

ショートプロセス技術開発

－ 1. Pu 富化度調整技術開発 －
(平成12年度実績報告)

(研究報告)

2001年3月

核燃料サイクル開発機構
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
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)

ショートプロセス技術開発
- 1. Pu 富化度調整技術開発 -
(平成12年度 実績報告)
(研究報告)

高澤 寛*、川辺 晃寛*、栗田 勉*、田中 泉*

要 旨

プルトニウム転換技術開発施設では、FBR 発電コストの低減に向けた MOX 燃料製造コスト低減を目的として、プロセスの簡素化による設備数の削減、稼働率の向上、製品品質の安定化、ホールドアップ量の低減、核物質搬送の効率化や運転員の削減による運転費の削減のための合理化（以下、「ショートプロセス」と記載）に関する研究開発をプルトニウム燃料センターと協力して行っている。

既存のプロセスでは、脱硝工程、焙焼・還元工程の後工程である粉末混合工程において粉末を添加することにより Pu 富化度調整を実施している。これに対して、本ショートプロセスでは、工程の簡素化を目的に、Pu 富化度の調整を溶液混合のみで実施することを前提としており、Pu 及び U の硝酸溶液の混合を従来よりも高精度で実施することが必要となる。

しかしながら、既存の転換工程は、溶液混合段階で高精度な溶液混合を実施する前提では設計されていないことから、まず、ショートプロセスにおける燃料仕様を満足する溶液混合が、既設設備で実