100

* メーカー公称粒子径

表 2.2.5 試験条件表 (その5)

-二段組み合わせ試験 Run 109~111-

Run- No	試 験 液			運 転 条 件	
	模擬不溶解残渣	濃度(g/l)	分散媒	回転数 (rpm)	給液量 (l/hr)
CC-109 109-1	Al ₂ O ₃ * (1.3μm)	3	純水 (常温)	3000	100
109-2	109-1 清澄液を使用			3000	100
CC-110 110-1	Al ₂ O ₃ * (1.3μm)	3	純水 (常温)	2000	100
110-2	110-1 清澄液を使用			3000	100
C11 CC111-1	Al ₂ O ₃ * (1.3μm)	3	純水 (常温)	2000	100
111-2	111-1 清澄液を使用			3300	100

表 2.2.6 試験条件 (その6)

-清澄性能試験(Ⅲ) Run CC-112-

Run- No	試 験 液			運 転 条 件	
	模擬不溶解残渣	濃度(g/l)	分散媒	回転数(rpm)	給液量(l/hr)
CC-112	Al ₂ O ₃ * (0.4μm)	3	純水 (常温)	3000	60
				"	100
				"	150

表 2.2.7 試験条件表 (その7)

-外乱応答特性検討試験 Run CC-113-

Run- No	試 験 液			運 転 条 件		
	模擬不溶解残渣	濃度(g/l)	分散媒	回転数(rpm)	給液量(l/hr)	
CC-113	Al ₂ O ₃ * (0.4μm)	3	純水 (常温)	3000	100	給液停止再開時の 挙動検討

*メーカ公称粒子径

表 2.2.8 清澄工程対象溶液の特徴

処理量	120 kg/day
残渣量	2 kg/day
スラッジ濃度	3 g/l
溶解液密度	1.4 g/cm ³
溶解液粘性	1.7 cP
スラッジ密度	7 g/cm ³
スラッジ主要組成	Mo, Tc, Ru, Rh, Pd
スラッジ粒径	1~2 μm (平均値 1.5 μm 程度)

表 2.2.9 試験液の主要物性

	模 擬 粒 子			分 散 媒			K' 値	備考 (Run-No)
	品 名 *1	密度 g/cm ³	平均粒径*2 μm	品 名	比重	粘性 cP		
	Al ₂ O ₃ 1.3 μm	3.99	~1.6	純水 (常温)	1.0	1.0	≈3.0	CC-102,103,104 106,109,110,111
				純水 (60°C)	0.9	0.5	6.2	
				砂糖溶液 (常温)	1.3	1.7	1.6	
	Al ₂ O ₃ 2.5 μm	"	1.9	純水 (常温)	1.0	1.0	≈3.0	CC-101
				0.4 μm	"	0.68	"	"
	CeO ₂ 0.85 μm	7.3	0.75	"	"	"	6.3	CC-108
実液	Mo Tc Ru Rb Pd等	7	(1.5 μm)	U,PPu 硝酸溶液	1.4	1.7	3.3	—

*1 粒子径はメーカー公称値

*2 粒径分布は図 2.2.2 (a~d) 参照

表 2.2.10 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)	200cc	粒子濃度/粒径分布	原液調整結果 (粒子濃度及び粒子分散状態) の確認
S-2	供給液 (CCI-t) t:サンプリング時間	"	"	捕集効率の検討及び清澄前後の粒径分布の変化, 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	"	
S-4	" (V-7)	"	"	平均的捕集効率の算出, 粒径分布の代表サンプルとして使用
S-5	スラッジ (V-8)	200cc	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

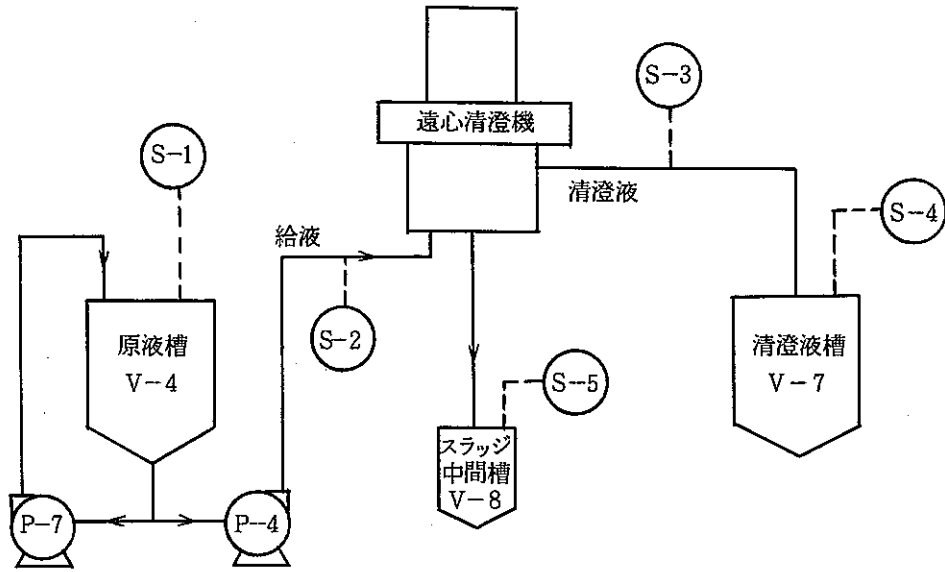
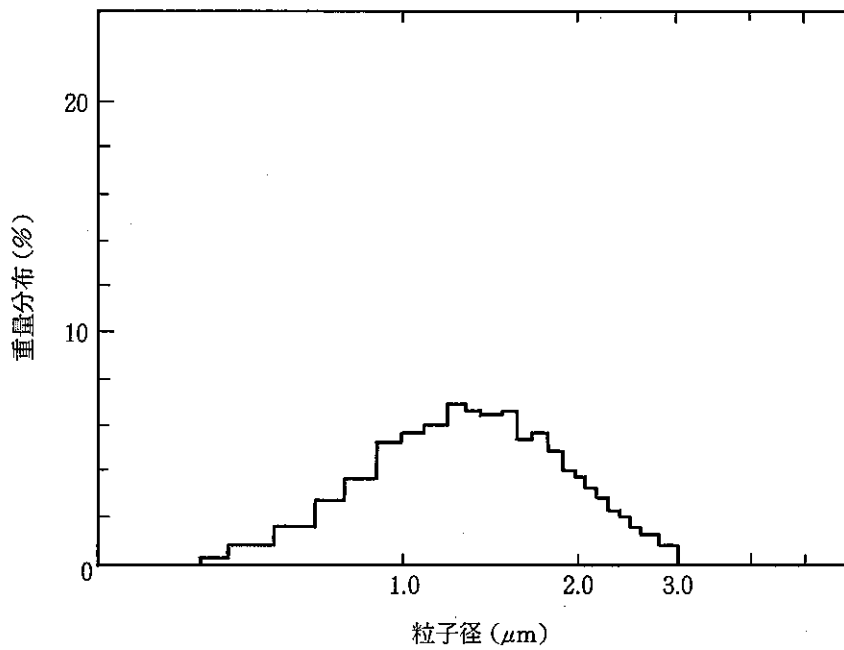
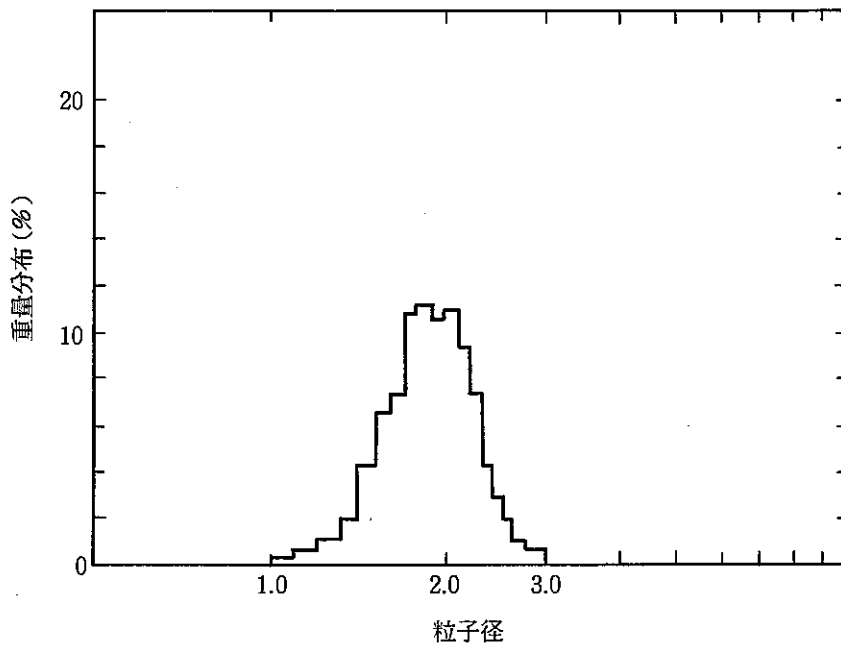


図 2.2.1 主なサンプリング点



a) 熔融アルミナ (1.3 μm)



b) 熔融アルミナ (2.5 μm)

図 2.2.2 模擬不溶解残渣の粒子径分布 (1/2)

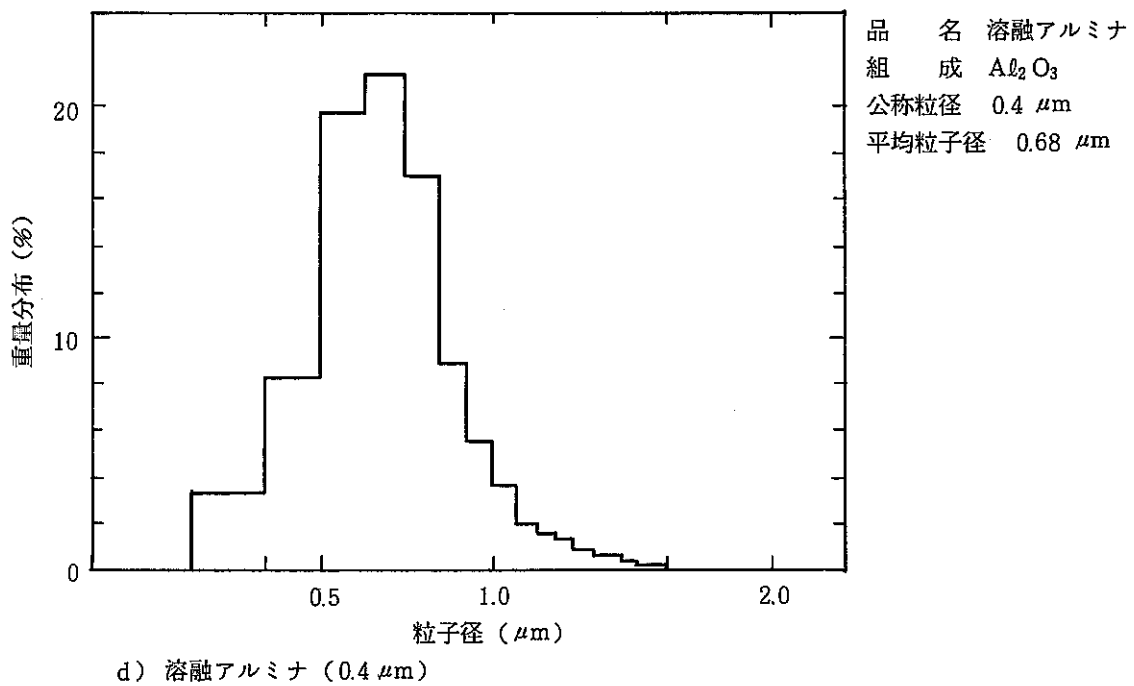
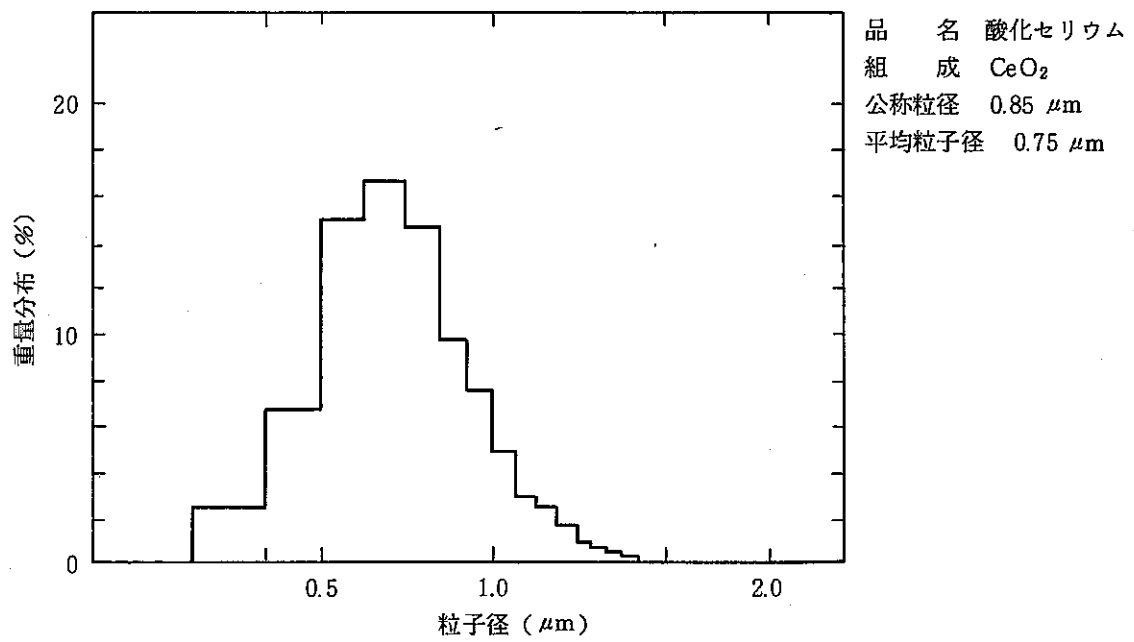


図 2.2.2 模擬不溶解残渣の粒子径分布 (2/2)

2.3 分析方法

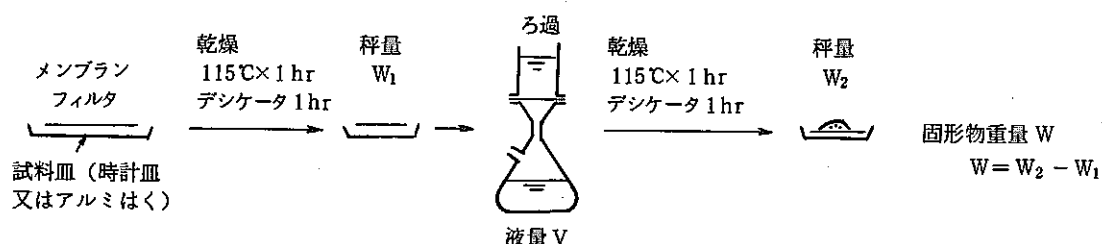
2.3.1 分析内容

遠心清澄機試験サンプルについて、主に粒子濃度と粒径分布の測定を行う。前者は清澄液と原液の濃度比から全体捕集効率を算出する。さらに後者のデータを加えて部分捕集効率（付録3参照）を算出する。

2.3.2 粒子濃度分析

液中粒子濃度の分析は重量法（JIS K0102準拠）によった。

一定量のけん濁液を、予め重量を測定したメンブランフィルタ（ろ過精度0.1~0.2 μm：試料皿とともに秤量）でろ過し、乾燥後秤量する。ろ過前後の重量差を固形分量とみなすことができるのでもとのけん濁液の粒子濃度が算出できる。



粒子濃度 $C_p = \frac{W}{V} = \frac{W_2 - W_1}{V}$ となる。

ろ過する液量は、試験液等の高濃度の液については100~200ml、ろ液等の低濃度の液は1~2ℓとする。

2.3.3 粒径分布測定

液中のけん濁粒子の粒子径分布は以下の方法で行った。

使用機器

- ・エルゾーンパーティクルカウンター 80XY型（米，パーティクルデータ社）

詳細な測定方法については、上記装置取扱い説明を参照。

注）本装置使用にあたって電解液（6%NaCl）、洗浄水（純水）等が必要であるが、測定時の誤差を抑制するため、いずれも、あらかじめ、ろ過処理（0.2 μm, 0.1 μmのフィルタで各一回）を行っておく必要がある。

2.4 測定方法

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)
- (2) ボウル振動幅：レコーダ出力（X, Y方向）を ”
- (3) 軸受温度：レコーダ出力（上, 下軸受, 気温）を一定時間毎に記録
- (4) 消費動力：計器盤の電圧計, 電流計の指示値を ”
- (5) 供給液量：給液ライン上の流量計指示値を ”

3. 試験結果および考察

3.1 機械的性能

3.1.1 ボウル振動の検討

運転時のボウル振動、軸受の健全性について予備的検討を行うため、水運転を行い、以下の結果を得た。

図3.1.1に示すように、ボウル振動幅*(スラッジによるアンバランスのない状態で)は回転数に比例して増大する。又、ボウルが空の場合と水で満たされた場合で特に差は見られなかった。ただし、給液量を変えた場合、図3.1.2に示すように、給液量の増加とともに、若干ボウル振動幅が増加する傾向が見られた。これはノズルから水が吹きつけられることによる衝撃等に起因すると考えられるが、影響は非常に小さい。

従って、ボウル内部にアンバランスが生じない限り、ボウル振動は回転数に比例するとみなすことができる。

次に、ボウル内にスラッジが捕集された場合の挙動について考えてみる。図3.1.3及び3.1.4に、スラッジ捕集にともなうボウル振動の変化の例を示す。ほとんどの場合、ボウル振動はスラッジ捕集量に比例して増大した。増加割合には、かなりのばらつきがあるものの、定格(3,000rpm)での増加傾向から推定して、設計限界である振動幅0.6mm^{P-P}に対応する捕集量は2.4~3.4kgであり、設計値2.0kgを十分満足する。

ただし、一例のみであるが、2,000rpmでの運転時に振動幅が加速度的に増加した例があった。(図3.1.4参照)これは、スラッジの不均一な付着により、回転に偏りが生じ、遠心力がボウル周方向の位置によって微妙に異なった結果、偏りを増加する位置にスラッジが捕集されていったためと思われるが、再現性がないため、確認は行っていない。しかし、この現象が生じた場合、設計値よりも少ない捕集量でボウル振動が限界に達する可能性があるため、その発生可能性等について今後の検討が必要である。

* 付録1参照

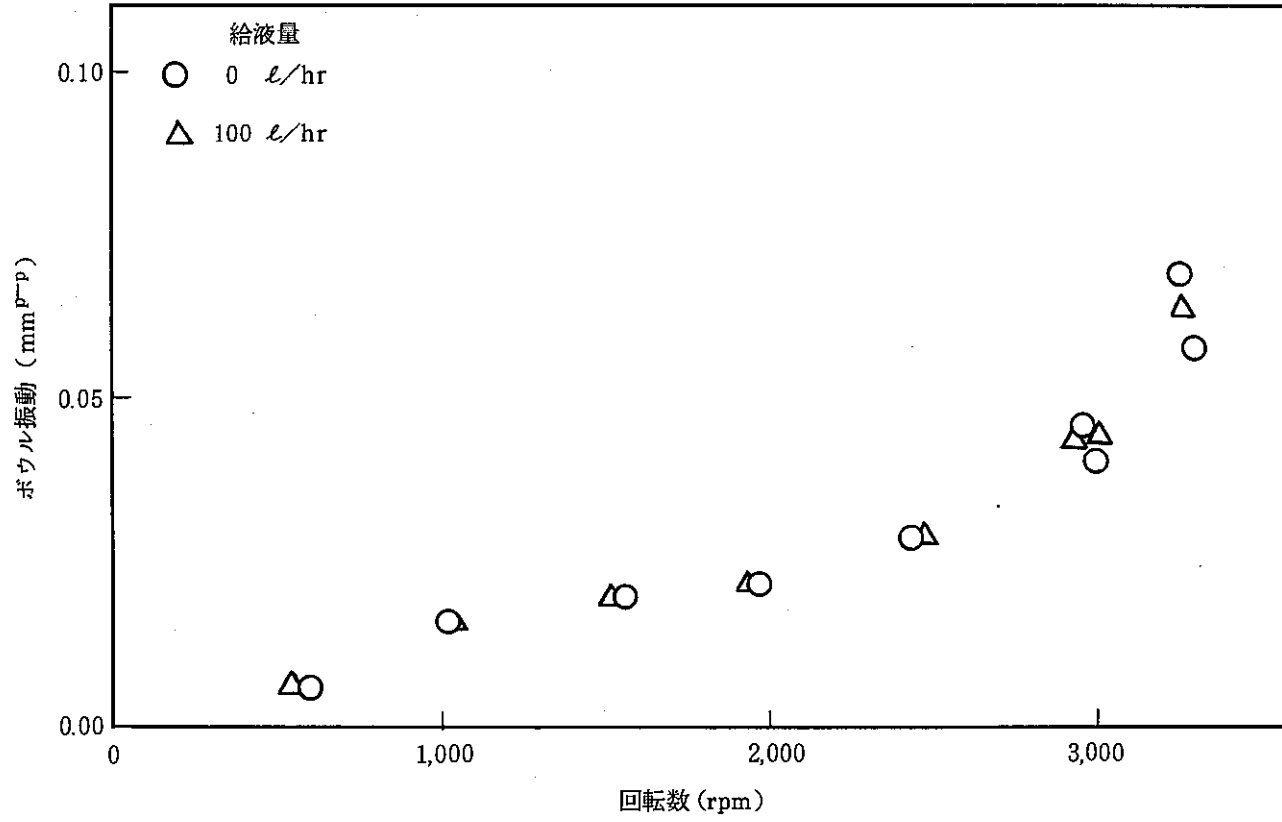


図 3.1.1 ボール振動に対する回転数の影響

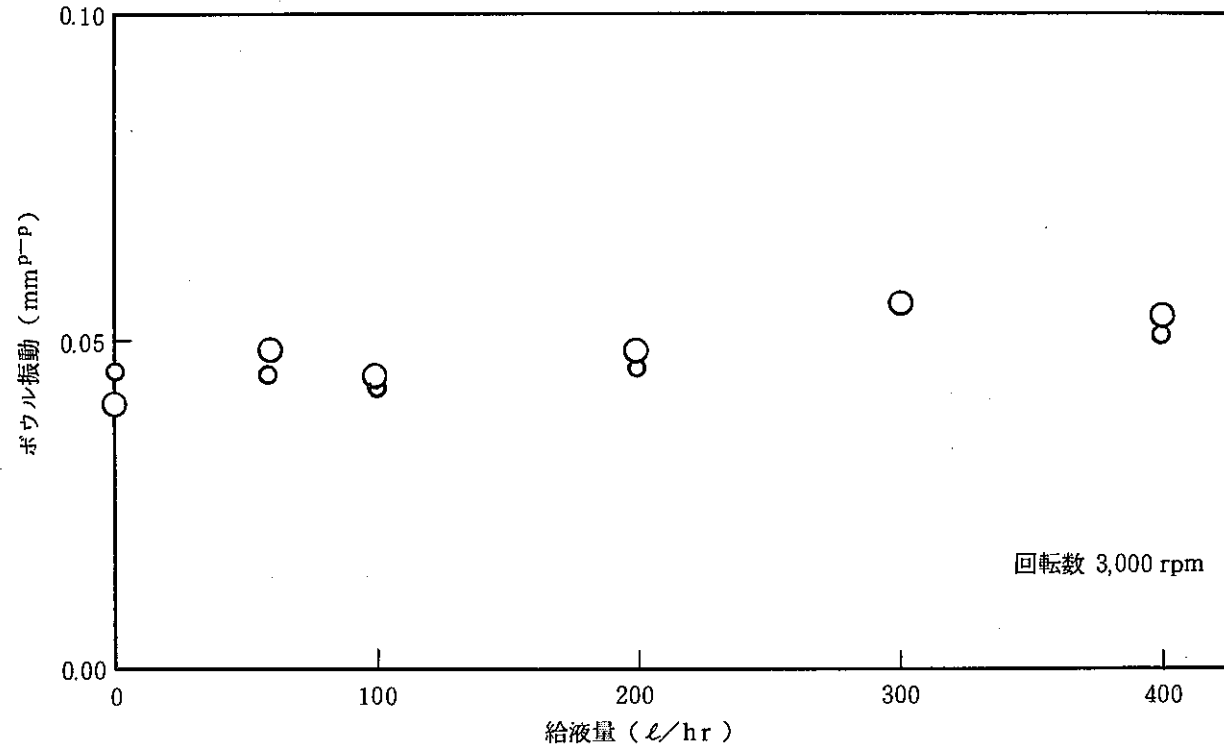


図 3.1.2 ボール振動に対する給液量の影響

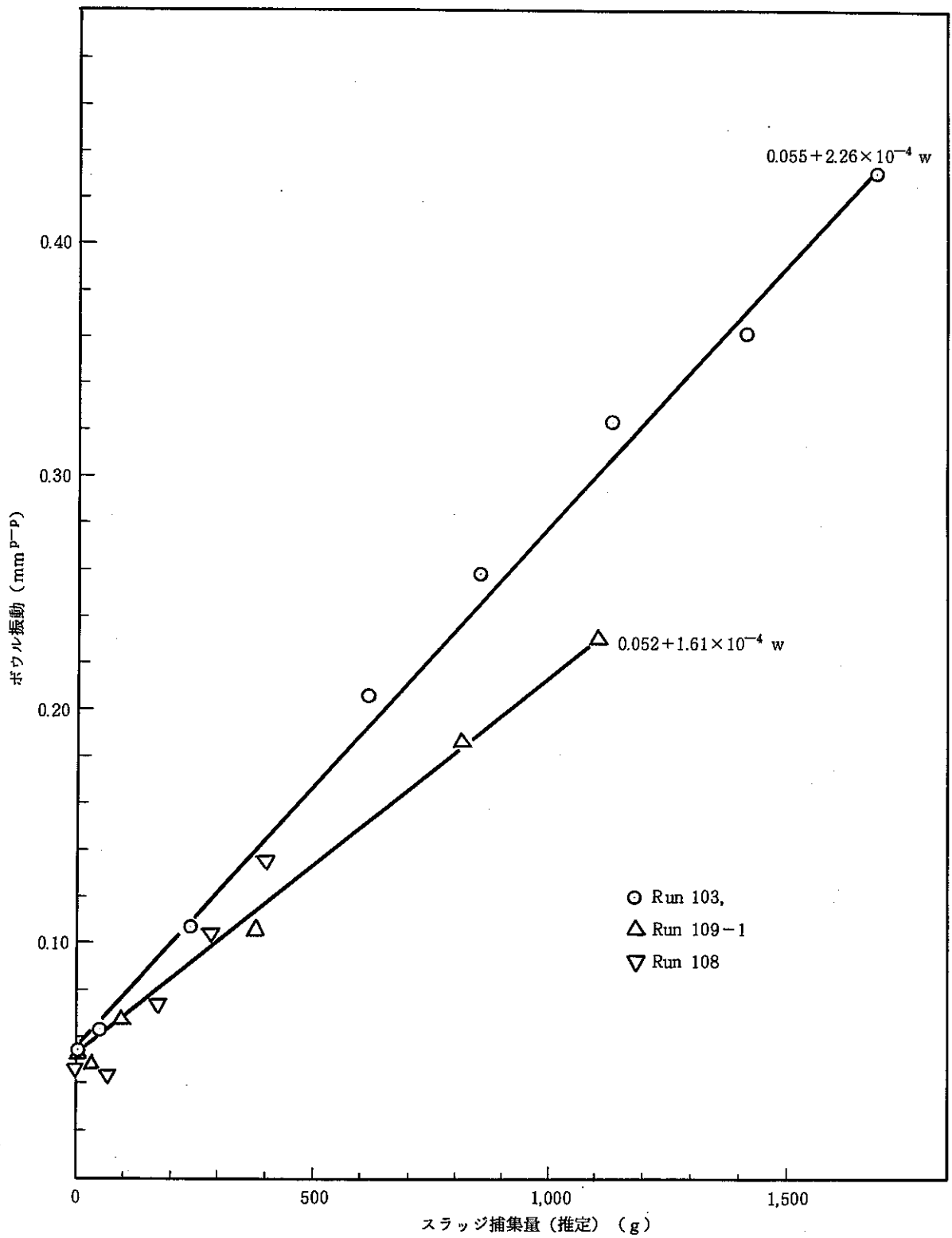


図 3.1.3 ボール振動に対するスラッジ捕集量の影響 (3,000 rpm)

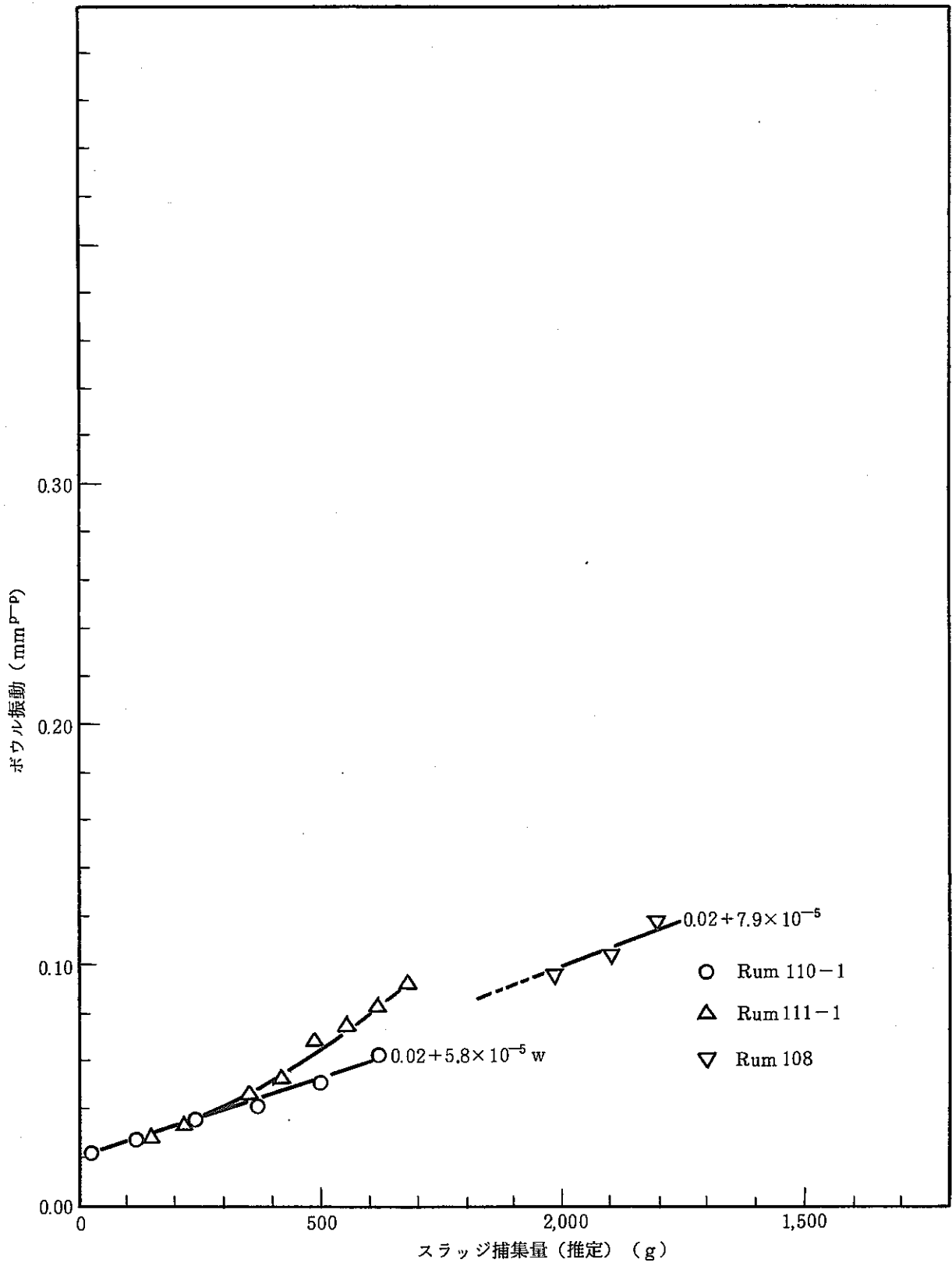


図 3.1.4 ボウル振動に対するスラッジ捕集量の影響 (2,000 rpm)

3.1.2 給液のリーク率

PNC型遠心清澄機の給液部の概略構造を図3.1.5に示す。この図からわかるようになんらかの原因でボウル内液面に到達しなかった又は液面ではじかれた液はスラッジ排出ラインに流れ、失われることになる。このロス分の、給液量に対する比をリーク率と呼ぶことにする。水試験時のリーク率の実測値を図3.1.6に示す。

給液量が100ℓ/hrを下回ると急激にリーク率が増大する。これは、給液量の減少にともなってノズルから吐出する際の液流速が低下した結果、液の一部がボウル内端まで届かなくなるものと考えられる。逆に、定格(100ℓ/hr)から給液量が増大するにつれてリーク率は徐々に増加する。これは、液の線速度の増大にともなって液面ではねかえりが増すためと考えられる。今後ノズルの改良又は給液方法の改良により定格近辺でのリーク率を減少することが必要と考えられるが、本遠心清澄機は、保守方式の関係で給液ノズルとボウル間にある程度のクリアランスを必要とするため、常に一定程度のリークをみこまざるを得ない。例えば、リーク率を0.1%まで減少したとしても、1バッチ当たりの処理量600ℓに対し、0.6ℓとなる。この中に含まれるU、Pu量は約120g(200g/ℓと仮定)となり、これがスラッジ側(高レベル液体廃棄物)へ失われるとすれば問題である。従って実機設計の場合には運転中にスラッジ側に流れた液を回収し、リサイクルするためのラインを加えることが必要と考えられる。このような機構は運転中の動力喪失によりボウル内のプロセス液がスラッジ側に流れる等の事故を防止するという見地からも有効と考えられる。

なお、リーク率減少のため、口径4mmφの予備ノズルが試作されているため、今後これをもちいた試験を予定している。

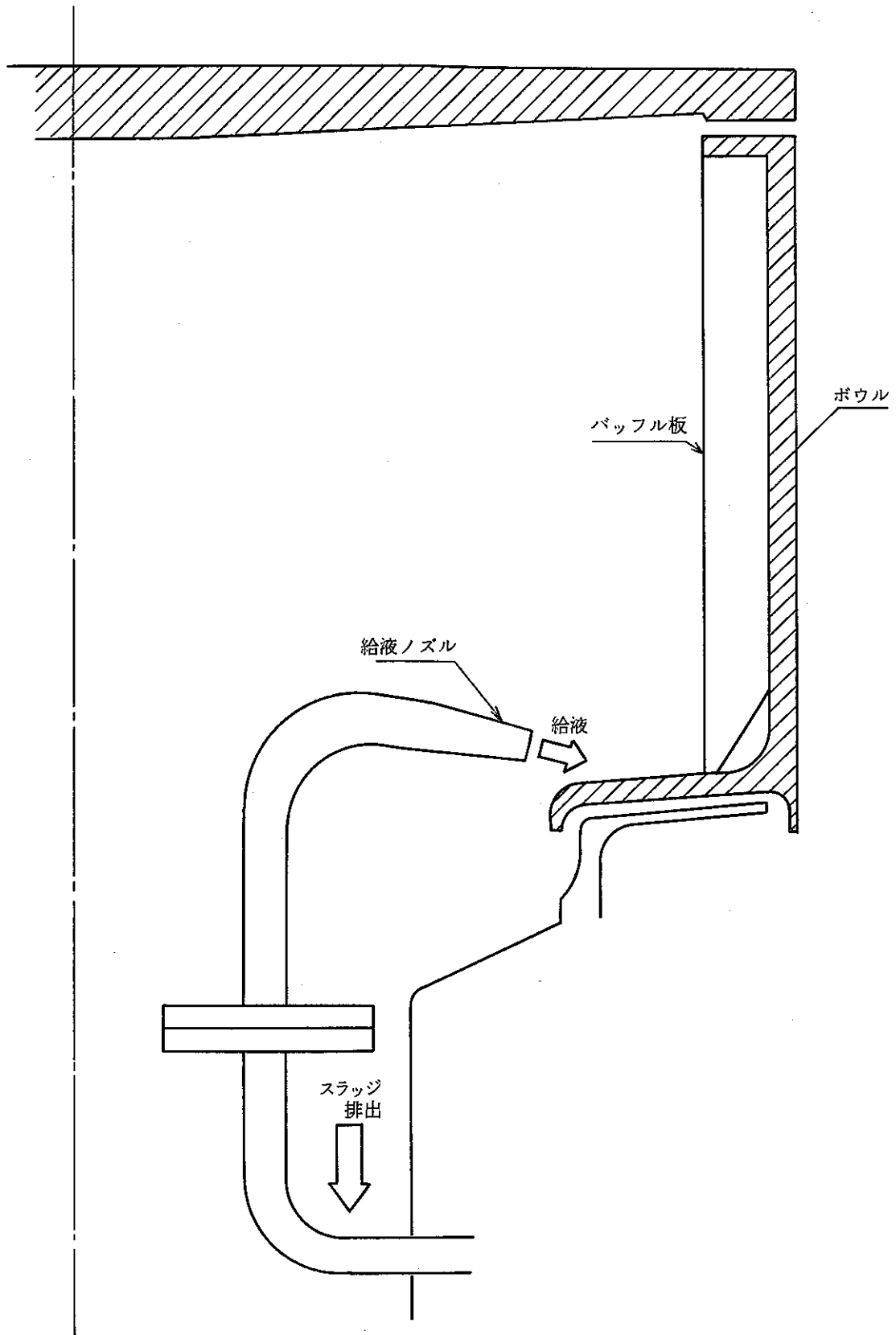


図 3.1.5 遠心清澄機給液ノズル部の概略

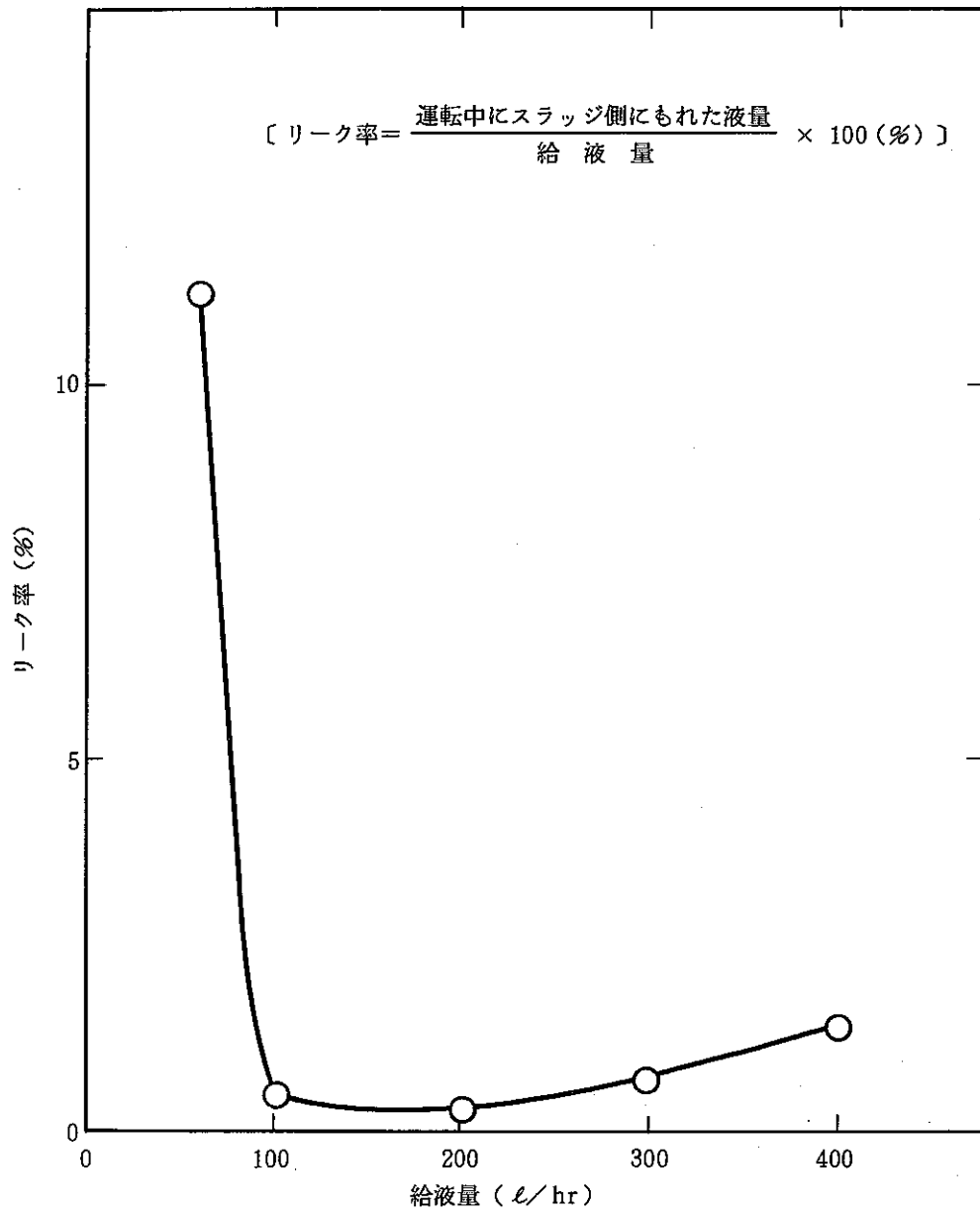


図 3.1.6 リーク率に対する給液量の影響

3.2 清澄性能

3.2.1 清澄性能の安定性

図3.2.1は全体捕集効率の経時変化を示す。高速炉燃料再処理施設における一バッチを想定し、計600ℓ（供液流量100ℓ/hr）の処理を行った所、捕集効率に特に変動は見られなかった。当初、捕集されたスラッジの厚み（6mm/2kg）の影響でボウル内の液（厚み15mm）の流れが乱れたり、一たん沈降したスラッジをまきあげ、経時的に捕集効率が悪化するのではないかと考えられていたが、この結果から見るかぎりそのような傾向はないと考えられる。

一方、運転開始後、清澄性能が安定するのに必要な時間は図3.2.1からわかるように5分以内である。液の平均滞留時間（3分）を考慮しても比較的短時間で安定するといえる。

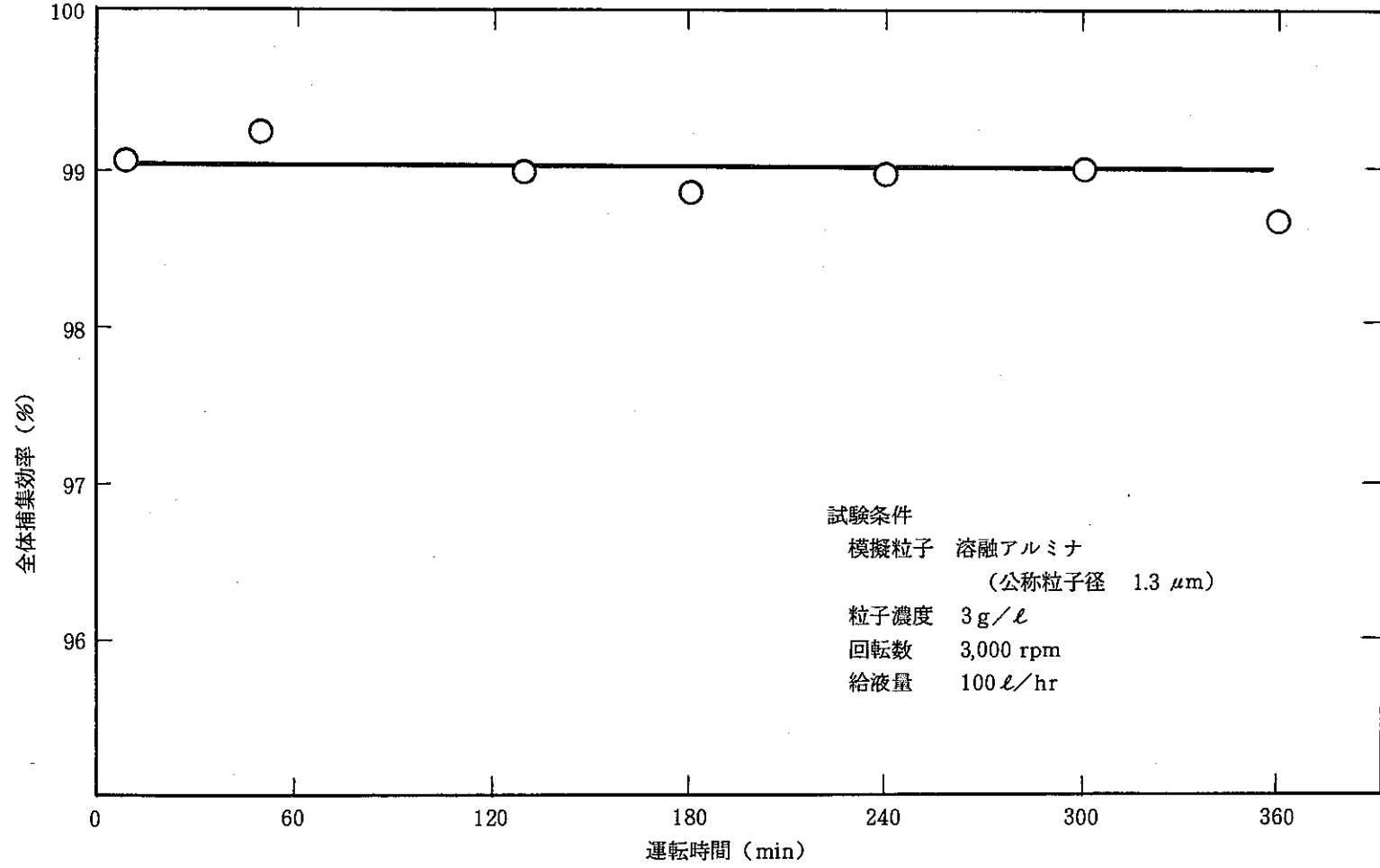


図 3.2.1 全体捕集効率の経時変化

3.2.2 運転条件の検討

本装置の設計にあたり、プロセス設計側要求にもとづいて定格運転条件を回転数3,000rpm、供給液量100ℓ/hrとした。これらの数値の妥当性の検討及び最適運転条件の検討を行った。

(1) 清澄性能に対する回転数の影響

本装置の定格回転数は3,000rpmであるが、装置軸受けの寿命の見地からは、より低回転であることが望ましい。図3.2.2～3.2.3は全体捕集効率に対するボウル回転数の影響を示す。同一粒子に対して、回転数の増加とともに捕集効率が向上した。回転体の壁面での加速度は回転数の二乗に比例する。すなわち、回転数の増加にともなって一定時間内により細かな粒子が沈降しうることになる。(付録2参照)従って、同じ粒径分布を有する粒子に対して、回転数を上げるほど捕集効率は向上するはずであり、試験結果は妥当といえる。また、平均粒径1.6μm(実測)の粒子に対し、3,000rpmで捕集効率99%は設計値を満足する。ただし、これ以下に回転数を下げるとは捕集効率維持の見地から望ましくない。

なお、機械的安全性の見地から、本装置の回転数は3,300rpmを上限としているため、これ以上の領域での試験は実施しなかった。

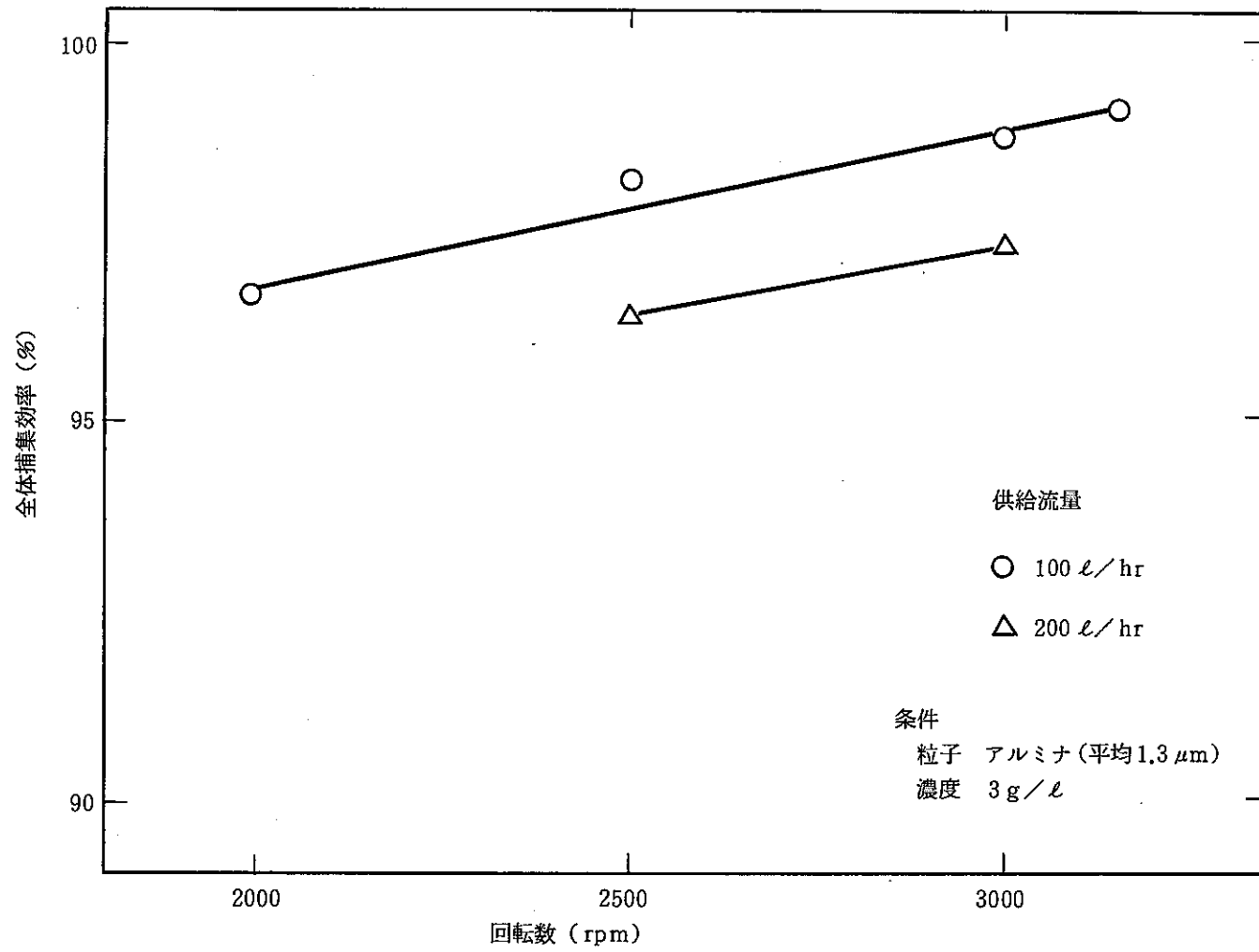


図 3. 2. 2 捕集効率に対する回転数の影響 (アルミナ: 密度 4 g/cm³)

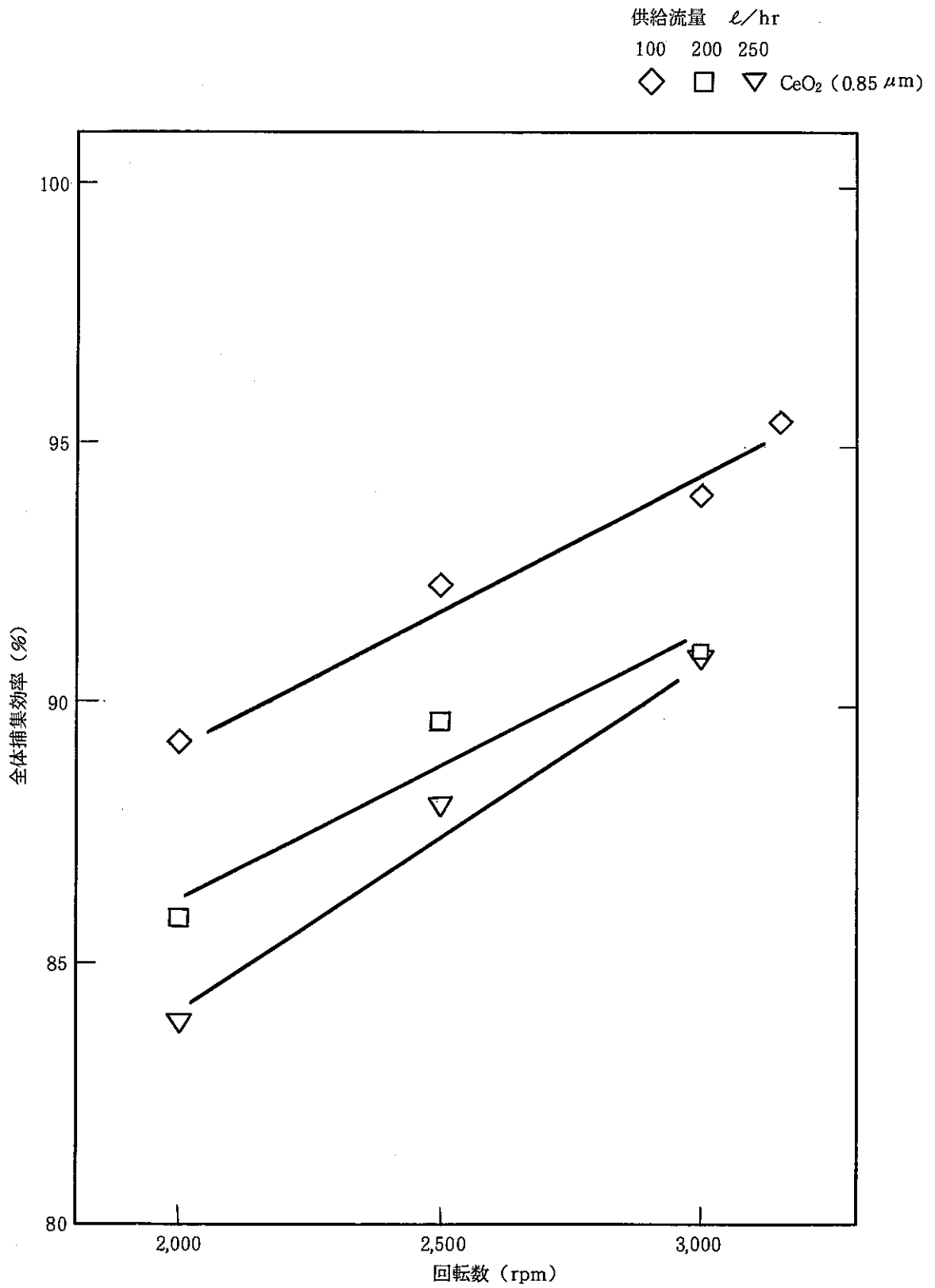


図 3.2.3 捕集効率に対する回転数の影響 (酸化セリウム: 密度 7.6 g/cm³)

(2) 供給液量の影響

全体捕集効率に対する供給液量の影響を図3.2.4に示す。捕集効率は供給流量が増すにつれて低下する。この原因は、ボウル内の平均液滞留時間が流量に反比例して減少するためと考えられる。

試験方法の項(§2.2.2)に示すように、模擬粒子：アルミナ(1.3 μm)の場合が実際の条件(実液中の不溶解残渣)をもっともよく模擬していると考えられる。このデータにもとづくと、供給液量100 ℓ /hr以下の場合に99%以上の捕集効率を得ることができることになる。ただし、プロセス上の要求、機械的特性(§3.1.2 リーク率の評価)等から既設の装置で給液量を100 ℓ /hr以下とすることは望ましくないため、本装置の場合、供給流量100 ℓ /hr前後が最適ということになる。

なお、不溶解残渣の粒径が1 μm 以下であった場合、本装置で捕集効率99%を達成しようとするならば、少なくとも数10 ℓ /hrのオーダまで給液量を減少しなければならないと考えられる。

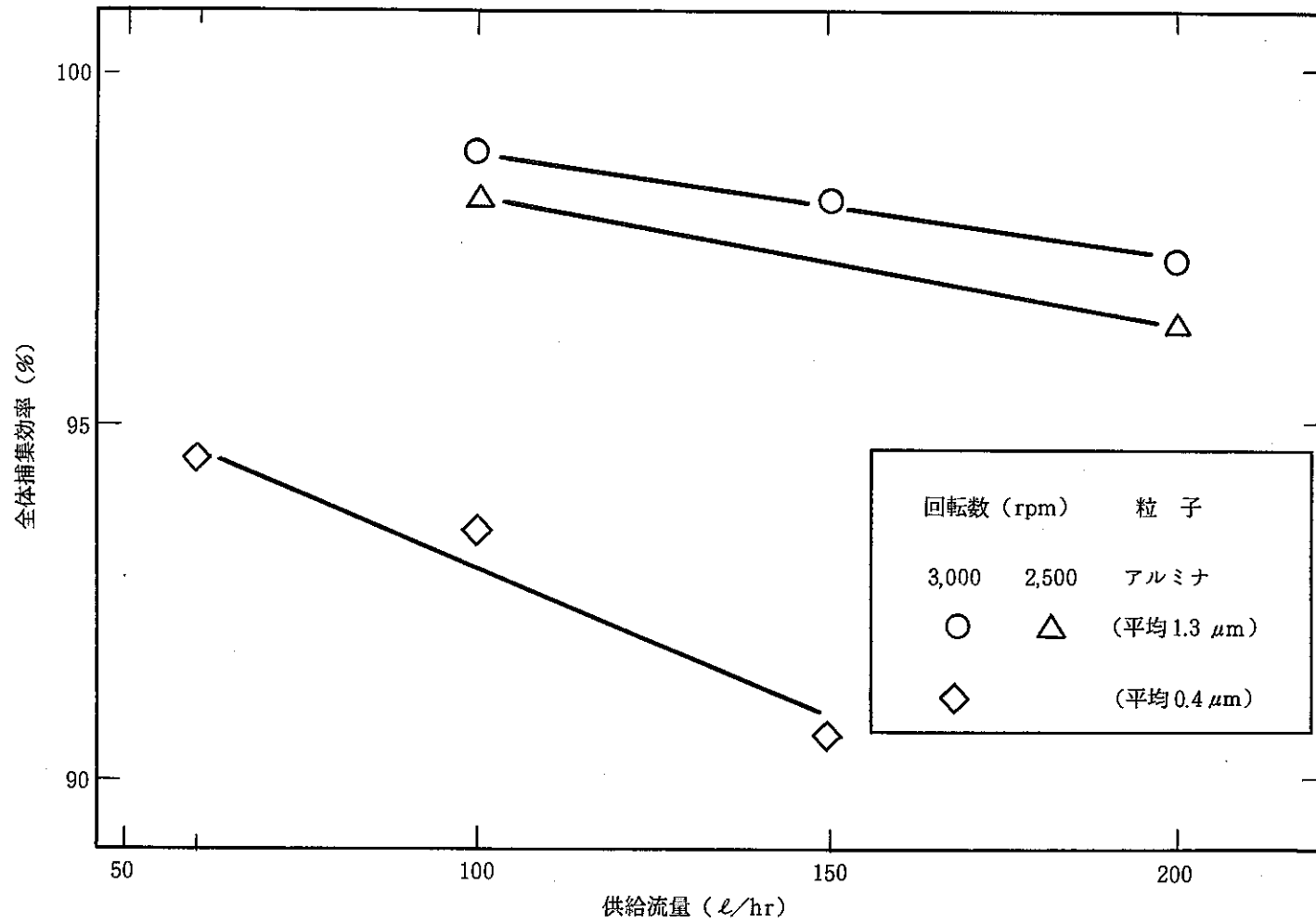


図 3.2.4 捕集効率に対する供給液量の影響

3.2.3 試験液液性の検討

試験液（液及びスラッジ）の液性については、§ 2.2.2 に示すように密度差、粘性比及び粒径分布を推定値と一致させることにより模擬を行ったが、実液との間に若干の相違があるものと考えざるを得ない。

そこで各パラメータを変化させた場合、結果にどの程度の相違が生じるかという点について検討してみた。

(1) 試験液の粘性

図 3.2.5 に全体捕集効率に対する液粘性の影響を示す。粒子の沈降速度は液の粘性に反比例することから予想できるように、液粘性の減少にともなって捕集効率が向上する。

ただし、図からわかるように、粘性の影響は比較的小さく、実液との間に10%の相違があったとしても、その影響は、全体捕集効率の差0.2%以内であるため、模擬の精度はさほど問題ではないと言える。

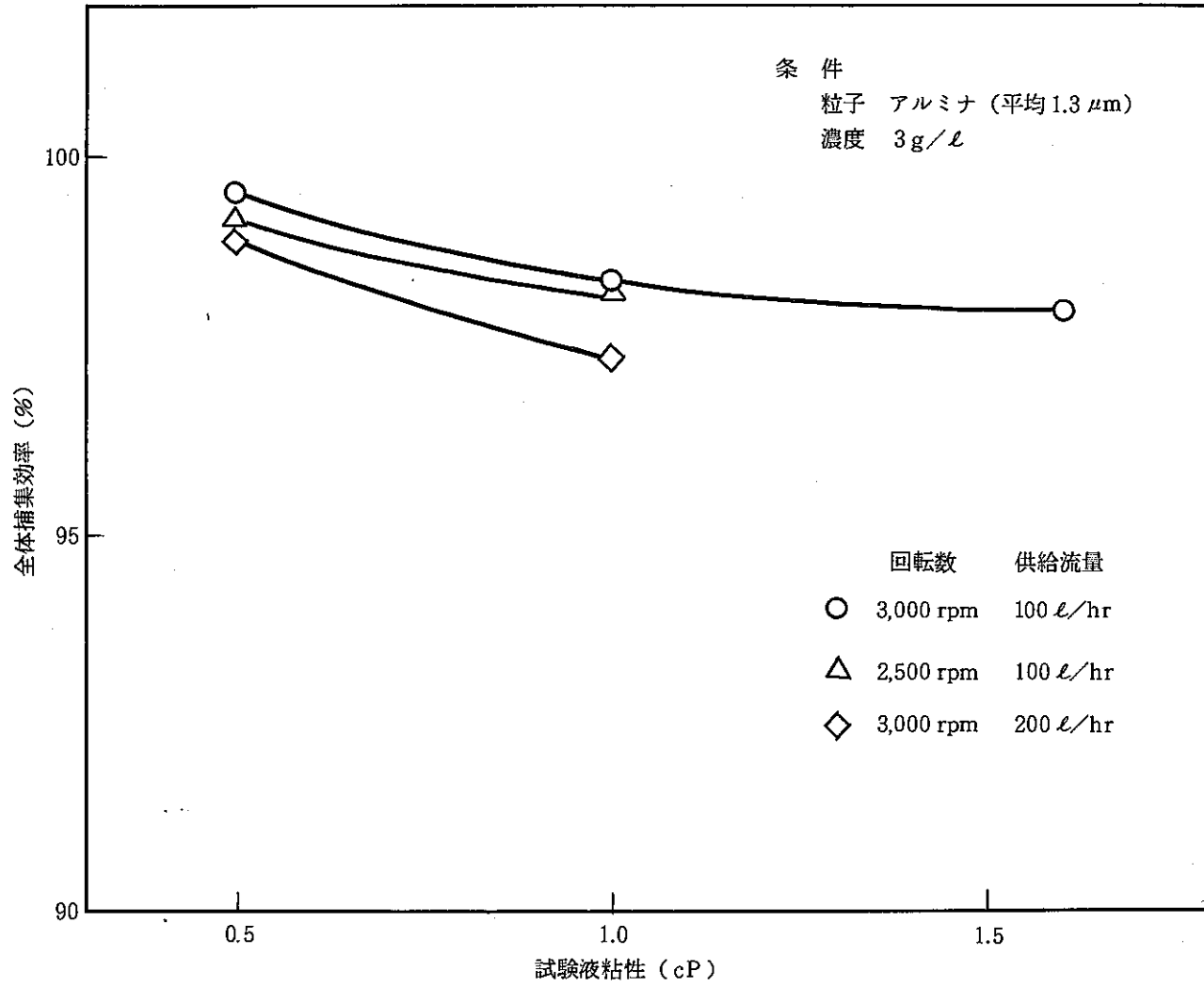


図 3.2.5 捕集効率に対する試験液粘性の影響

(2) 模擬粒子の粒子径の影響

図 3.2.6 に、全体捕集効率に対する平均粒子径の影響を示す。図からわかるように、模擬粒子の平均粒子径の差が捕集効率に及ぼす影響は大きく、1～1.5 μm の範囲で0.1 μm 径が小さくなると1%以上効率が低下する。粒子の選定の項(§ 2.2.2)で述べたように、実際の不溶解残渣の粒子径が1.5 μm 前後であれば、捕集効率は99%程度と十分な値であるが、この値はあくまで推定値である。

又、CPFでの測定によると、1 μm 前後又はそれ以下とする意見もあるが、この場合捕集効率は95%ないしはそれ以下となる。

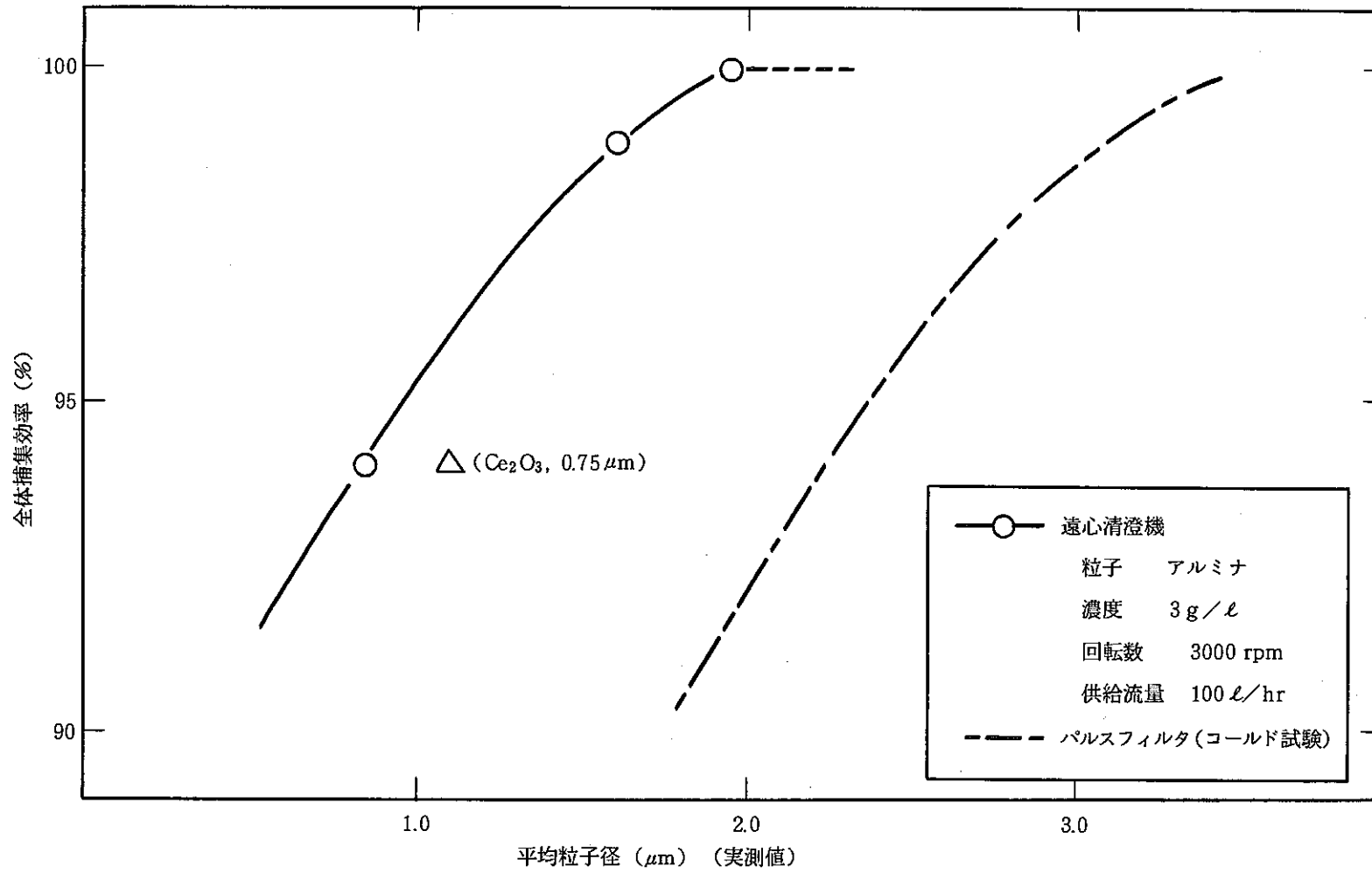


図 3. 2. 6 捕集効率に対する平均粒子径の影響

3.3 二段組み合わせ試験

3.3.1 清澄性能

各段単独及び総合的な捕集効率*を図3.3.1に示す。一段目の捕集効率はいずれの場合も単段の場合と同様で妥当なものといえる。これに対して二段目の捕集効率は極端に低い。この原因は給液中のスラッジの粒子径分布の変化によるものである。図3.3.2にRun110 (2,000/3,000rpm)における一段目給液、清澄液及び二段目清澄液の粒子径分布を示す。一段目の清澄により粒子径分布は小粒径側に偏り、平均粒子径も $1.6\mu\text{m}$ から $0.9\mu\text{m}$ まで減少している。この粒子が二段目に対して供給されるわけであるが、図3.2.6に示した粒子径に対する捕集効率のデータと比較して平均粒子径 ($0.9\mu\text{m}$) に対する捕集効率が80%というものは若干低い。これは、粒径の分布がよりせまいという理由によるものと考えられる。

次に総合的な捕集効率について検討する。参考のために示した単段の場合の値 (Run CC-104, 98~99%) と比較すると、0.5~1%程度良いが、3.2.2(2)で述べたように、単段で供給液量を1/2にしても同様の効果が得られる程度の差であり、組み合わせの本来の目的である清澄性能の向上という意見からは、さほど効果がみられない。

* 付録1 用語集参照

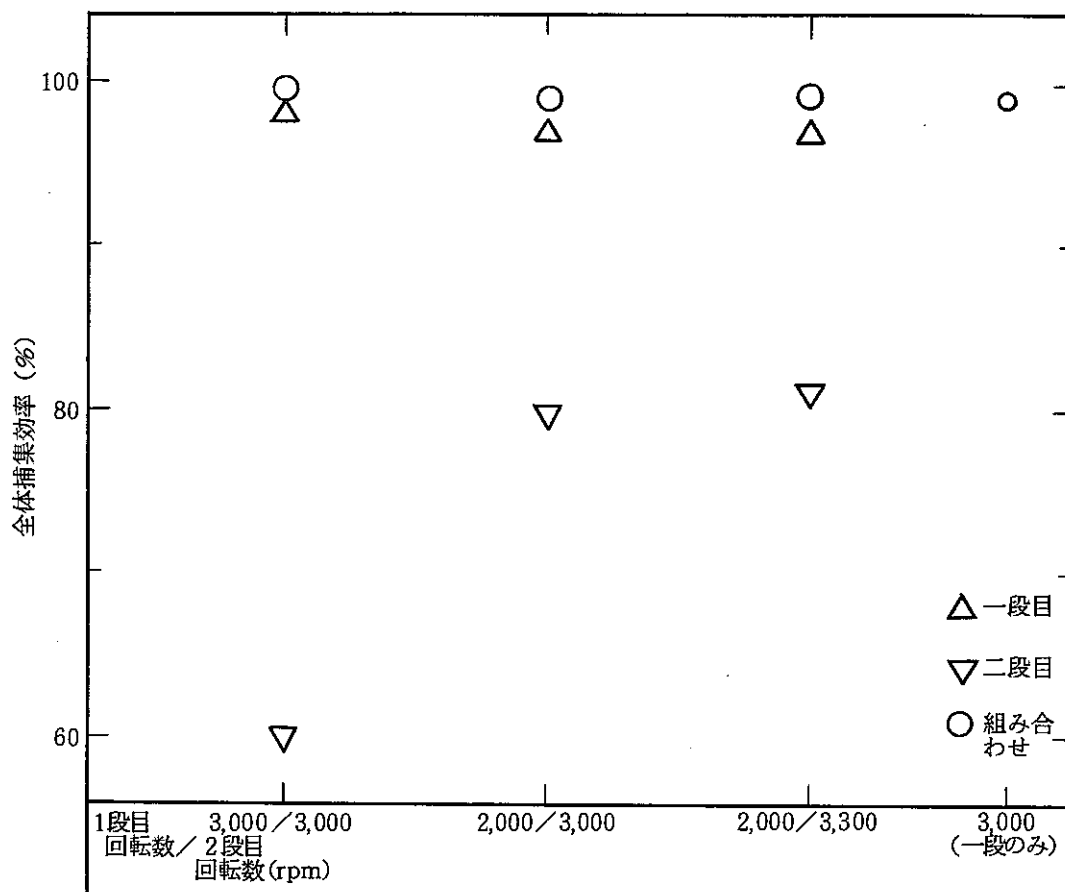


図 3. 3. 1 二段組み合わせ時の全体捕集効率

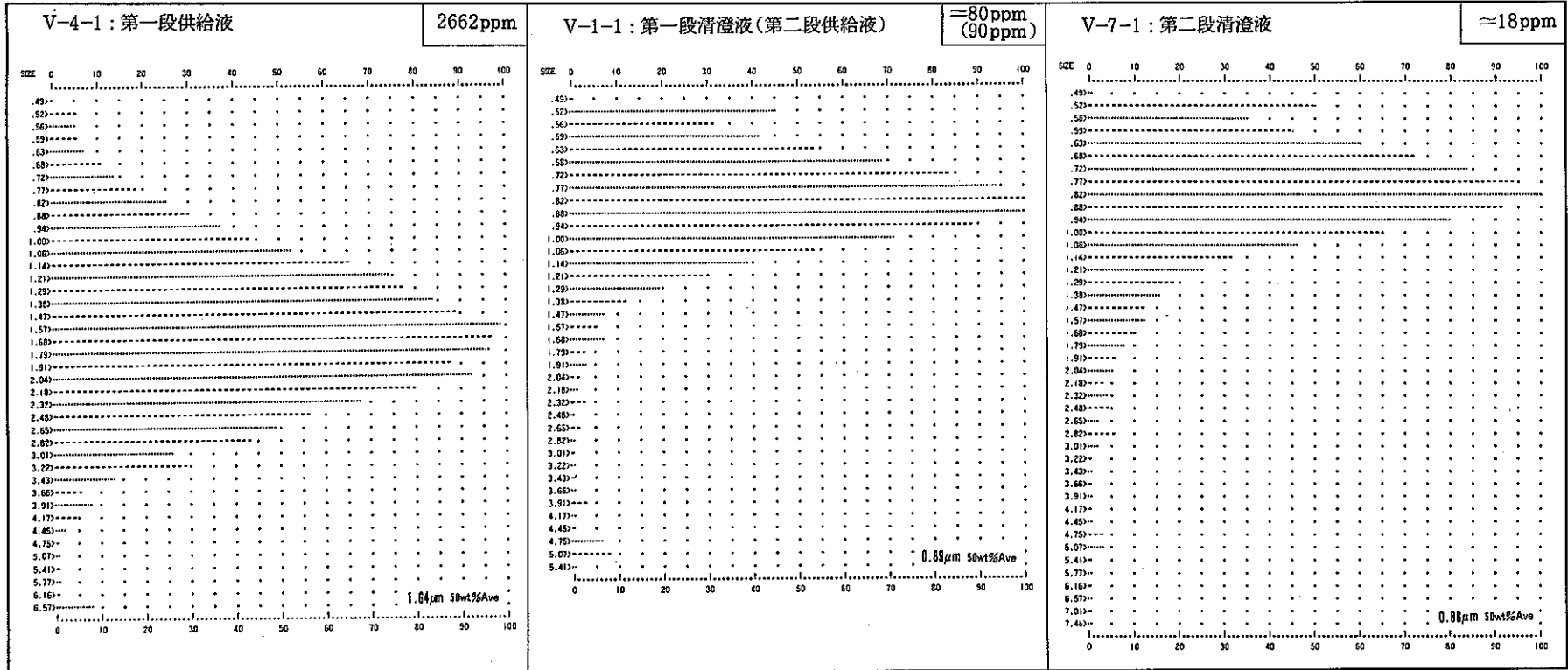


図 3. 3. 2 粒子径分布の変化 (Run 110)

3.3.2 機械的性能

図3.3.3に一段目、図3.3.4に二段目の場合のボール振動の変動を示す。一段目のボール振動は単段の場合と同様（図3.1.3及び図3.1.4参照）であったが、二段目についてはほとんど振動が増大せず、空運転時と同様の値であった。これは、給液中の粒子濃度が低い（100～200ppm）ことに加え捕集効率も低く、ボールに捕集されるスラッジの量が処理液量に対して少ないためと考えられる。

3.3.3 評価

以上に述べたように、二段組み合わせによって清澄性能が大幅に向上することはないと考えられる。しかし、ボール振動の見地からは、二段組み合わせには大きな利点がある。すなわち、一段目を低速（今回の場合2,000rpm）で使用することにより、多量の粒子を捕集しつつ、ボール振動を低く（3,000rpmの場合の約1/3）抑えることができる一方、二段目は高速として清澄性能を維持するが、捕集粒子量は少なくすむためボール振動は増大しない。軸受の寿命は運転時の荷重の三乗に反比例するとされるため、装置を2基に増したとしても、遠心清澄機の主要な保守項目である軸受け部のメンテナンス頻度をかえって減少しうる可能性がある。

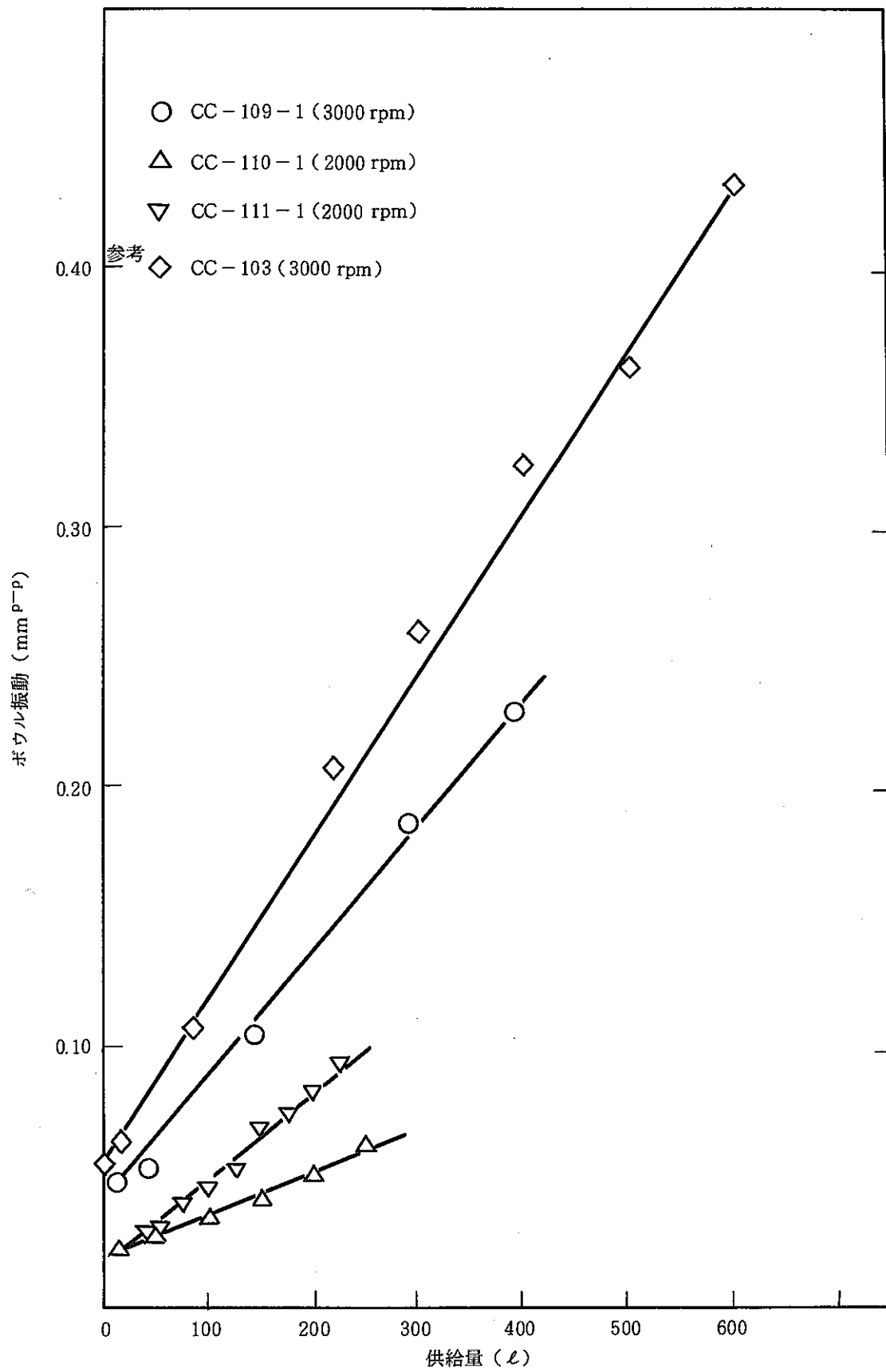


図 3.3.3 一段目条件でのボール振動

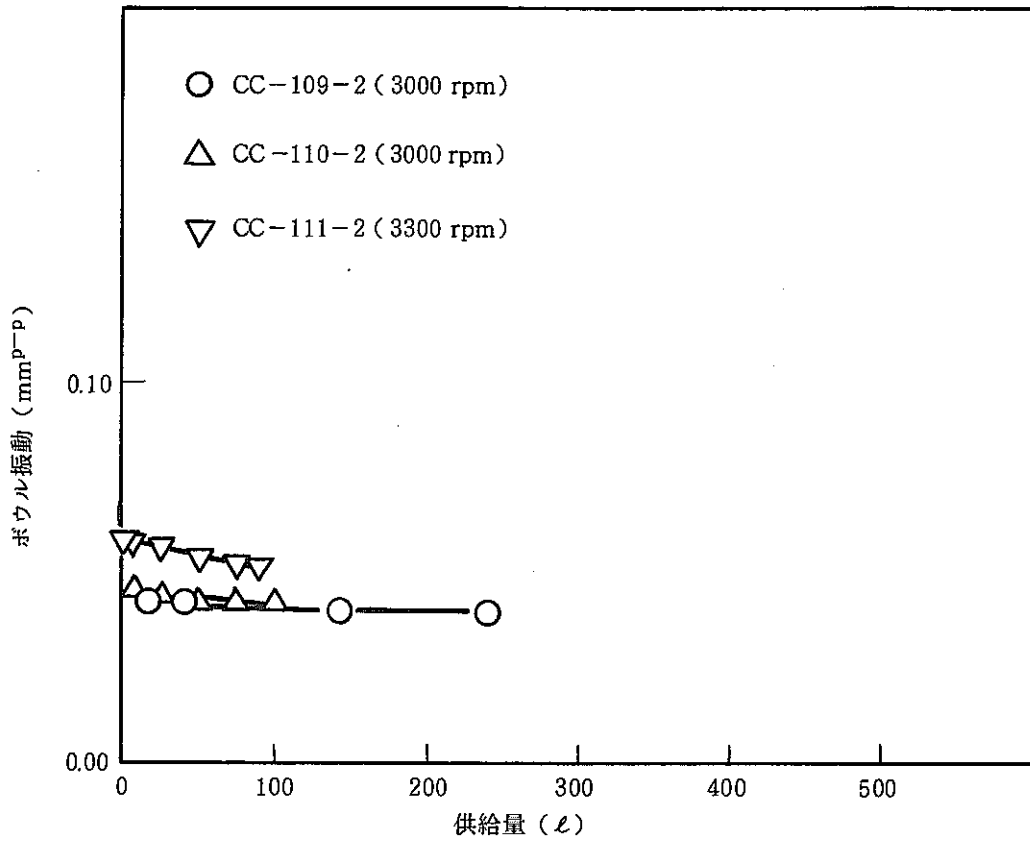


図 3.3.4 二段目条件でのボール振動

3.4 ドーンレイ型性能試験結果

3.4.1 機械的性能

(1) 回転特性

- ・カタログによる性能曲線（付録3，図C.3～C.4参照）にもとづいて，流量，駆動エア圧，回転数の関係を実測（図3.4.1参照）し，ほぼカタログ通りの性能であることを確認した。

(2) 加速特性（図3.4.2参照）

- ・条件によって若干の差はあるが約1分間で定格回転数（20,000rpm）に到達し，途中の振動増大域通過時にもケーシングに伝わる振動は比較的小さかった。但し本機はボウルの振動を検出する計器はついておらず，振動が少ないとは，ケーシングに手で触った感じである。振動増大域においてはその回転数域において，連続運転したり，昇降速の停滞時間を長くすると，ボウル破損，ベアリング破損につながるその領域での連続運転，昇降時間の冗長は避けなければならない。カタログによると振動増大域（いわゆる危険速度）は次のとおりである。

<振動検出器がなく実測はできない>

- ・ 60rpm (1HZ) ・ 835rpm (14HZ)
- ・ 1,920rpm (32HZ) ・ 3,125rpm (52HZ)
- ・ 5,150rpm (86HZ) ・ 7,800rpm (130HZ)
- ・ 13,000～14,000rpm ——この領域はボウルの危険速度によるものでなく封入液体の不安定波動による。

(3) 吸引特性 (図3.4.3参照)

- ・本タイプの遠心清澄機は回転の上昇と共にボウル中心圧が下がり負圧となり下部液溜め部より吸引する機構である。
- ・試験結果によると若干のタイムラグがあるが昇速時吸引開始回転数は約9,000～10,000rpmであり，降速時4,000～2,000rpmである。
- ・〔液循環後回転昇速——回転降速後循環停止〕の場合は清澄開始時と終了時において，若干清澄能力が落ちるが，昇降速時間から考えて，問題とするには当たらないと考える。

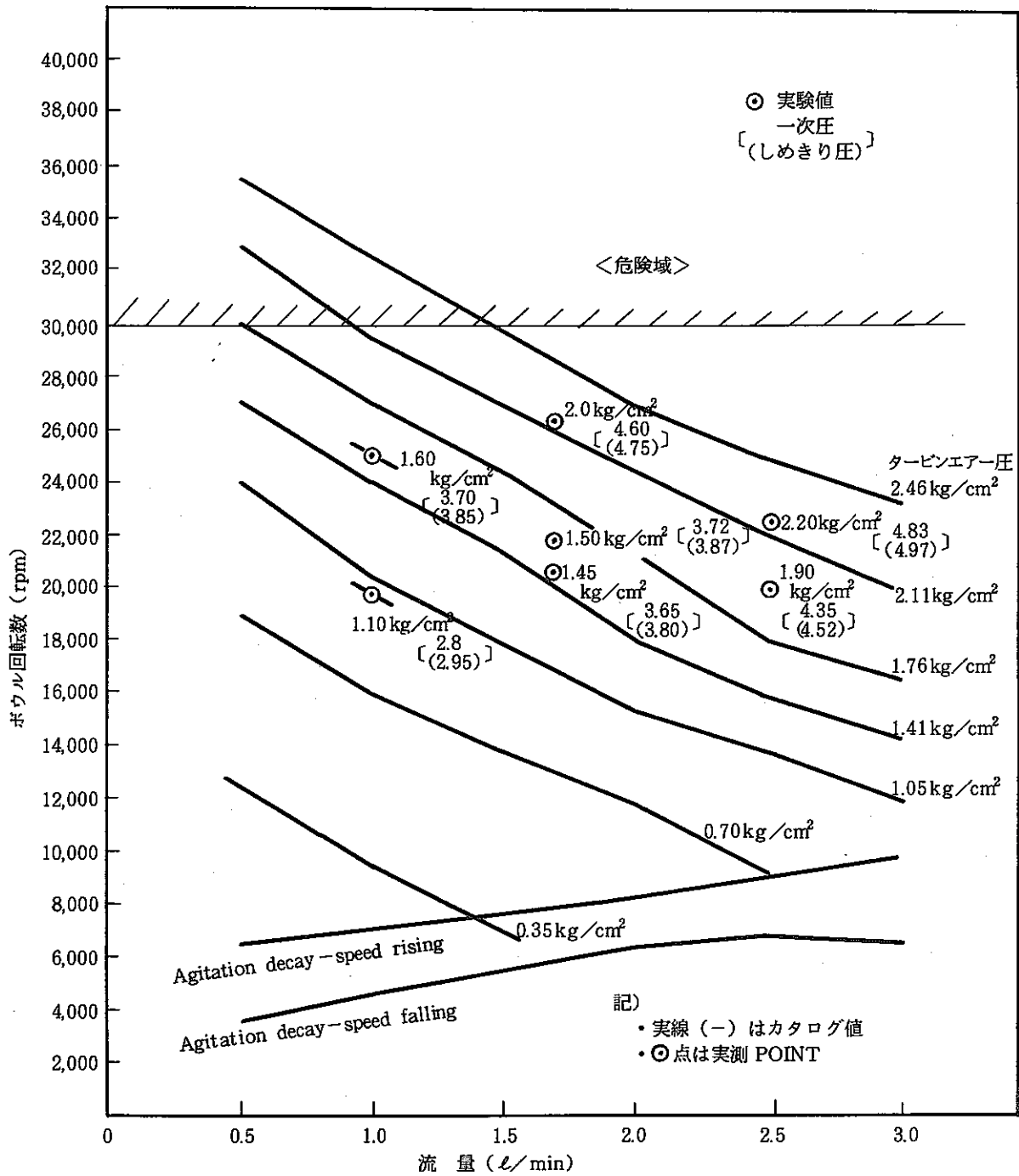


図 3. 4. 1 流量・駆動圧・回転数特性

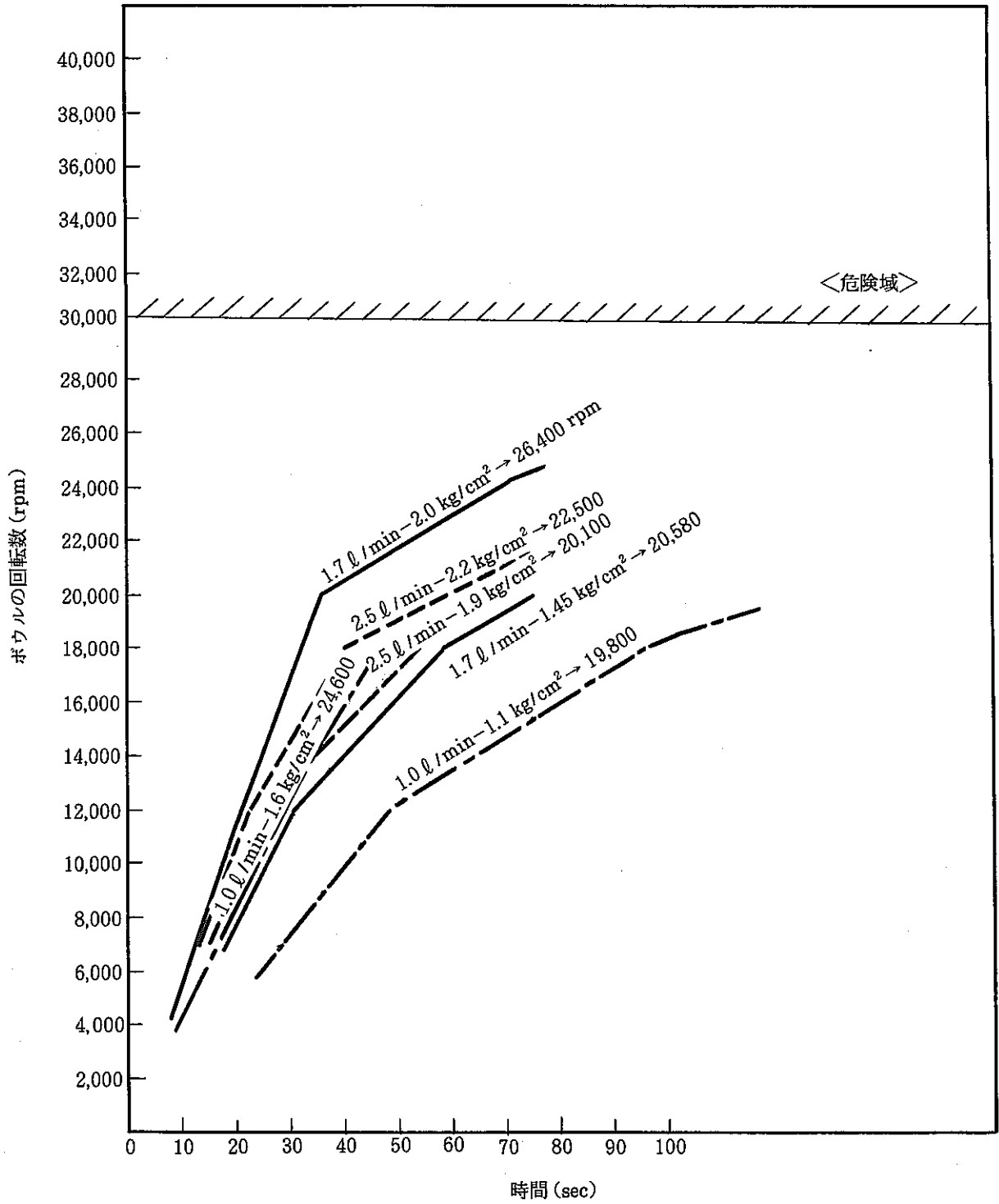


図 3.4.2 流量・駆動圧・加速特性

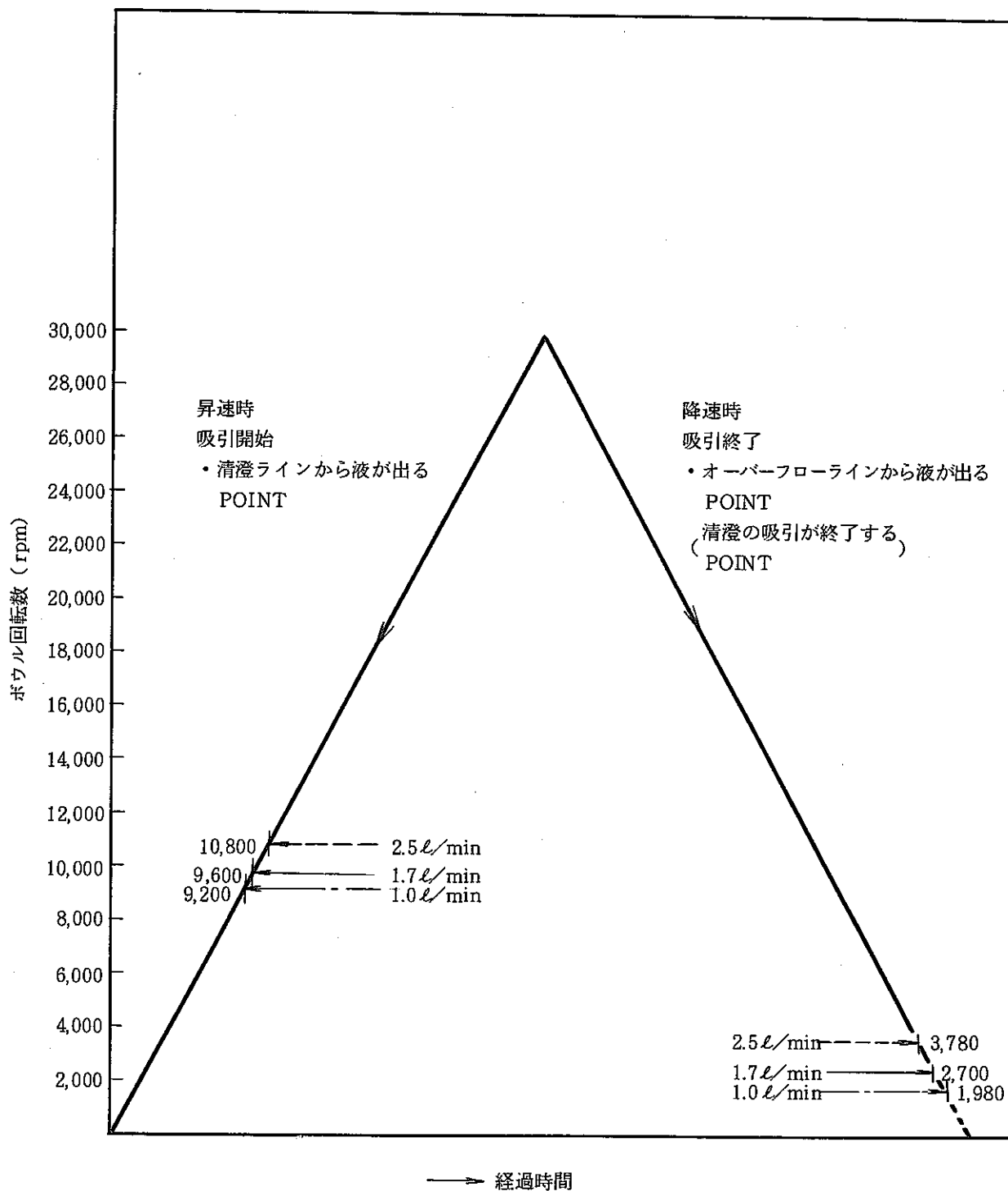


図 3.4.3 吸引特性

3.4.2 捕集性能評価試験結果

(1) 全体捕集率と粒径別捕集率

(図3.4.4～3.4.6参照)

- ・目標使用条件（回転数：20,000rpm，流量：100ℓ/hr）における捕集性能をPNC型モックアップ機と併記すると，下記となる。但し，PNC型モックアップ機の回転数（定格）は3,000rpmである。

	Dounreay 型（本試験）	PNC 型モックアップ機
全体捕集率	約 98%	約 99%
部分捕集率 〔粒径 1.0 μm〕	約 99%	約 99%
〔粒径 0.6 μm〕	約 80%	約 90%
条件	<ul style="list-style-type: none"> ・粒子：アルミナ 1.3μm 50 w/o AVe，比重 3.98 ・分散媒：純水 ・濃度：0.3 w/o 	

上表によると，Dounreay型遠心機の捕集性能はPNC型モックアップ機に比して同等か若干落ちることが出来る。

- ・全体捕集率と経過時間の相関は十分なデータではないが，図3.4.5によるとDounreay型はPNC型に比し，経過時間に対する全体捕集率の低下率が大である。これはDounreay型のボウル内容積が小さく，同じ捕集率量に対して流路面積の減少が著しく，流体の内部滞留時間の減少を引き起こすためである。

(2) スラッジ捕集量

- ・PNC型モックアップ機*と併記すると，下記となる。

	Dounreay 型（本試験）	PNC 型モックアップ機
捕集量	410g	1730g
処理液量 (スラッジ濃度 0.3 w/o 捕集率 99%として)	140ℓ	580ℓ

* それぞれを定格条件で運転した場合

- ・Dounreay型の捕集量は〔アンバランス増大による振幅増加—接触—回転急低下〕のパターンであり，限界（最大）捕集量ということがいえる。しかし，PNC型モックアップ機の場合は，〔捕集堆積量の増加—振幅増加—許容値に達し回転停止〕のパターンであり，許容値の設定いかんによって捕集量は変化する。許容値

の設定は軸受の寿命に関係し、1,730g捕集時の許容値設定は設計上軸受寿命を6,000時間とし、ボウル振幅許容値を0.6mm^{P-P}とした場合のデータである。

- ・カタログ(②項参照)によると、捕集限界時の状況は、[チョーク・プレートの閉塞→清澄循環停止→液の抵抗力による回転の急激な低下]であるが、本試験の状況は[捕集スラッジによるアンバランスの増加→ボウル下部の振動振幅増大→ボウル下部ダンパ接触による回転の急激な低下]であった。購入したボウルは予備も含めて全てメーカーにて組立・バランス済みであり、内部のチョーク・プレートは最上段に設定している為、チョーク・プレートの閉塞の前にアンバランス増大による接触が起こったためである。

いずれにしても捕集限界の検知が、回転数の急低下ということできわめて明確に示されるという点でDounreay型はすぐれた機能を有しているということがいえる。但し、[アンバランス増大→接触による回転低下]のパターンはボウルの製作精度すなわち固体差が大きく、捕集限界量を正確にもとめる為には多数のデータ取得が必要である。

(3) ボウル内観察

(図3.4.7参照)

- ・捕集試験後、両端近傍を切断し観察した。
- ・チョーク・プレート、ジャマ板の挿入およびその部品の軽量化(アンバランス低減の為)、全体構造のシンプルさ等、非常に良く考えた設計をしてあるという印象を受けた。

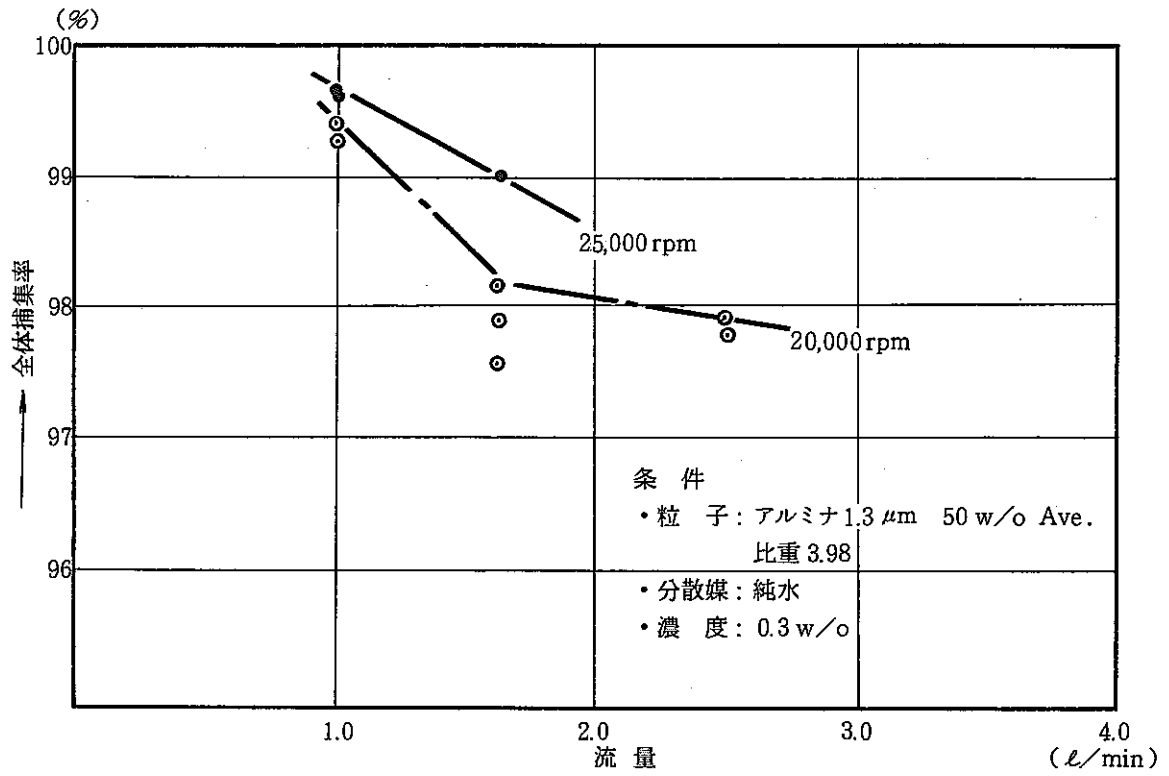
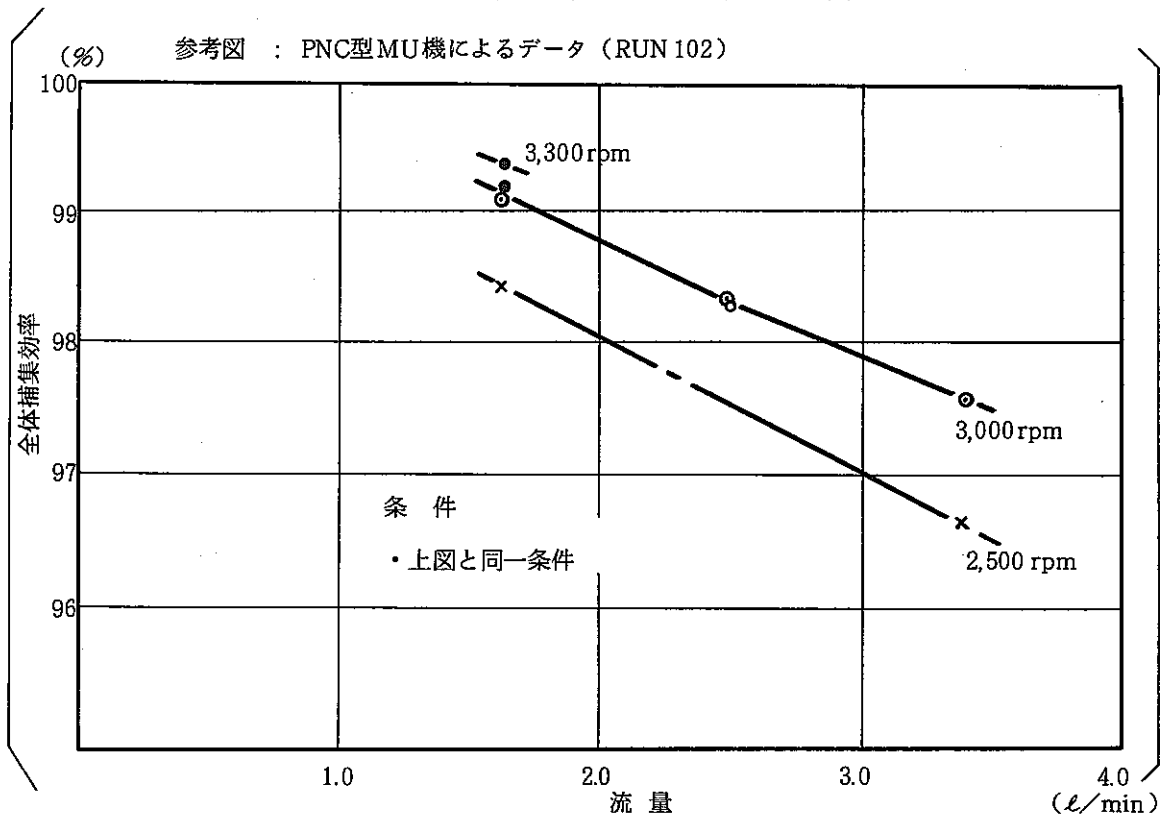


図 3.4.4 全体捕集率—流量—回転数の相関



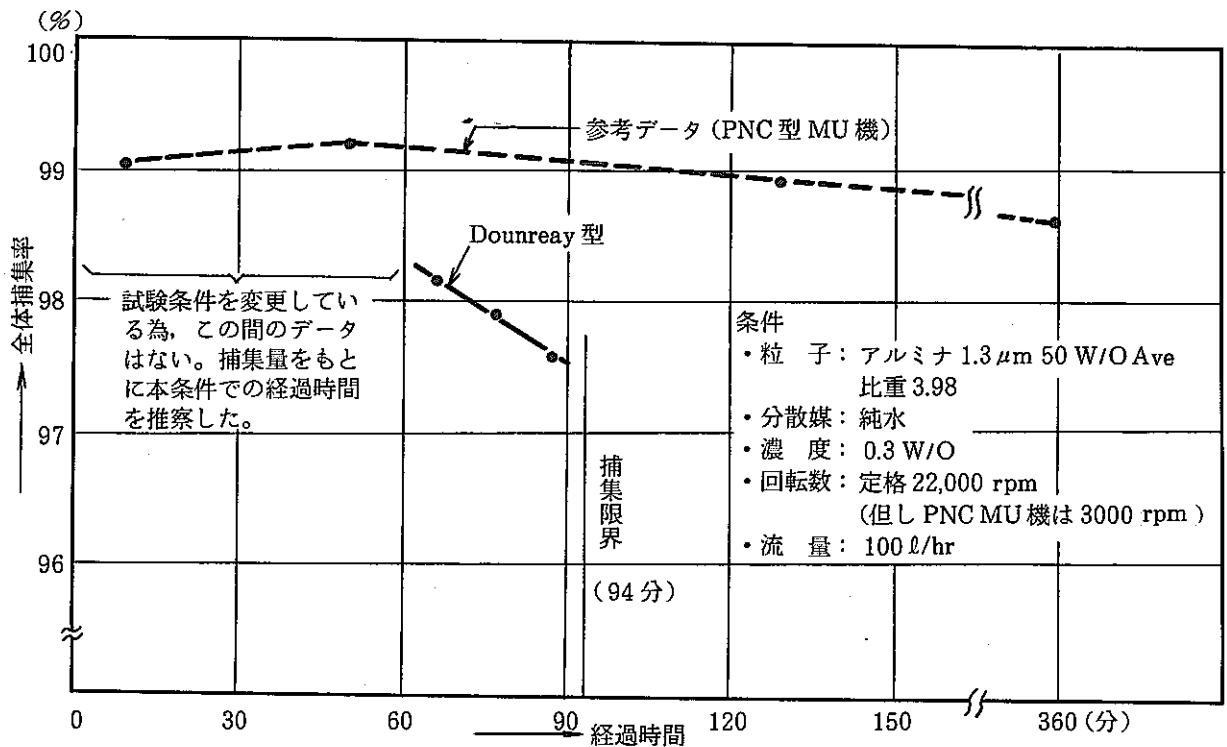


図 3.4.5 全体捕集率と経過時間の相関

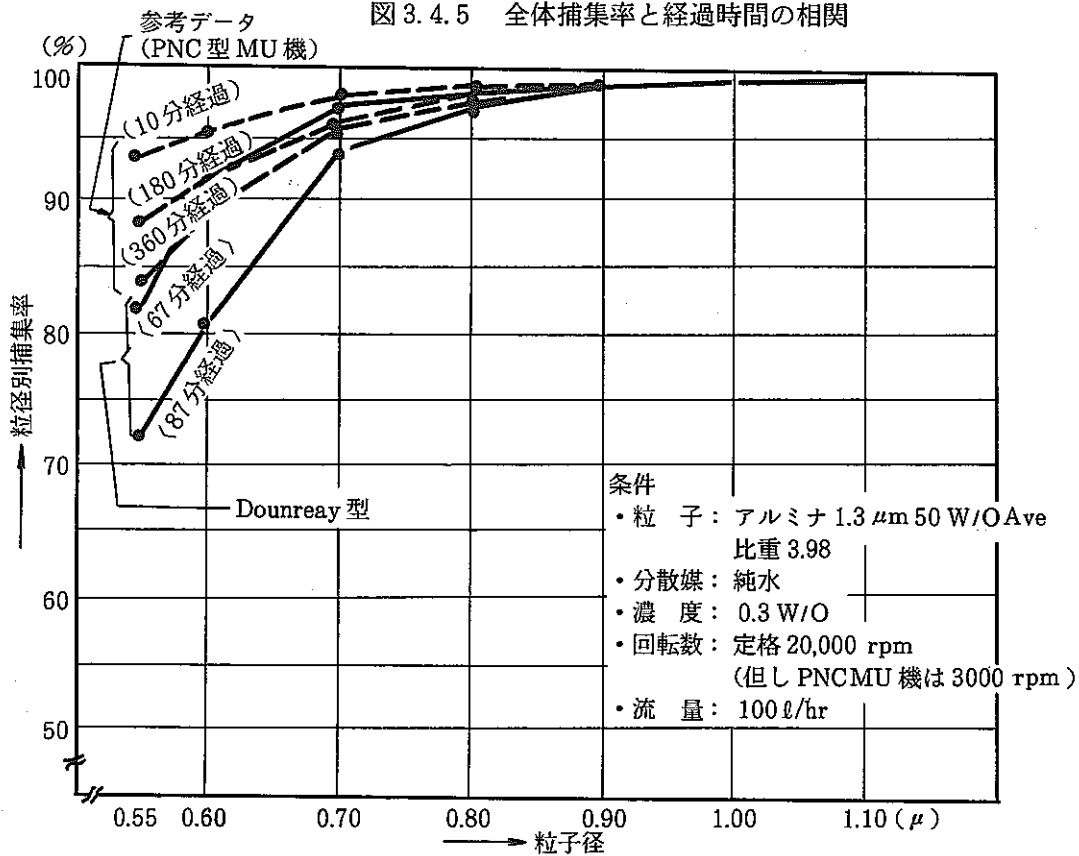


図 3.4.6 粒径別捕集率と経過時間の相関

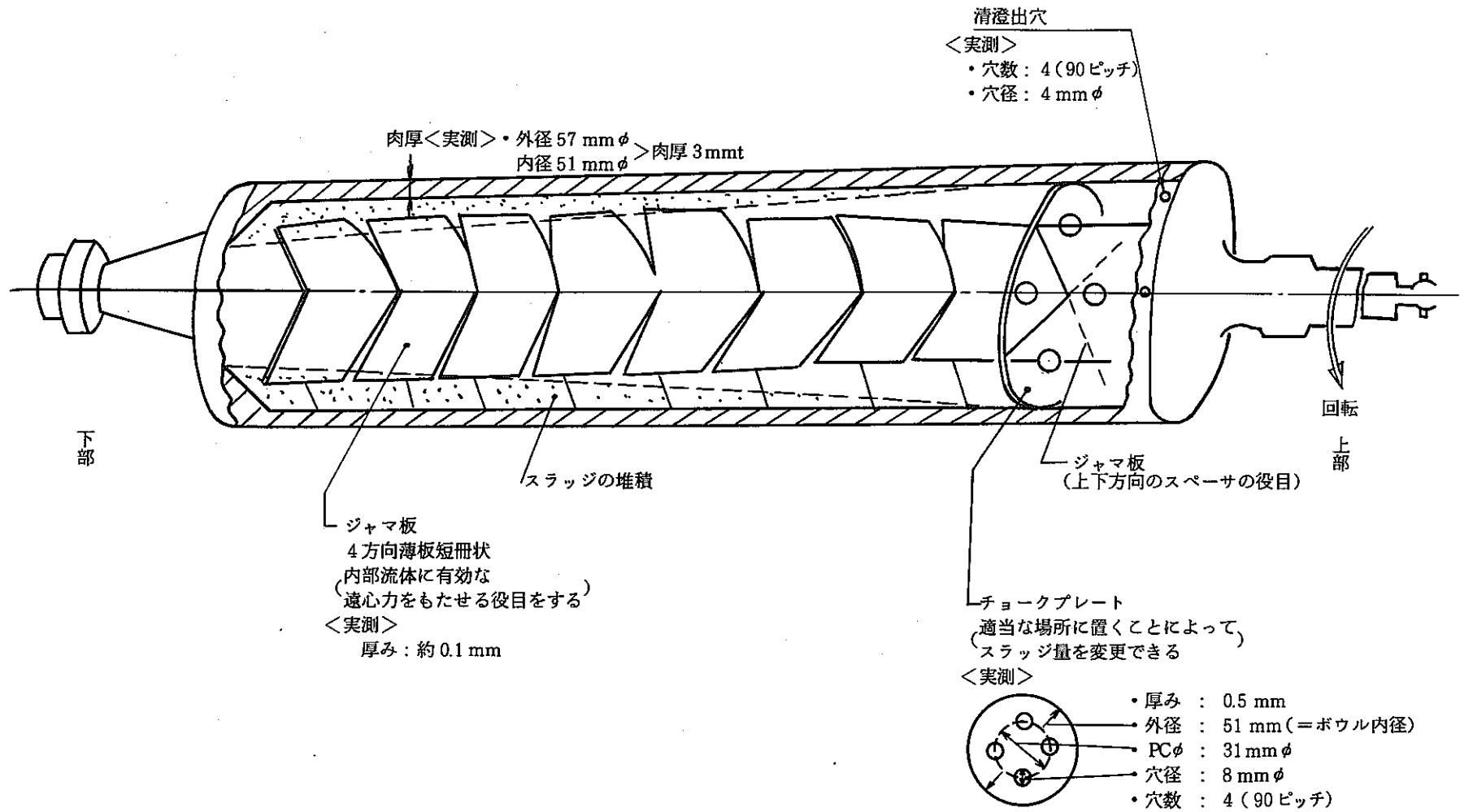


図 3.4.7 ボウル断面スケッチ

3.5 運転中の知見

本モックアップ装置の運転中に判明した問題点について以下に述べる。

3.5.1 遠隔保守上の問題点

既設遠心清澄モックアップ装置本体部は遠隔保守を前提として設計されているが、人手で分解、組み立てを行ってみた結果、改良を要する点があることがわかった。主な問題点を図3.5.1に示す。

* 図中の番号に対応

- ①* シャへいスラブとベース部はボウル部からのストリーミングを抑える見地からすきまがほとんどない。このため、つりおろし時に微かに傾斜があると、かみこみを生じ、無理な力をかけないかぎり動きがとれなくなる。これは、ガイドの方式、つり上げ部の構造等の再検討により対処することが可能と考えられる。
- ② ミスト漏洩防止のため、シャへいスラブはゴム製Oリングを介してベース部に乗る構造となっている。Oリングは本来シャへいスラブ側の切りこみ部にはまった状態で、シャへいスラブとともに脱着されるはずであるが、実際にはほぼ毎回ベース側に脱落している。これは、Oリング交換時に問題である。又、脱落したOリングは支持するものがないため、図3.5.1の左に示すように、次の組み立て時には、スラブ設置の障害となることさえある。従って、このOリングの支持方式については再考を要する。
一方、この部分は構造上高線量となるものと考えられるため、ゴムOリングによるシールはそもそも不適當であろう。
- ③ 本装置の軸受け部、駆動部の組立て時には、クレーンで各部を定位置上方につり上げた後、フランジのガイドローラ部に3本のガイドを挿入する形でつりおろすことにより、高精度の位置決めが可能である。しかし、ガイド3本を同時にガイドローラ穴部に挿入するためには、それぞれに操作者をつけ監視（又は誘導）させる必要があり、しばしばボウルがガイドに衝突するという事態さえ生じた。これは高速回転体であるボウルにとって好ましくない。ガイド—ガイドローラ方式は残すとしても、このガイド挿入については改良が必要である。
- ④ 駆動部を軸受け部に固定するためのフランジ部の径とその上方のモータ部の径が不釣り合いなため、ボルトへのアクセスが上方からではできない。すなわちインパクトレンチによる操作が困難である。マニピュレータによる水平方向からのアクセス

はラック前面に限られると考えざるを得ない。従って、専用の治具を開発しないのであれば、フランジ部の径をかなり大きくする必要がある。これは軸受部フランジがさらに大径化することを意味するため装置のコンパクト化等の得失について考慮する必要がある。

- ⑤ 駆動部の釣り上げは上部リングによるため、傾斜が生じることはないが、軸受部の釣り上げは両側の可動アームにスリング（又はチェーン）をかけておこなうため、微妙な傾きが生じることは避けられない。一般的には問題とならない程度の傾きであるが、本装置の場合、①で述べたような事象を引き起こす原因となりうる。したがって軸受け部についても一点支持の形で釣り上げを行いうる構造とすることが望ましい。

具体的には、駆動部釣り上げ用リングと支持部を強化し、駆動部ごと釣り上げできるようにし、又、軸受け部のみの釣り上げにそなえた治具を別に用意する事を考慮する必要がある。

3.5.2 起動、停止手順に関する検討

一連の試験経験にもとづいて、遠心清澄機の運転手順について検討してみた。図3.5.2に望ましい起動、停止手順の例を示す。詳細について以下に説明する。

起動操作

原則として、回数が定常状態に達した後に給液を開始することが望ましい。これは、回転数が低い状態で給液を行うことにより、清澄度の低い清澄液が清澄側に出る又は、供給液がスラッジ受槽側へリークする等を防ぐためである。

回転数が定常に達した後、給液を開始する。試験初期には、この後、ただちに試験液を供給開始していたが、清澄液流出開始時点のスラリー濃度が比較的高いことがわかった。そこでCC-113として、まず水を給液（洗浄ノズルを使用）した後に給液開始、又は運転中に給液を停止し、ボウル内部の液が充分清澄された頃に、給液を再開するといった操作を行ってみた。結果を図3.5.3に示す。給液開始（再開）直後にはボウル内の液が押し出されるため、液の清澄度は高い方からしだいに一定値に近づくことになる。

なお、実機においては、起動から停止にいたる間、スラッジ受槽へのリークによるプロセス液の損失を防ぐため、リークの回収を行う必要がある。

給液終了時点でボウル内に残ったプロセス液（約5ℓ）は、ボウル回転をとめてスラッジ側分配器（図5.5.1参照）を経て溶解液受槽へ戻す。

液追い出し操作

ボウル壁に付着したスラッジに含まれるプロセス液除去のため、回転を再起動(3,000rpm)し、洗浄用硝酸を50ℓ程度(量については今後の検討を要する)供給し、回転を停止する。

スラッジ洗浄操作

スラッジ側分配器をスラッジ受槽側へ切りかえ、スラッジ洗浄モードでボウルを回転する。高圧洗浄水(圧力、水量については今後検討)を供給し、ボウル内スラッジを洗い出す。

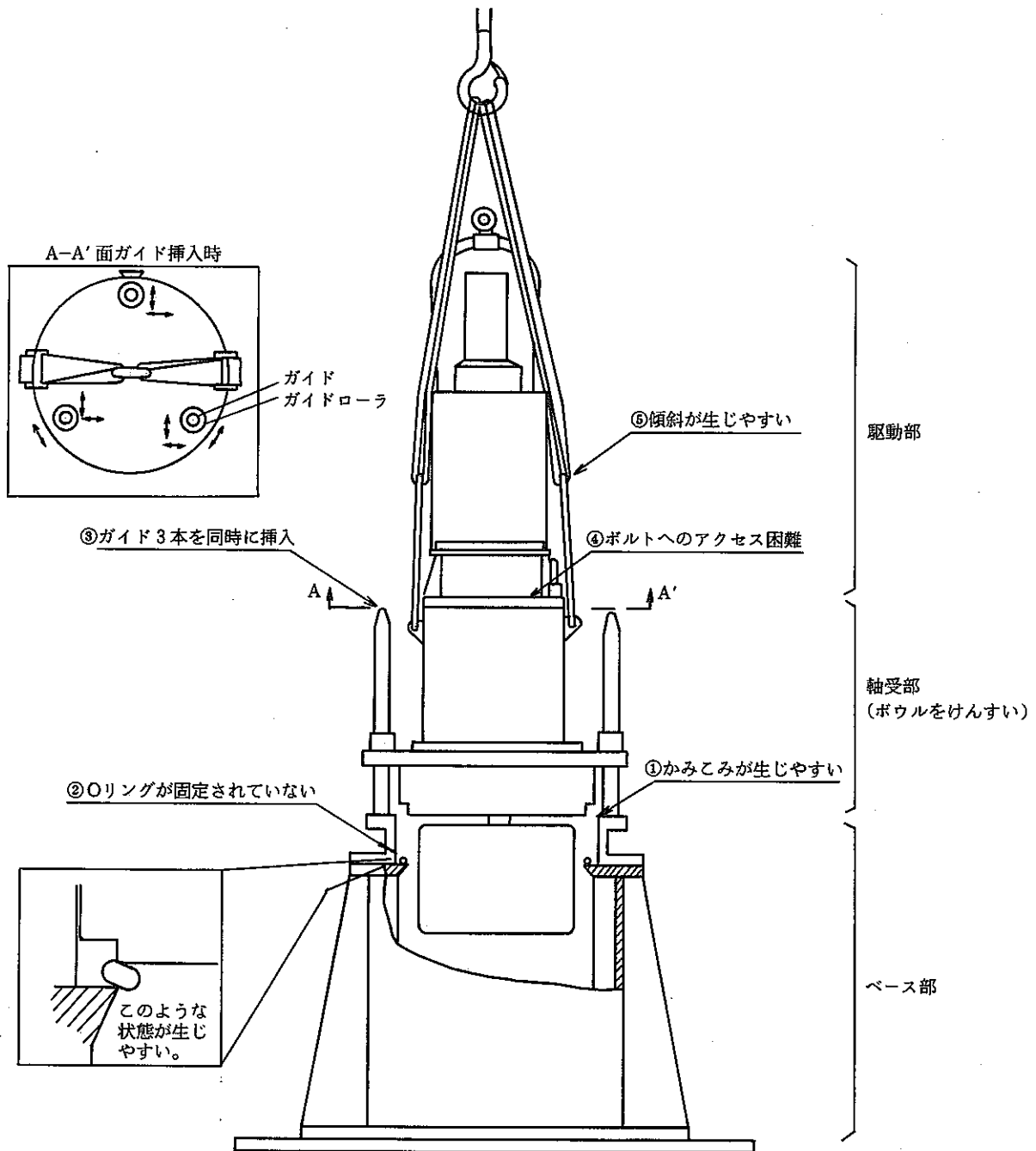


図 3.5.1 遠隔保守上の問題点

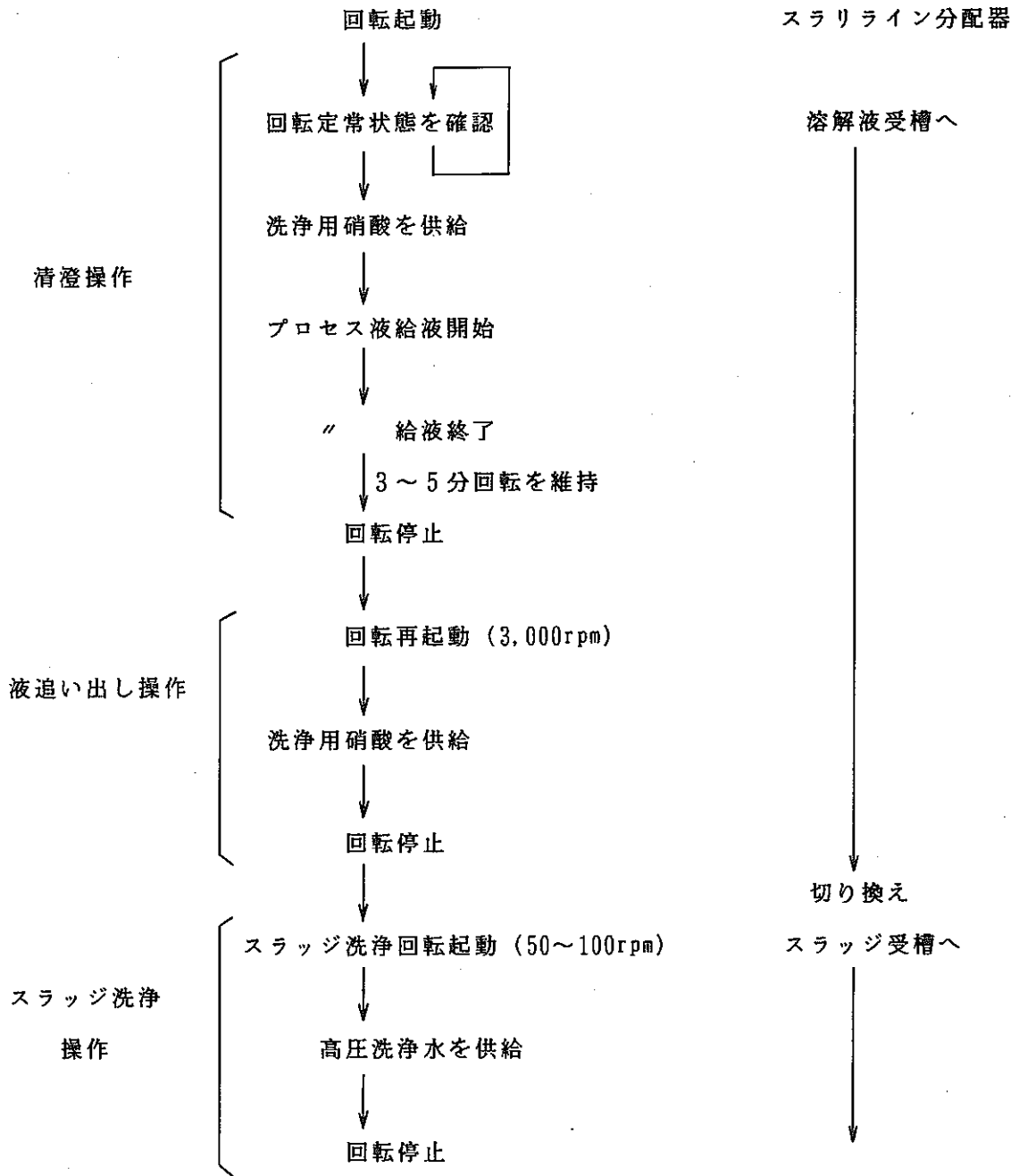


図3.5.2 望ましい起動停止手順

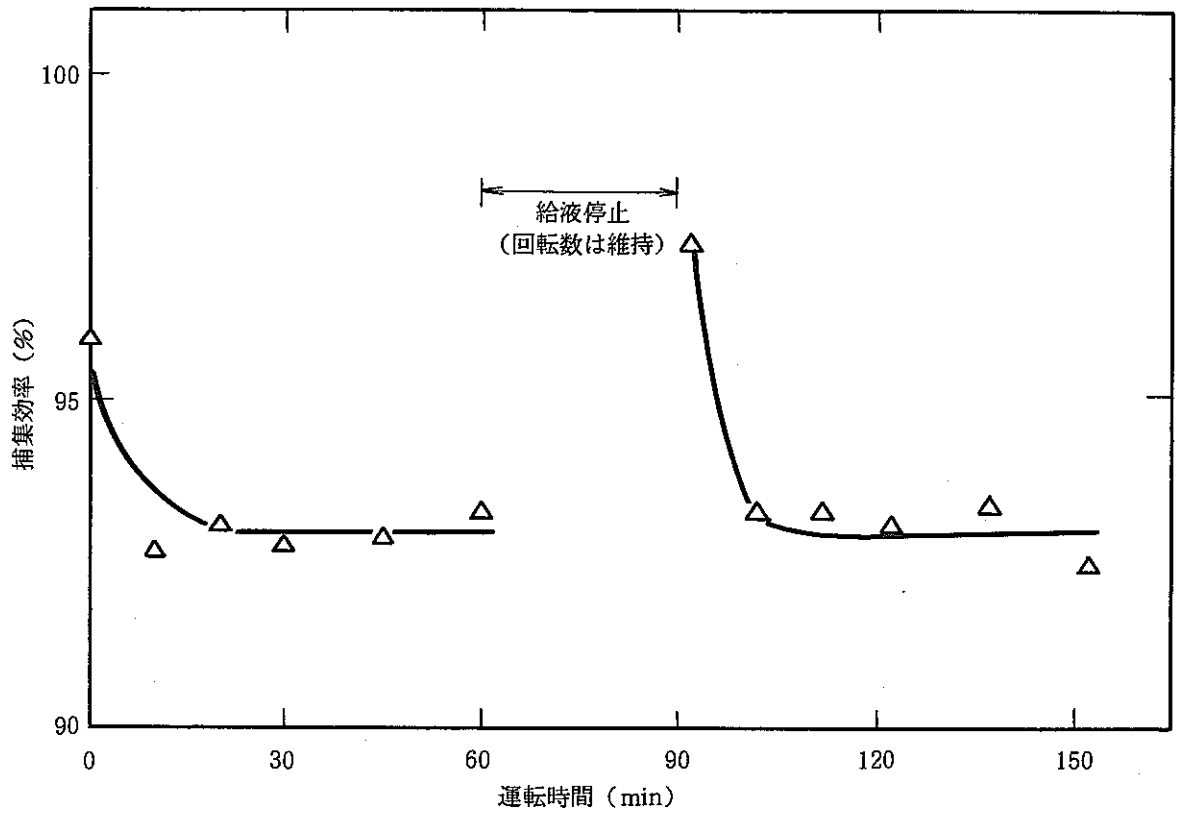


図 3. 5. 3 起動 (再起動) 後の捕集効率の変化 (CC-113)

4. まとめ

遠心清澄モックアップ装置をもちいて、各種試験を実施し、以下の結果を得た。

4.1 機械的性能

試験流体として水を使用し、供給流量およびボウル回転数をそれぞれ0～420ℓ/hr, 500～3,300rpmの範囲で変動させ運転した所、ボウルの振動、軸受温度等異常無く運転出来ることが確認された。また、この間の液リーク率すなわち給液の内、ボウルからスラッジ側に失われる液の比率を測定した所、定格運転(100ℓ/hr, 3,000rpm)で約0.5%との結果を得た。

スラッジの捕集に伴って、ボウル振幅は直線的に増加するが、設計値であるスラッジ捕集量2kgに対してボウル振動0.6mm^{P-P}以下は達成可能と考えられる。

4.2 清澄性能

模擬不溶解残渣として溶融アルミナ(公称平均粒子径0.4～2.5μm)、酸化セリウム(0.85μm)等、分散媒として水、砂糖水等を使用して清澄性能に関する試験を行い、捕集効率の測定を行った。

定格運転条件(100ℓ/hr, 3,000rpm)下での捕集効率は、公称粒径1.3μmの粒子に対して99%以上であった。また、この場合の限界粒子径は0.75μm前後であった。

4.3 二段組み合わせ

遠心清澄機2基を直列に使用することにより、清澄性能の向上を図ったが、清澄性能は、二段のうち高回転の段を単独で使用した場合を若干上回る程度で、さほどメリットのないことがわかった。ただし、二段ともボウル振動は、低いレベルにとどまるため、メンテナンス頻度の見地からは有利となる。

4.4 ドーンレイ型遠心清澄機

標準的条件(100ℓ/hr, 20,000rpm)で使用した場合、公称粒径1.3μmのアルミナ粒子に対する全体捕集効率98%とPNC型に近い性能が得られた。しかしボウル容量が小さく、スラッジの捕集に伴って急激に捕集効率が悪化し、また、約450gのアルミナ(実際の不溶解残渣、800～900gに相当すると考えられる)を捕集した時点でアンバランス振動によりダンパがケーシングに接触し、振動が増大したため、停止することになった。

5. 今後の課題

遠心清澄機に係る開発項目について表5.1.1に整理した。このうち、継続又は未実施の項目について今後実施する必要がある。これらについて以下に説明する。

5.1 PNC型遠心清澄装置の詳細性能評価

これまでの試験により、定常状態での性能評価、運転条件の検討等を行った。しかし、実機においては動力制御系等のトラブルによる運転状態の変動等が生じることも予想される。そこで、実機において生じうるトラブル及びその影響について検討し、その中で前後工程への影響があると考えられるものについては試験を行い、その程度を評価する。

5.2 スラッジ捕集容量の確認

一連の試験により、ボウル振動はスラッジ捕集量に比例して増大するとの知見を得たが、数例これに反する挙動も観察されている。この場合、2 kgのスラッジを捕集する前にボウル振動が許容値を越えることがありうるため、試験により、ボウル振動の増加挙動を検討し、スラッジ捕集容量の推定をより確実なものとする。

5.3 スラッジ捕集量の検出

清澄工程において捕集される不溶解残渣の総量については対象燃料、溶解環境等による差もあり、現時点では不明に近い。すなわち、既知のデータに基づいて実機を設計したが、運転途中でスラッジが容量以上に捕集されるという事態も想定しておく必要がある。従って、運転中にボウル内スラッジ量の検出を行うことが望ましく、この方法については将来の検討課題となる。さらにこの場合の安全性についても確認しておくことが必要である。

5.4 スラッジ処理に関する検討

5.4.1 スラッジ洗浄操作

遠心清澄機で捕集したスラッジは高圧水によるボウル洗浄を行いスラリーとして排出するとの思想で設計されているが、この際の運転条件すなわち、洗浄水圧、洗浄ノズル配置、ボウルの回転条件等、又この際の発生スラリー量、洗浄時間等は、プロセス設計上必要であるにもかかわらずこれまであまり検討されていない。今後以下の検討が必要と考えられる。

1) プロセス液の置換

清澄工程での処理はバッチ単位で行われ、各バッチ毎にスラッジ洗浄操作を行う必要がある。しかし、各バッチ終了時点ではボウル内にU, Puを含むプロセス液約5ℓが残留しており、この時点でただちにスラッジ洗浄モードに移行すると約1kg相当のU, Puが失われる。従って、いったん回転を止め、リーク回収ライン（図5.5.1参照）を経て溶解液受槽へ戻す、又はリンシング液を供給しボウル内プロセス液を清澄液側へ押し出す操作が必要となる。さらに捕集されたスラッジに含まれるプロセス液についても同様の操作によって処理する必要があると考えられる。

これらの操作について、効果的な手順及び必要なリンシング液の量等について、コールド試験を行い評価しておく必要がある。

2) スラッジ洗浄

上記操作後、ボウルを低速で回転し、高圧水によりスラッジを洗いおとすわけであるが、この際に必要な水圧、水量について検討を要する。すなわち、必要な洗浄水圧が実設備ユーティリティとして期待される圧力以上であれば、清澄工程独自に洗浄水加圧のための機構（加圧槽又はポンプ）を設置する必要が生じる。又廃棄物減容の見地からは、洗浄水量（すなわち発生スラリー量）が少ないことが望ましいが、安全性の見地からは、スラッジが確実にボウルから除去されている必要がある。したがって、ノズル設計、ボウル回転条件、等の検討を行うと同時にスラッジ洗浄状況を把握するための技術（たとえばボウル内部の監視手段又はスラリー濃度検知手段）の検討、開発が必要と考えられる。

5.4.2 スラッジ保管形態の検討

現時点では、捕集されたスラッジは、高レベル廃液（スラリー）として取り扱い、保管を行うとされ、将来のガラス固化等に対応しうるものと考えられる。一方、現在、不溶解残渣中の有用金属の回収等が考えられるようになっている。これに対応した保管形態（移送可能な容器に保管／固体化等）が必要となる場合、スラッジ洗浄操作についても方針修正が必要となるものと考えられる。

5.5 清澄システムの検討

今後の開発方針について検討を行う指針として、高速炉燃料リサイクル試験施設（ないしはホット工学試験施設）用清澄システムについて検討してみた。（図5.5.1参照）現状から考えて、今後開発又は適用のための検討を要する周辺機器を以下に挙げる。

- ・スラリー送液装置
- ・定量給液機構
- ・回転数検知装置
- ・ボウル振動又はスラッジ捕集量の検知装置
- ・スラリー濃度検知装置

5.6 遠隔保守化

本装置を遠隔保守環境で使用する上での問題点は § 3.5 で挙げた通りで、設計上の検討で十分対処しうると考えられる。今後問題とすべき点は、各 부품の寿命すなわち保守頻度の改善が可能かということであると考えられる。

先に述べたように、本装置は現在のところ電動モータ、半導体センサ、有機シール材等を使用した設計であり、高放射線環境での使用にあたってはこれらがウィークポイントとなる。そこで今後エアタービンの応用、光学、音響センサ等線源との間に距離をとりうる方式の検討、金属シール材の適用等、順次耐放射線性の向上をはかるべきと考えられる。

5.7 清澄性能の向上

本装置の清澄性能としては、§ 3.2.2 で述べたように平均粒子径 $1.5\mu\text{m}$ の粒子群を 99% の効率（単一粒径の場合 $0.75\mu\text{m}$ 以上で 100% 付録 2 参照）で捕集しうるわけである。この値は従来高速炉燃料再処理時に発生する不溶解残渣の粒子径として考えられてきたものであり、清澄液スラッジ濃度を数 10ppm とする本装置の清澄性能はこの要求を十分満たすものと考えられる。

しかし、最近高燃焼度燃料等によるホット試験などの知見にもとづき不溶解残渣の粒子径が $1\mu\text{m}$ 前後に分布するのではないかとの意見がある。この場合の本装置による捕集効率は 95% 前後と推定される。すなわち、給液中のスラッジ濃度が $3\text{g}/\ell$ 程度とすると、清澄液中に $0.15\text{g}/\ell$ (150ppm) 又はそれ以上の濃度のスラッジが残留することになる。これは以降の共除染工程で第三相等を発生させ得る濃度と考えられる。したがって今後、清澄性能を一段階改善する必要がある。既設装置について考えると、供給液量を数 $10\ell/\text{hr}$ までおとすことで必要な清澄性能を確保できるはずであるが、この場合、清澄工程に要求される処理速度 ($100\sim 200\ell/\text{hr}$) との釣り合いがとれなくなる。この対策としては、遠心清澄機の遠心効果* をより高いものとする必要があるが、既設装置の

* 付録 1 用語集参照

性能はサブクリティカル型（定格回転数<一次危険速度）としては限界である。そこで今後スーパークリティカル型機（一次危険速度<定格回転数<二次危険速度）の可能性について検討する必要がある。

5.8 ボウル構造の改良

既設モックアップ装置における限界粒子径（実測値 回転数3,000rpm, 給液量100ℓ/hrで0.75μm）が設計値に比べて大きい原因の一つはボウル内での液の流れに乱れがあるためと考えられる。今後、ボウルのバッフル板形状等の改良により、既設装置の限界粒子径の改善（清澄性能の向上）に寄与しうる可能性がある。

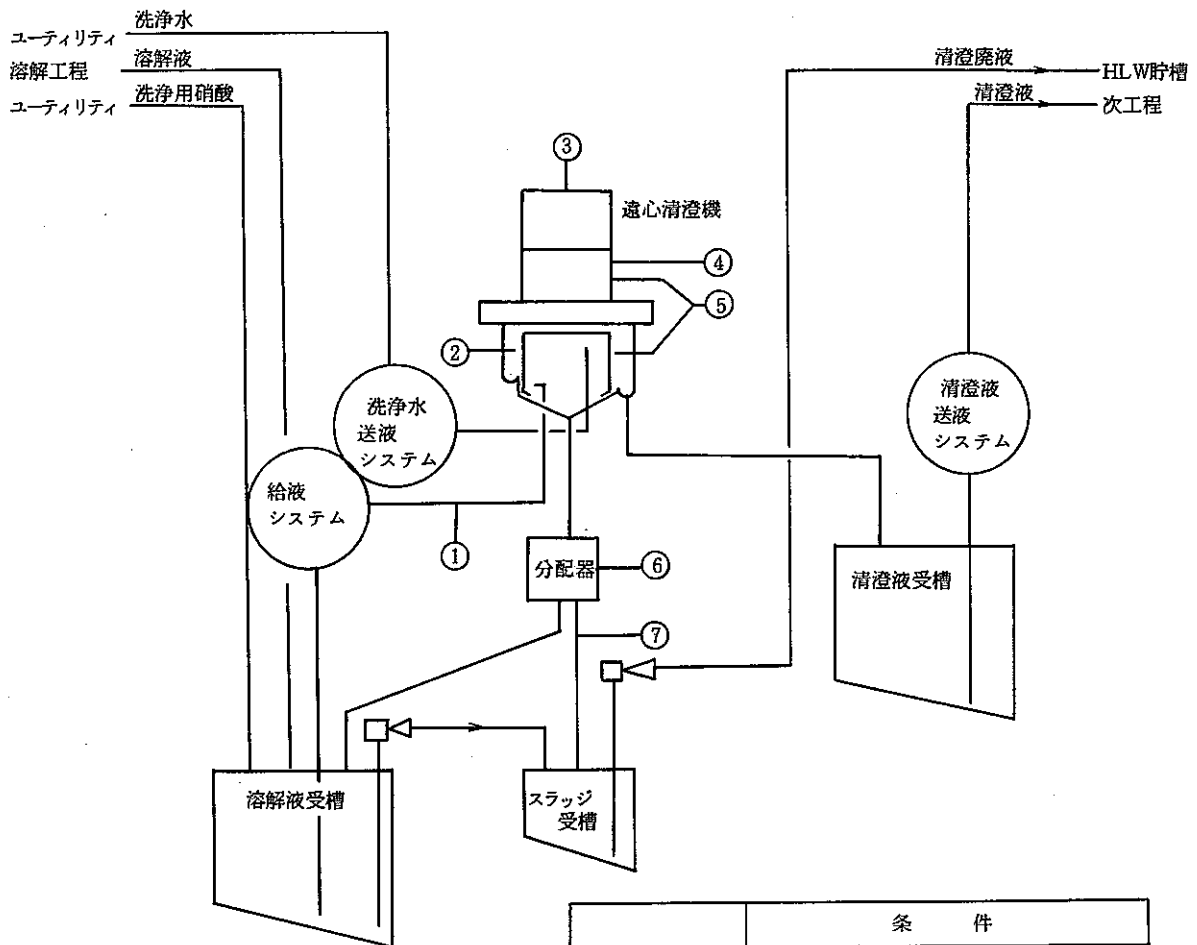
5.9 前後工程に関する条件の明確化

清澄工程の目的は、溶解液中に含まれる不溶解残渣を除去することにより次工程（溶媒抽出工程）における第三相の発生、液移送配管中でのスラッジ堆積による詰まり等を防止することである。しかし、現時点では、清澄液中の不溶解残渣の濃度（粒子濃度）及び粒子径をどの程度に抑えれば第三相の発生を防止できるか等については明らかにされていない。この問題については、今後コールド試験等を通して目標値を明らかにする必要がある。

又、溶解によって生じる不溶解残渣に係るデータ（量、組成、粒子径分布）及びこれが清澄工程へどのような形で供給されるか（液量、U、Pu濃度、リンシングの有無、バッチ/連続等）などのプロセス関係の条件も、現時点で明確になっておらず、早急に検討する必要がある。

表 5.1.1 開発項目と現状

項 目	実施状況			
	完了	継続	未実施	
1. PNC 型遠心清澄装置の性能評価 1.1 清澄性能の評価 (1) 最適運転条件の把握 (2) 外乱に対する挙動の把握 1.2 機械的性能の評価 (1) スラッジ捕集容量の確認 (2) スラッジ捕集量の検出 1.3 スラッジ処理に関する検討	○	○	○	試験により検討 試験により検討 検討中 未検討
2. 清澄システムの検討 2.1 ラック設計 2.2 周辺装置の開発（給液、測定／制御）			○ ○	設計研究実施の予定 設計研究実施の予定
3. 改良の可能性の検討 3.1 遠隔保守化 （保守頻度の軽減，耐放射線性の向上，他） 3.2 清澄性能の強化 (1) 高周速化 (2) 二段階清澄 (3) ボウル改良（液流動状況の解析）	○		○ ○ ○	・駆動部をエアタービン化の予定 ・その他検討中 設計研究実施の予定 試験により検討



条 件	
給液システム	定量性, 100~200L/hr, スラッジを含む溶解液
洗浄水送液システム	吐出圧, 15~20 kg/cm ² G, 水又は硝酸
清澄液送液システム	清澄液溶解液
① 流量測定	装置制御, 超音波流量計等
② スラッジ量検出	" , 未検討
③ 回転計	" , 光学式回転計等
④ 軸受部温度	保守データ, 安全性, 熱電対等
⑤ ボウル/軸振動	" , 未検討
⑥ 分配器状態	装置制御, TVカメラ等
⑦ スラッジ濃度検知	" , 光学式温度計等

図 5.5.1 清澄工程の概略フロー例

主な試験結果

試験No	実施日	試験条件							試験結果													
		試験液					運転条件		経過時間 (min)	給液			清澄液		清澄性能		積算 給液量 (ℓ)	ボウル振動 $P=Po+A \times W$ (mm ^{P-P})				
		模擬不溶解残渣			分散媒		粒子濃度 (g/ℓ)	回転数 (rpm)		給液量 (ℓ/hr)	給液流量 (ℓ/hr)	粒子濃度 (ppm)	平均粒子径 (μm)	粒子濃度 (ppm)	平均粒子径 (μm)	清澄効率 (%)		捕集効率 (%)	スラッジ 捕集量W (g)	初期値 Po	ボウル 振動	係数A ×10 ⁻⁴
		組成	公称平均 粒子径	密度 (g/cm ³)	組成	粘性 (cP)																
CC-105		Al ₂ O ₃	1.3μm	4.0	H ₂ O +砂糖	1.6 (比重 1.7)	3.0	3000	100	0								0.043				
										10	2816	64		97.73		0.047						
										70	2990	42		98.60		0.145						
										152	2922	75		97.43		0.241						
CC-106		Al ₂ O ₃	1.3μm	4.0	H ₂ O	1.0	3.0	3300	100	40	102	2612	22.3			99.15		0.084				
										55	2752	25.2		99.08		0.130						
										"	85	2741	23.7		99.14		0.090					
										"	105	150	2815	49.7		98.23					0.104	
										"	113	200	2831	67.5		97.62					0.226	
										"	2500	143	2756	106.7		96.13					0.168	
										"	163	102	2715	60.3		97.78					0.165	

主な試験結果

試験No	実施日	試験条件							試験結果																					
		試験液					運転条件		経過時間 (min)	給液			清澄液		清澄性能		積算 給液量 (ℓ)	ボウル振動 P=Po+A×W (mm ^{P-F})												
		模擬不溶解残渣			分散媒		粒子濃度 (g/ℓ)	回転数 (rpm)		給液量 (ℓ/hr)	給液 流量 (ℓ/hr)	粒子 濃度 (ppm)	平均 粒子径 (μm)	粒子 濃度 (ppm)	平均 粒子径 (μm)	清澄 効率 (%)		捕集 効率 (%)	スラッジ 捕集量W (g)	初期値 Po	ボウル 振動	係数A ×10 ⁻⁴								
		組成	公称平均 粒子径	密度 (g/cm ³)	組成	粘性 (cP)																								
CC-107		Al ₂ O ₃	1.3μm	4.0	H ₂ O	1.0 (=20°C)	3.0	3000	100	20	102	2654		30.6			98.84			0.071										
																										0.088				
																											0.134			
																											0.110			
																												0.125		
											≒ 0.5 (55°C)	3.0	3000	100	15		2702		13.0			99.52		0.063			0.072			
																												0.088		
																													0.122	
																													0.167	
																													0.113	
																														0.129
																														0.142
																														0.085
																														0.089

主な試験結果

試験No	実施日	試験条件							試験結果													
		試験液					運転条件		経過時間 (min)	給液			清澄液		清澄性能		積算 給液量 (ℓ)	ボウル振動 $P=P_0+A \times W$ (mm ^{P-P})				
		模擬不溶解残渣			分散媒		粒子 濃度 (g/ℓ)	回転数 (rpm)		給液量 (ℓ/hr)	給液 流量 (ℓ/hr)	粒子 濃度 (ppm)	平均 粒子径 (μm)	粒子 濃度 (ppm)	平均 粒子径 (μm)	清澄 効率 (%)		捕集 効率 (%)	スラッジ 捕集量W (g)	初期値 P ₀	ボウル 振動	係数A ×10 ⁻⁴
		組成	公称平均 粒子径	密度 (g/cm ³)	組成	粘性 (cP)																
CC-108		CeO ₂	0.85 μm	7.3	H ₂ O	1.0	3.0	3000	100	15	2826					94.06		66.5				
									150	33	2854					92.45		172.2	0.073			
									200	47	2972					91.05		288.8	0.103			
									250	58	2916					90.98		402.2	0.135			
									3300	100	78	2892				95.47		526.5	0.217			
									2500	100	100	2902				92.28		625.7	0.101			
									200	115	2887					89.64		734.3	0.127			
									250	129	2868					88.08		872.1	0.150			
									2000	250	140	2821				83.87		983.2	0.096			
									200	154	2845					85.83		1104.1	0.104			
	100	173	2792					89.22		1198.9	0.118											

主な試験結果

試験No	実施日	試験条件							試験結果													
		試験液					運転条件		経過時間 (min)	給液			清澄液		清澄性能		積算 給液量 (ℓ)	ボウル振動 P=Po+A×W (mm ^{P-P})				
		模擬不溶解残渣			分散媒		粒子濃度 (g/ℓ)	回転数 (rpm)		給液量 (ℓ/hr)	給液 流量 (ℓ/hr)	粒子 濃度 (ppm)	平均 粒子径 (μm)	粒子 濃度 (ppm)	平均 粒子径 (μm)	清澄 効率 (%)		捕集 効率 (%)	スラッジ 捕集量 (g)	初期値 Po	ボウル 振動	係数A ×10 ⁻⁴
		組成	公称平均 粒子径	密度 (g/cm ³)	組成	粘性 (cP)																
CC-111		Al ₂ O ₃	1.3μm	4.0	H ₂ O	1.0	3.0	2000	100	0	2753.7		(79.9)		2.90	(97.1)		148.3				
										5	2776.0		78.2		2.80	97.2		170.6		0.029		
										30	2756.2		80.0		2.90	97.1		282.1		0.039		
										60	2757.1		79.4		2.90	97.1		415.8		0.053		
										90	2754.8		79.5		2.90	97.1		549.5		0.074		
										120	2811.8		81.1		2.90	97.1		683.4		0.093		
										111-1 清澄液				94.7 ppm	3300	100	0	94.7		(17.8)		(18.8)
		5	98.0		16.2		16.5	83.5														
		15	97.0		18.9		19.5	80.5														
		30	92.0		16.2		17.6	82.4														
		47	88.8		16.4		18.5	81.5														

主な試験結果

試験No	実施日	試験条件							試験結果													
		試験液					運転条件		経過時間 (min)	給液			清澄液		清澄性能		積算 給液量 (ℓ)	ポウル振動 $P=Po+A \times W$ (mm ^{P-P})				
		模擬不溶解残渣			分散媒		粒子濃度 (g/ℓ)	回転数 (rpm)		給液量 (ℓ/hr)	給液流量 (ℓ/hr)	粒子濃度 (ppm)	平均 粒子径 (μm)	粒子濃度 (ppm)	平均 粒子径 (μm)	清澄 効率 (%)		捕集 効率 (%)	スラッジ 捕集量W (g)	初期値 Po	ポウル 振動	係数A ×10 ⁻⁴
		組成	公称平均 粒子径	密度 (g/cm ³)	組成	粘性 (cP)																
CC-112		Al ₂ O ₃	0.4μm	4.0	H ₂ O	1.0	3.0	3000	60	0	2961.4		(161.8)		(5.5)	(94.5)						
										5	2956.9		125.6		4.2	95.8		14.2		0.034		
										30	2957.9		121.2		4.1	95.9		99.3		0.028		
									60	2900.4		84.3		2.9	97.1		182		0.024			
									100	0	2937.5		(189.5)		(6.5)	(93.5)			0.024			
										5	2893.6		173.6		6.0	94.0						
								30		3014.2		196.5		6.5	93.5		317.8		0.036			
								150	60	3181.1		189.0		5.9	94.1		467.4		0.053			
									0	2999.1		(280.9)		(9.4)	(90.6)		487.4	0.055				
									5	3061.5		314.1		10.3	89.7							
									30	2984.3		277.2		10.0	90.0		693.6		0.091			
									60	3056.9		296.9		9.7	90.3		900.8		0.124			

主な試験結果

試験No	実施日	試験条件							試験結果													
		試験液					運転条件		経過 時間 (min)	給液			清澄液		清澄性能		積算 給液量 (ℓ)	ボウル振動 $P=P_0+A \times W \text{ (mm}^{F-P}\text{)}$				
		模擬不溶解残渣			分散媒		粒子 濃度 (g/ℓ)	回転数 (rpm)		給液量 (ℓ/hr)	給液 流量 (ℓ/hr)	粒子 濃度 (ppm)	平均 粒子径 (μm)	粒子 濃度 (ppm)	平均 粒子径 (μm)	清澄 効率 (%)		捕集 効率 (%)	スラッジ 捕集量 (g)	初期値 P_0	ボウル 振動	係数A $\times 10^{-4}$
		組成	公称平均 粒子径	密度 (g/cm^3)	組成	粘性 (cP)																
CC-113		Al ₂ O ₃	0.4 μm	4.0	H ₂ O	1.0	3.0	3000	100	0	2953		(194.7)		(6.6)	(93.4)						
										10	2919		100.6		3.4	96.6	0	0.041				
										20			213.0		7.3	92.7	45	0.049				
										30	2894		200.4		6.9	93.1	90	0.052				
										45			207.4		7.2	92.8	135	0.054				
										60	2905		204.2		7.1	92.9	203	0.061				
										90	2892		193.6		6.7	93.3	271	0.070				
										100			75.4		(2.6)	(97.4)	271	0.066				
										110			193.7		6.7	93.3	316	0.070				
										120	2888		194.5		6.7	93.3	360	0.075				
										135			198.0		6.9	93.1	405	0.082				
										150	2875		191.6		6.6	93.4	473	0.091				
													215.4		7.5	92.5	539	0.101				
																	553	0.107	1.12			

7. 参考文献

- 1) 遠心清澄モックアップ装置 完成図書 全2部
1979 ㈱東芝
- 2) 粉体工学用語辞典 粉体工学会編
1981 日刊工業新聞社
- 3) 化学工学便覧(改訂4版) 化学工学協会編
1985 丸善㈱

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：スラリー（けん濁液）を清澄するさいの清澄効果の指標

供給したスラリー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。

$$\text{全体捕集効率} : E_t = \left\{ 1 - \frac{C_o}{C_i} \right\} \times 100 (\%) \quad C_i : \text{供給液スラリー濃度 (g/l 又は ppm)}$$

$$C_o : \text{清澄液スラリー濃度 (g/l 又は ppm)}$$

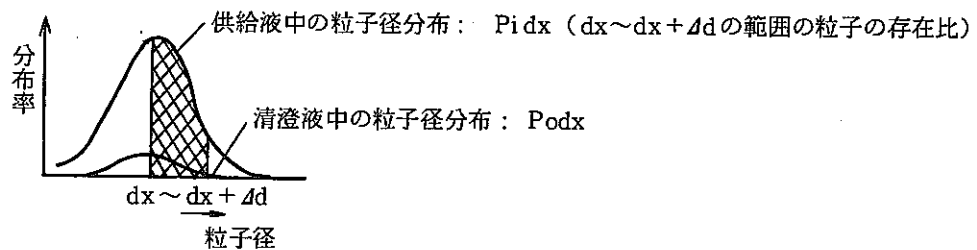
測定方法については § 2.3.2 参照

・清澄効率：スラリー（けん濁液）を清澄するさいの清澄効果の指標

供給したスラリーの粒子濃度に対する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：供給スラリー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

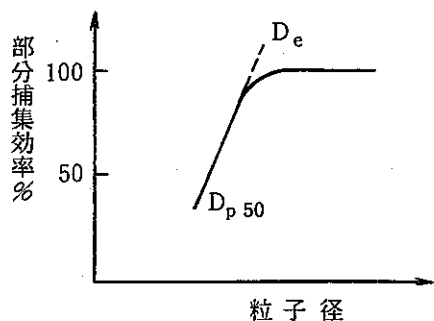
$$E_{dx} = \left\{ 1 - \frac{C_{o dx}}{C_{i dx}} \right\} \times 100 (\%)$$

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

$C_{o dx}$: 供給液中の粒径 $dx \sim dx + \Delta d$ 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

部分捕集効率を粒子径に対してグラフ化することにより、部分分離効率曲線（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径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_{p50} ：分離粒子径と呼ぶが、本書中では曲線の立上がり部を延長し100%との交点を推定し、これを D_e ：限界粒子径（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%の粒子径を限界粒子径と称している。

・総合的捕集効率

複数の清澄装置を直列に使用する場合に、最終的に捕集されたスラッジ（一段＋二段）の比すなわち系としての全体捕集効率を示す。

二段清澄を行う場合の各段での供給液／清澄液濃度を C_{i1}/C_{o1} , C_{i2}/C_{o2} とすると各段単独の全体捕集効率 E_1 , E_2 は以下の式で表される。

$$E_1 = \left\{ 1 - \frac{C_{i0}}{C_{i1}} \right\} \times 100 (\%), \quad E_2 = \left\{ 1 - \frac{C_{o2}}{C_{i2}} \right\} \times 100 (\%)$$

このとき総合的捕集効率 $E_{1/2}$ は

$$E_{1/2} = \left\{ 1 - \frac{C_{o1}}{C_{i1}} \cdot \frac{C_{o2}}{C_{i2}} \right\} \times 100 (\%)$$

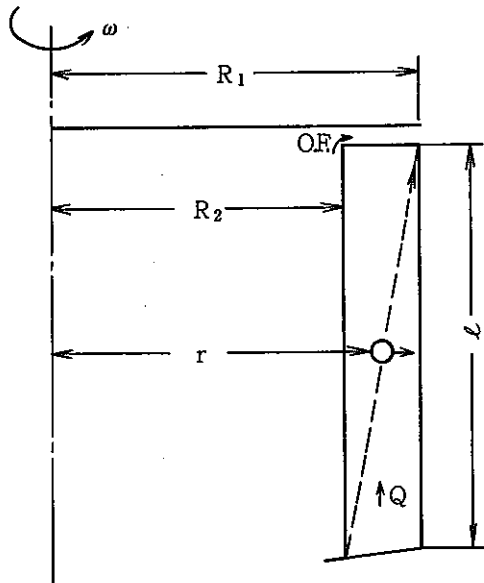
ただし $C_{i2} = C_{o1}$ と考えられるので、

$$= \left\{ 1 - \frac{C_{o2}}{C_{i1}} \right\} \times 100 (\%)$$

・限界粒子径（測定／計算値）

限界粒子径（測定値） $D_{e,t}$ については部分捕集効率の項参照。

限界粒子径（計算値） $D_{e,m}$ については以下の方法で算出する。



R_1 : ボウル半径 : (m)

R_2 : 液面半径 : (m)

l : 有効分離長 : (m)

Q : 給液量 : (m^3/sec)

ω : 角速度 : (rad/sec)

($=2\pi N$, N 回転数)

r : 回転軸から粒子までの距離 : (m)

D : 粒子径 : (m)

ρ_p : 粒子密度 : (kg/m^3)

ρ_l : 液密度 : (kg/m^3)

η : 液粘性 : ($kg \cdot sec/m^2$)

O.F: オーバフロー

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、

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

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、 $\int_0^T \frac{dr}{dt} \cdot dt \geq (R_1 - R_2)$

$\int_0^T \frac{dr}{dt} \cdot dt = (R_1 - R_2)$ の場合の D を限界粒子径 $D_{e,m}$ と称する。

このとき

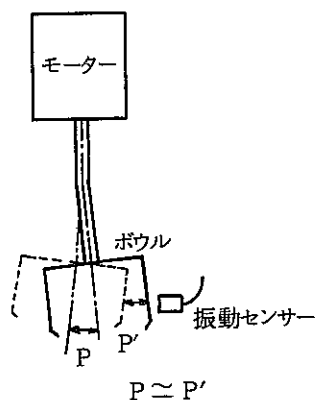
$$D_{e,m} = \left[\frac{18\eta Q l_n \frac{R_1}{R_2}}{(\rho_p - \rho_l) \pi l \omega^2 (R_1^2 - R_2^2)} \right]^{1/2}$$

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

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

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2,000(G)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及び異常検出のため、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、



に、軸振動を表すと考えることができる。

設計上 0.6mm P-P を限界値としている。

なお、単位mm P-Pはmm・peak to peak (全振幅)を示す。

- ・粒子径 不溶解残渣又は模擬不溶解残渣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 μm (10^{-6}m)を使用する。粒径と略する場合もある。
- ・平均粒子径 粒子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、その粒子径を一般に平均粒子径という。

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。

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

d : 個々の粒子の直径

n : 粒径 d の粒子の個数

この他、補助的に個数平均径を使用する場合もある。

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

- ・粒子濃度 溶解液中の固形分、試験液中の模擬粒子の濃度。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 g/ℓ 又は mg/ℓ (ppm)とし、1 ℓ の溶媒中に存在する固形物の重量(g, mg)と定義する。

- ・粒子径分布 重量(体積)分布及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} : 給液中の粒径 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 : 給液中の粒子濃度 ($= \sum_{dx=0}^{dmax} C_{odx}$) (g/l) P_o : 粒子径分布 ($\sum_{dx=0}^{dmax} P_{odx} = 1$)

C_i : 清澄液中の粒子濃度 ($= \sum_{dx=0}^{dmax} C_{idx}$) (g/l) P_i : " ($\sum_{dx=0}^{dmax} P_{idx} = 1$)

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。

遠心清澄機ボウル内での粒子の挙動はストークスの法則に従うものとする。

理論モデルを下に示す。

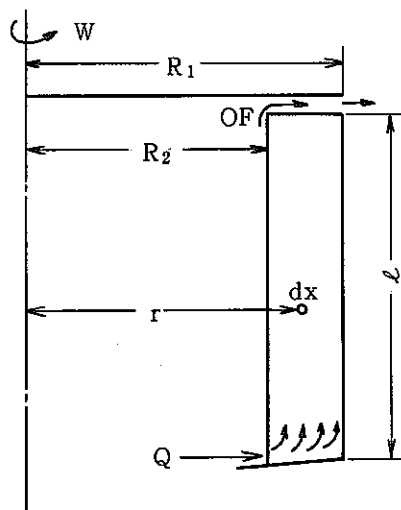


図 B.1 清澄理論モデル

代表的数値

粒子密度 ρ_p (g/cm ³)	3.99
分散媒密度 ρ_1 (g/cm ³)	1.00
分散媒粘性係数 η (g·sec/cm ²)	0.01
処理液量 Q (cm ³ /sec)	27.8 (100 l/hr)
有効分離長 l (cm)	26.0
角速度 ω (rad/sec)	314 (3,000rpm)
$= 2\pi N$ N : ボウルの回転数	
ボウル内表面半径 R_1 (cm)	20
液面半径 R_2 (cm)	18.5

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)の粒子の沈降速度は次式で表される。

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

この式を積分し、時間T内に位置rからR₁まで粒子が沈降する場合の条件を得る。

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

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

④式に①式を代入すると

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

⑤式を整理すると

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

この式は遠心清澄機において、位置r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起こりうる最小の粒子径dxを示す。

⑥式においてr=R₂とおいた場合に得られる粒子径d_eを一般に限界粒子径と呼ぶ。すなわち、d_n ≥ 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、d_n ≥ d_eの粒子に関しては捕集効率1となる。

次に、d_n < 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子径d_nの粒子は給液時点で位置r又はそれ以上(r ~ R₁)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なれば、粒子径d_n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

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

参考のため、限界粒子径 d_e に対する d_n の比によって⑧式を整理する。

$$de^2 = \frac{18\eta Q l_n \frac{R_1}{R_2}}{(\rho_p - \rho_1)\pi l \omega^2 (R_1^2 - R_2^2)} \dots\dots\dots ⑨$$

⑨式を⑧式に代入すると

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

以上をまとめると、粒子径 d_n の粒子に対する部分捕集効率は以下のようにになる。

$$\text{部分捕集効率 } P = \begin{cases} 1 & dx > de \\ \frac{1}{1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2} \left[1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 \left(\frac{dx}{de}\right)^2 \right] & dx \leq de \end{cases} \dots\dots\dots ⑪$$

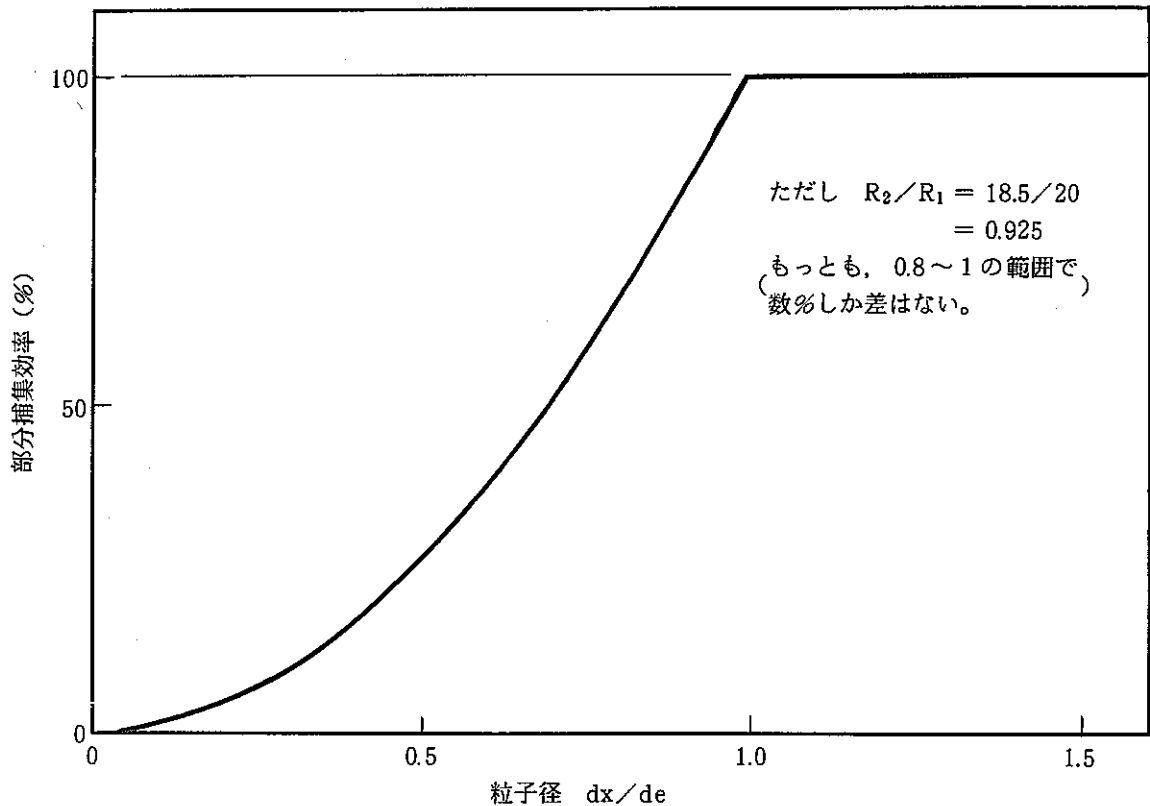
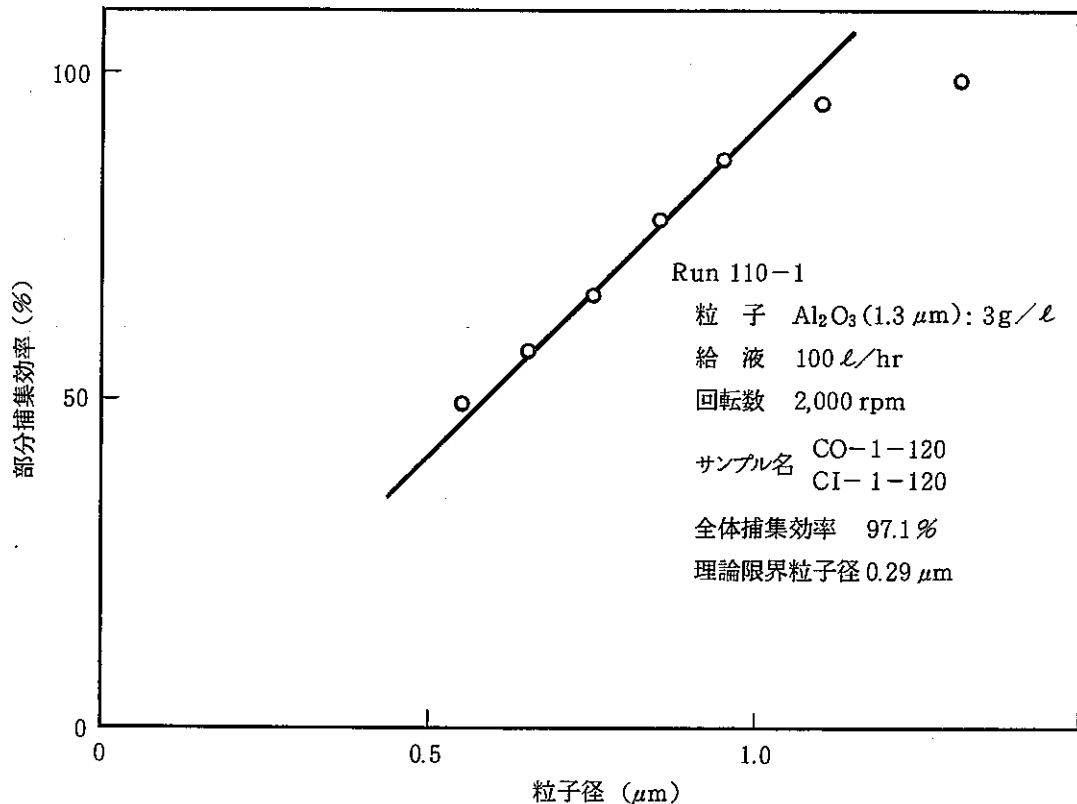


図 B.2 理論的部分捕集効率

前頁の図からわかるように部分捕集効率50%以上の領域ではほぼ直線的な関係が得られる。これに対する、実際の測定値の例を図B. 3に示す。



図B.3 部分捕集効率 (CC-110-1 120 min)

図B. 3をもちいて限界粒子径をもとめると、図に示すように $1.07 \mu\text{m}$ ($1.05 \sim 1.10$ 程度の範囲)となる。理論値 ($0.29 \mu\text{m}$) に対し3~4倍大きい。清澄特性の評価には適当と考えられる。今後この値を限界粒子径 (測定値) と呼ぶ。

参考のため、限界粒子径の計算値と測定値の比較例を図B. 4に示す。

計算値 D_{et} と測定値 D_{em} はかなりの差があるが、何らかの相関があることは確かである。一定の比があると仮定し、その係数を f_s として、次のように表した場合

$$D_{\text{em}} = f_s \cdot D_{\text{et}}$$

f_s は4~5という値をとる。

なお、この差については、ボウル内での液の流れ (層流と仮定) に乱れがある、液の回転がボウルに対して遅れているため遠心効果が小さめに働く、粒子間の相互作用等様々な要因が考えられる。今後、ボウル形状の改良により測定値を理論値に近づける (清澄性能の向上を意味する) ことが可能であるかどうかの検討も有益と考えられる。

Run 106(2,500, 3,000, 3,300 rpm/100 ℓ/hr)

110(2,000, 3,000/100)

111(2,000/100)

112(3,000/100, 150)

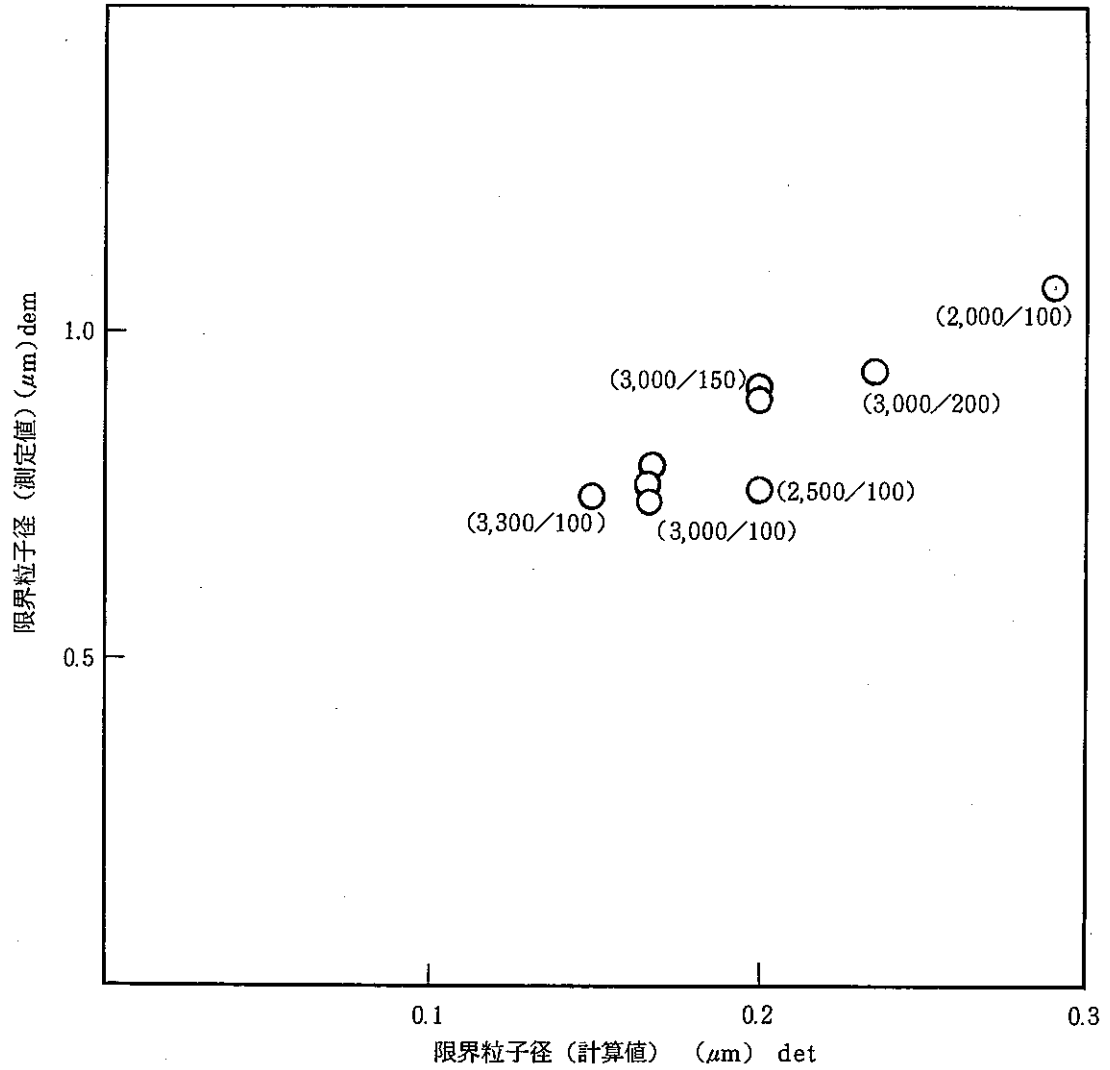


図 B.4 限界粒子径の測定値と計算値の比較

付録3 Dounreay型遠心清澄機に関する説明

1. 概要

Dounreay型遠心清澄機は、英国VERO社によりChemical Plant Centrifugeとして市販されている装置であり、PNC型機との比較のために59年度に購入した。その概略構造を図C.1に、主要諸元を表C.1に示す。

本装置の特徴は、スラッジを捕集したボウルを廃棄する点である。

ボウルの交換は直接作業の場合三分程度で可能である。ホットセルにおいても専用掴み治具とマニプレータにより比較的簡単に行えるものと考えられる。

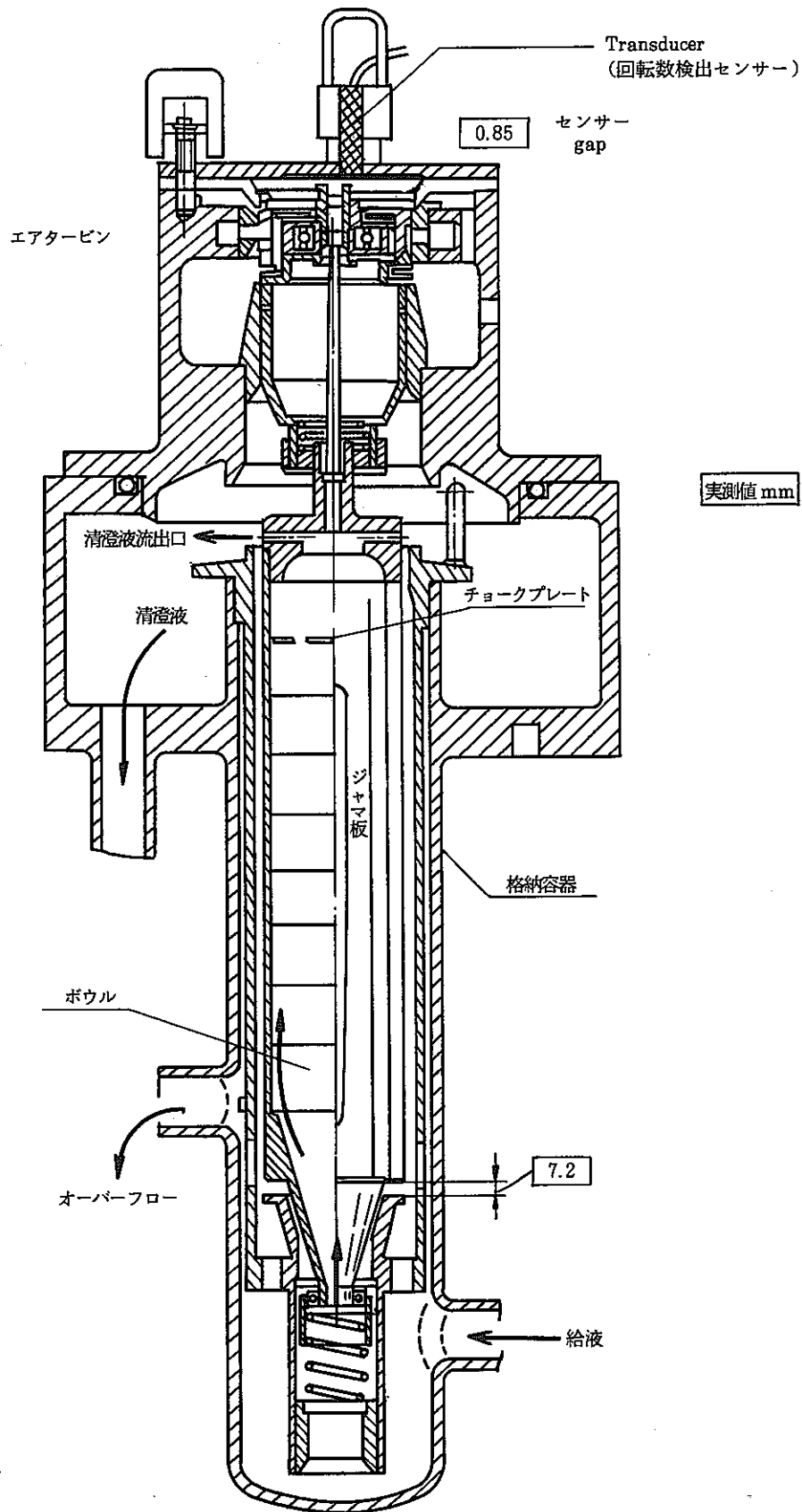


図 C.1 Dounreay 型遠心清澄機概略

表 C.1 主 要 諸 元

Speed range	15,000 to 40,000 rpm
Design speed	20,000 rpm
Max. centrifugal force	45,000g (at 40,000rpm)
Design centrifugal force	11,250g (at 20,000rpm)
Bowl: insicie diameser	50mm
Bowl:inside length	250mm
Bowl: capacity	350cm ³
Drive	Air turbine
Air consumption	0.01M ³ /sec free air at 140kN/M ² gauge with 30cm ³ /sec liquor flow and 20,000rpm
Materials of construction	Stainless steel
Overall height	600mm
Overall diameter	200mm

注) ・ Air consumption の項において

$$\begin{aligned}
 0.01 \text{ m}^3/\text{sec} &= 10 \text{ l}/\text{sec} \\
 &= 600 \text{ l}/\text{min} \\
 &= 36 \text{ Nm}^3/\text{hr}
 \end{aligned}$$

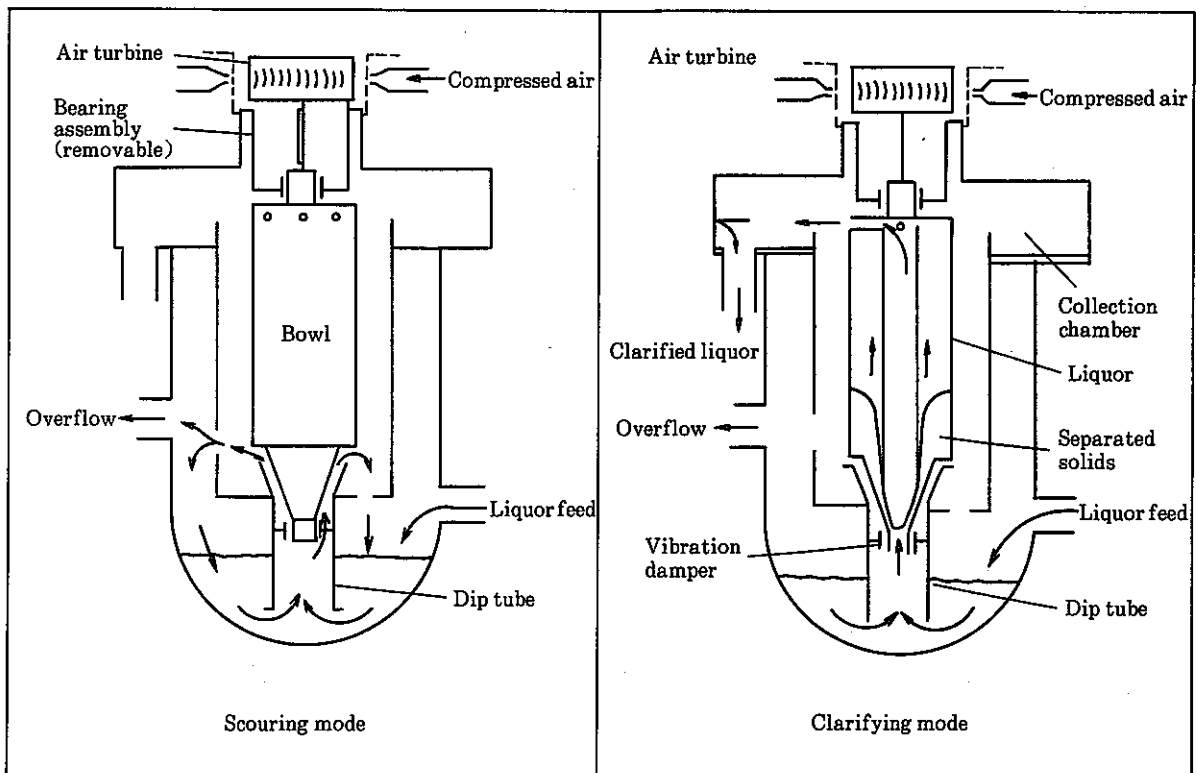
$$\begin{aligned}
 140 \text{ kN}/\text{m}^2 &= \left(\frac{140}{98} \right) \text{ kg}/\text{cm}^2 \\
 &= 1.43 \text{ kg}/\text{cm}^2
 \end{aligned}$$

2. 運転方法

2.1 運転モード

本装置内での液の動きは、ボウル回転数によって異なり、バルブ等によらないで、清澄運転の開始、終了等进行操作できる。図C.2に各モードでの液の流れを示す。

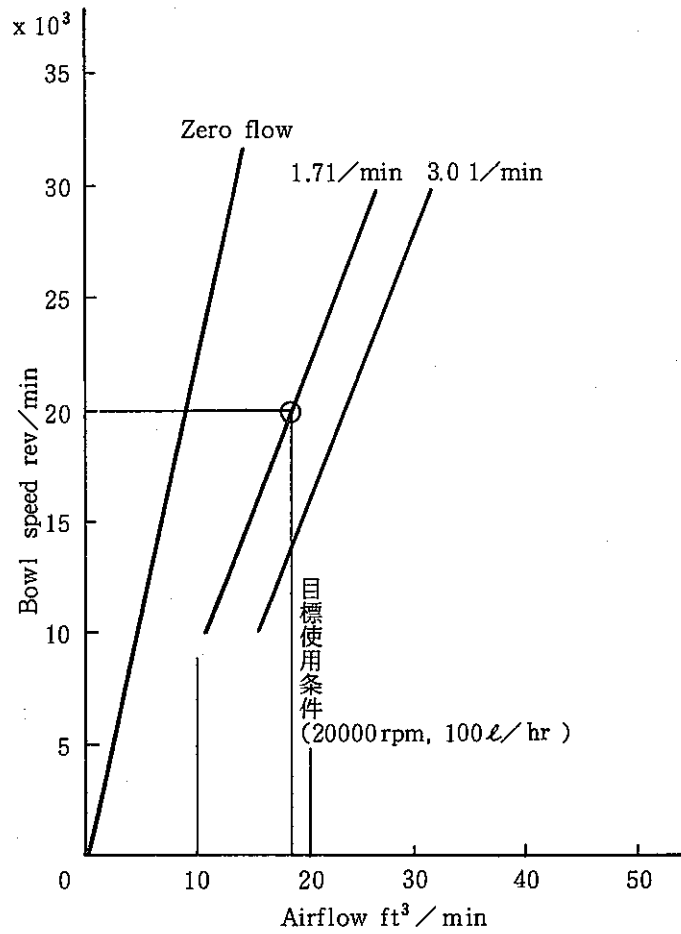
- ・ Scouring mode : 8,000rpm以下では、Dip tubeの細路部をサイフォンの作用で水が上がり、循環が起こり、固形物の攪拌を行う。8,000rpm程度になると遠心力が強くなり、液が切れ、攪拌が止まる。
- ・ Clarifying mode : 操作回転数 (10,000rpm 以上) になると、ボウル内の圧力が下がり、吸引、清澄を開始する。



図C.2 Dounreay型遠心清澄機内の液の流れ

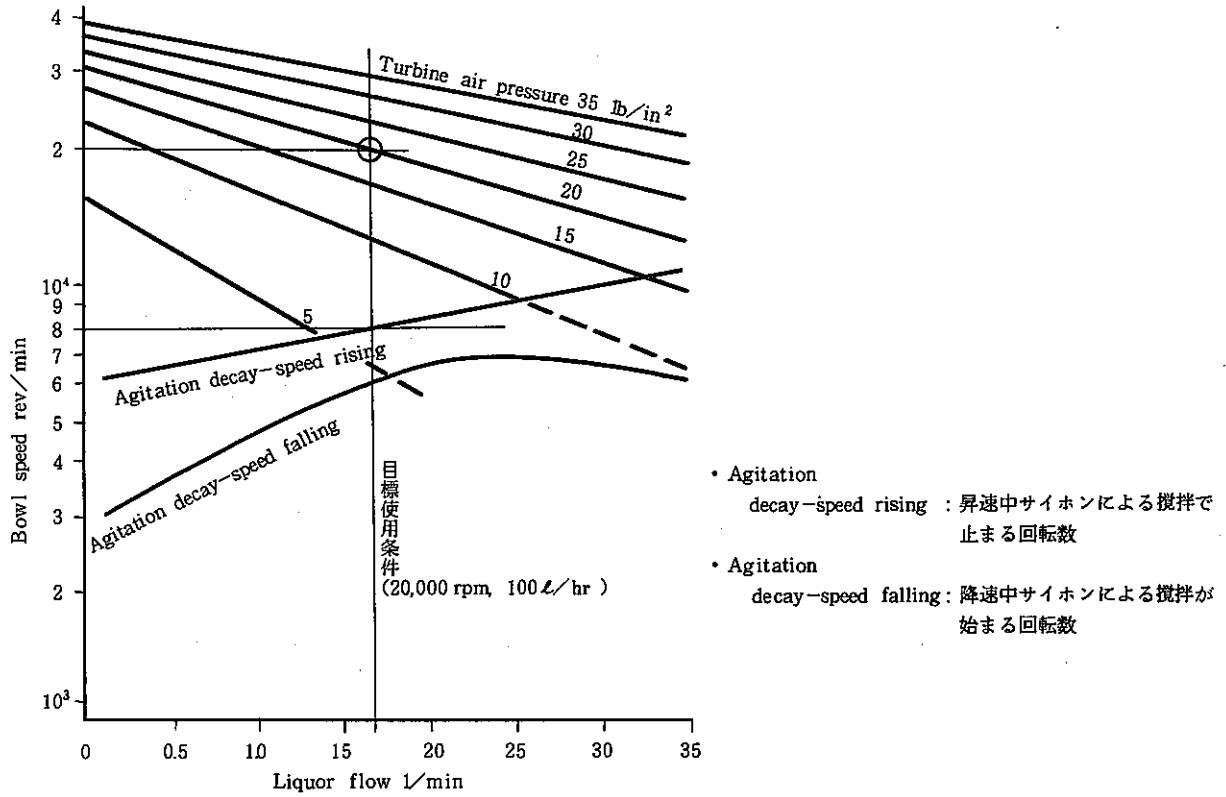
2.2 運転条件

本装置はエアタービン駆動方式を採用しており、使用するエア圧及び給液量によってボウルの回転数が決まる。図C.3に一定エア圧時の液流量に対する回転数、図C.4にエア消費量に対する回転数を示す。



図C.3 Turbine air consumption vs speed

今回の目標条件 (20,000rpm, 給液100ℓ/hr)を得るために必要なエア圧は、図より、約1.41kg/cm² (2.01lb/in²) である。



図C.4 Liquor flow through bowl vs speed

2.3 スラッジ捕集状況の検知

通常の運転中、チョーク・プレートが組み込まれていない場合、固形物がだんだんボウルに溜まっていく途中ではどれだけ溜まったかわからず、固形物があふれ、出口側の浄化された液体を汚染することによって初めて満杯になったことがわかるがこれはプロセス上好ましくない。

この対策のひとつとして、運転時間によって、ボウルの廃棄物量を推測し、満杯になる前に運転を終えることも考えられるが、これはボウル容量の非効率的な使用となる。チョーク・プレートの使用によりこの問題を解決することができる。液体の浄化中に、ボウル内の蓄積された固形物の固まりは徐々にボウルの底部から上部へと移行してゆくが、じゃま板の効果によって、固形物の先端は明確に区切られながら上昇する。形成された固形物のみかけの内径はボウルの入口、出口のそれぞれの内径の間の値になる。固形物は下部で上記の名目上の内径であり、壁に沿って上にいくにつれて薄くなり25~40 mmでその先端に達する。(実際の形状は集積される固形物の性質により異なる) こうした性質は運転中のボウルの容量に限度を設けるために利用されている。

チョーク・プレートをいずれか2つのセプタの間に置くことによってそのボウルの容量をあらかじめ決めることができる。

固形物の先端がチョーク・プレートに達すると通路がふさがれ、ボウル内の液体流量は減少する。液体の供給量は一定なので格納容器の底部にある液体の水面はボウルの底を浸すまで上昇する。

ボウルの外側の液体によって生じる引力によって遠心機の色度は極端に低下する。これは検出可能であり、運転停止可能である。検査時には、ボウルはチョーク・プレートの位置まで固形物で一杯になっているはずである。

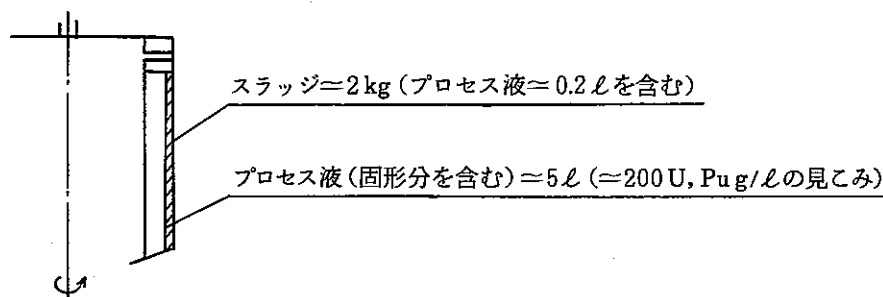
多量の液体が流れ始めるのは、遠心機の色度が最初に上昇したことによって通常わかる。これはボウル内の流量が減少することにより回転に必要な力が減少して、大量の液体が流れる前に速度が上がることになるからである。固形物が溜まった後万一運転を停止しない場合でも液体はオーバーフローから流れ出すので、浄化された液体を汚染することはない。

付録4 スラッジ洗浄操作に関する検討

遠心清澄機に対する一バッチの給液が終了した後に捕集したスラッジの洗い出しを行うわけであるが、この際の手順について考えてみる。

なお、モデルとしては、既設遠心清澄モックアップ装置のボウル部と同一設計のボウルを想定する。

給液終了時点でのボウル内の状況は下図のようであると考えられる。



この中に含まれるU, Pu量は1 kg前後であり、これは当然回収の必要がある。方法としては、

- 1) 回転を停止し、リーク回収ラインを経て溶解液受槽に戻す。
- 2) リンシング液（硝酸）を供給し、プロセス液を清澄側へ追い出す。

前後プロセスの効率から考えると2)の方が望ましいが、このリンシング液で清澄液を希釈することになるため、必要な液量について考慮する必要がある。本装置の設計にあたっては、ボウル内の液は給液位置からオーバーフロー直前まで壁面と平行に流れると仮定している。この場合ボウル内の液量に相当する5 ℓを給液すれば内部の液が押し出される理屈であるが、実際には内部でホールドアップ分と給液の間に液交換が行われていると考えべき理由があるため、安全側にみて完全混合が行われていると考える。この場合、例えばU, Pu濃度200g/ℓから1 g/ℓ又は10mg/ℓまで希釈するのに必要な液量は、 $C_{(v)} = C_0 \cdot e^{-\frac{V}{5}}$ よりそれぞれ約30 ℓ, 50 ℓである。

リンシング液の供給方法としては、溶解液受槽にリンシング液として供給し、槽内の液追い出しを兼ねるといことも考えられる。いずれにせよ、30~50 ℓ又はそれ以上のリンシング液による希釈が許容されるかどうかについてはプロセス設計側の判断をおおぐ必要があると考えられる。

一方、これが許容されない場合、1)に示すように、回転停止時に落下するスラッジを含むプロセス液を回収し、溶解液受槽へ戻すという手段を取る必要が生じる。この方法で問

題となるのは運転停止時に落下する液に、捕集したスラッジが同伴し、スラッジの滞留を生じる可能性である。アルミナ等を用いた試験において、運転停止時に落下する液濃度を測定した所、供給液と同レベルであったが、スラッジがボウル壁にどの程度堅固に付着するかは、スラッジの物性によるため、ホット試験を行わない限り確証は得られない。従って、あくまでも2)の方法が本筋ということになる。

フリー状態のプロセス液の回収ができたと仮定すると次に問題となるのはスラッジ中に含まれるプロセス液中のU, Puである。不溶解残渣の平均比重 7g/cm^3 、量 2kg とすると真体積は約 290cm^3 であるが、液中のスラッジの見かけ比重は真比重の $1/3$ 程度とみる必要があるとされている。そこで安全側にみると全体積は約 870cm^3 で約 580cm^3 のプロセス液を含んでいることになる。これは、U, Pu量として約 120g に相当し、無視できない。そこでこの液の置換操作も考えておく必要があるが、そもそもボウル内壁にはりついたスラッジ中の液をスラッジ上を流れる液によって希釈できるかについてはまったく未知である。この点についてまずコールド試験を行った上で詳細の条件検討を行うべきであろう。

以上の操作が完了してはじめてスラッジの洗い出しを開始することになる。本装置はボウル内部洗浄用に3個のノズルをそなえており、ボウルを低速($<100\text{rpm}$)で回転させながら高圧水(又は硝酸)を吹きつけてスラッジを洗浄する。

ここで検討すべき問題はスラッジ洗浄に必要な洗浄水量と吐出圧である。モックアップ装置の場合高圧ポンプによって $15\text{kg/cm}^2\text{G}$ の水圧を得ており、 40l 程度の洗浄水を必要とするが、水圧を減らした場合、より多くの洗浄水を要する見込みを得ている。一方、実機を設置するFBR再処理試験施設又はホット工学試験施設において、圧力 $15\text{kg/cm}^2\text{G}$ 又はそれ以上の水又は空気というのはユーティリティとして非現実的であるため、より低圧で成立する洗浄システム又は清澄工程独自の加圧システム(ポンプ等)の採用を考える必要がある。

PNC SN 8410 87-62

付録 5 参 考 資 料

P.No	名称
1	ボウル
2	清澄用高速モータ
3	回転軸
4	上部玉軸受
5	下部 "
6	ダンパ
7	模擬しゃへい
8	下部タンク
9	清澄液排出口
10	洗浄ノズル
11	供給ノズル
12	スラッジ排出口
13	洗浄用低速モータ
14	電磁クラッチ
15	模擬中性子吸収体
16	カップリング
17	冷却フィン
18	ガイド棒 (軸受用)
19	ガイド棒 (モータ用)
20	取手
21	吊金具
22	ベンチレーション
23	架台
24	回転計
25	加速度計

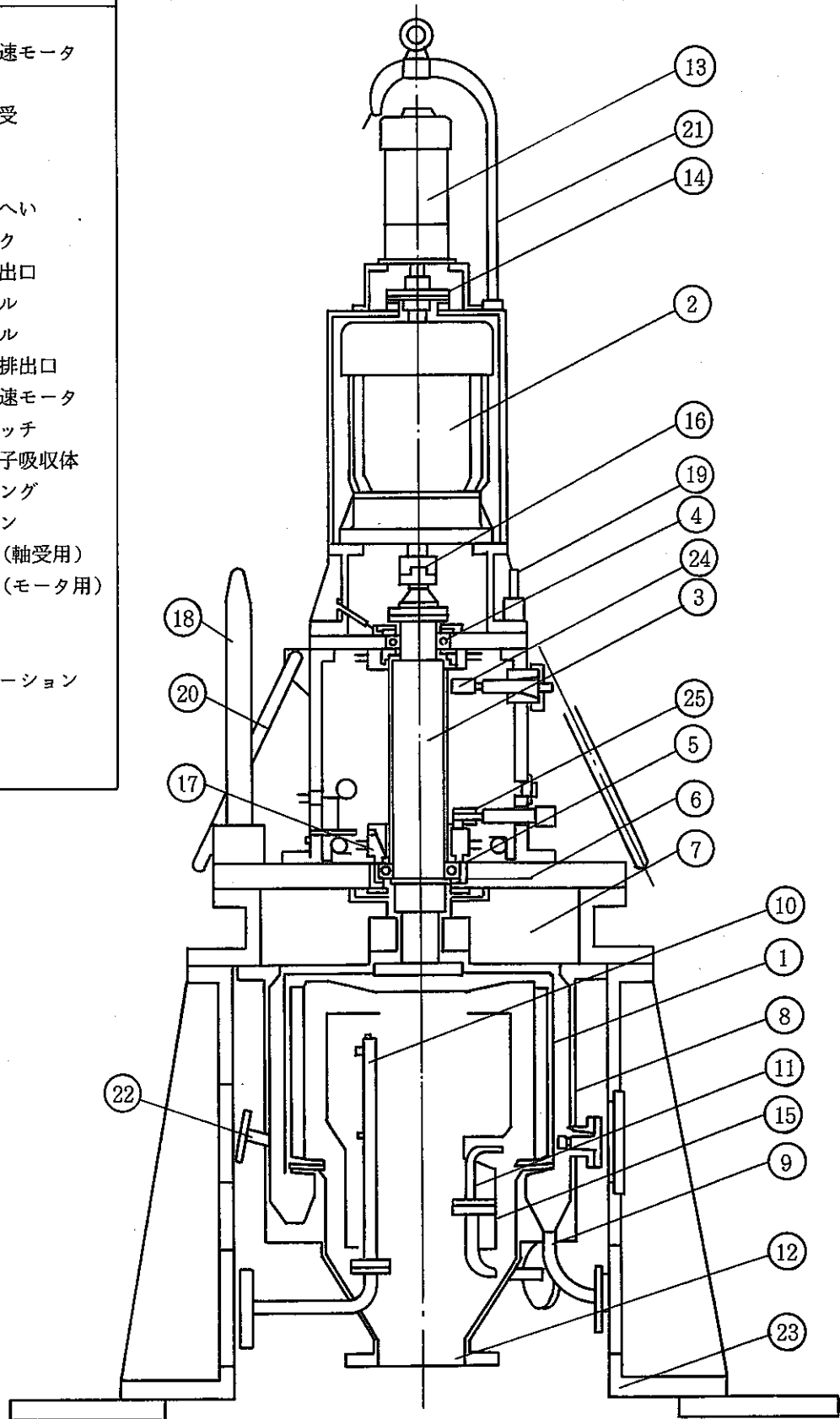


図 E.1 遠心清澄機の構造

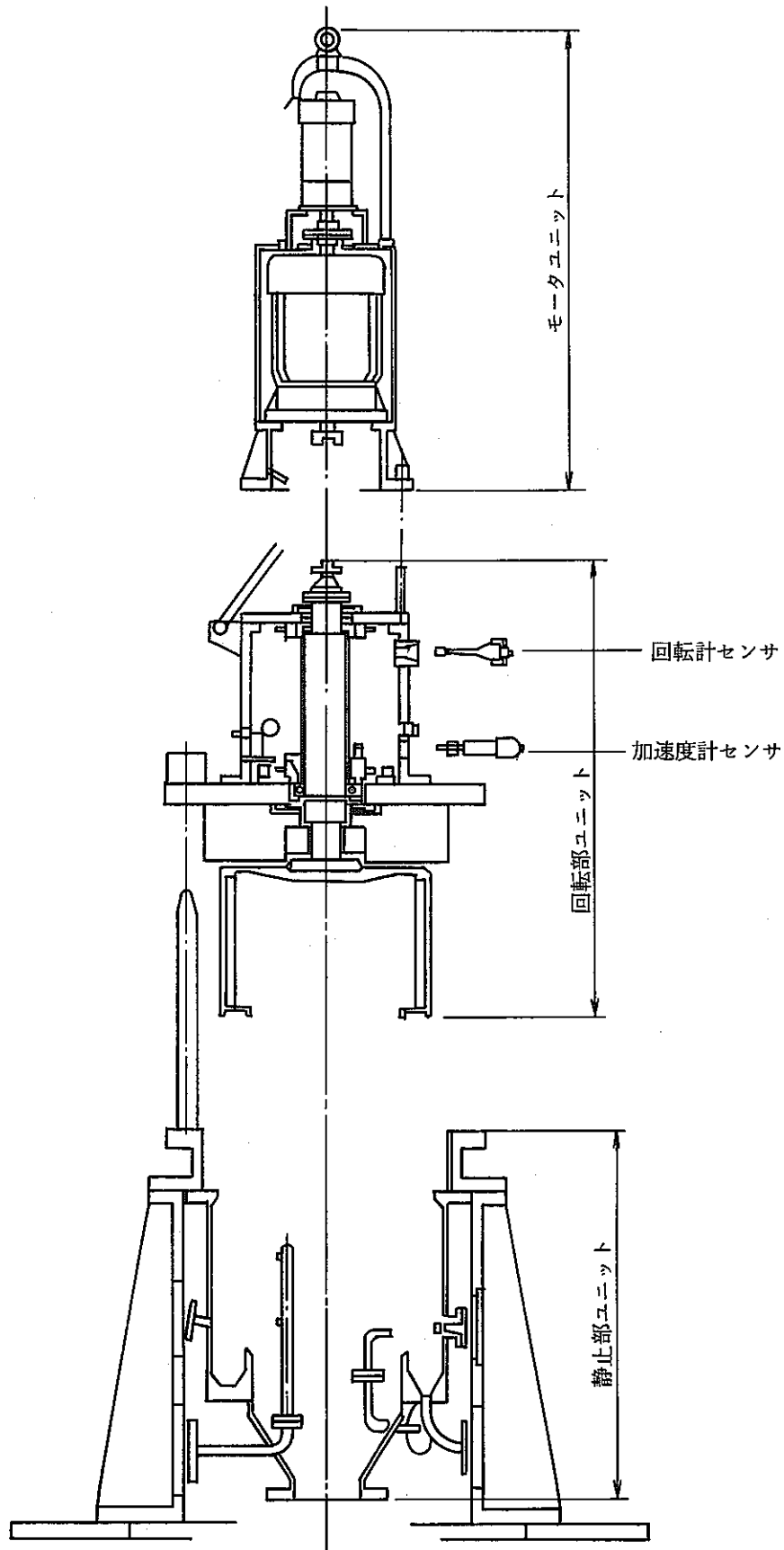


図 E.2 遠隔保守で分解組立可能な単位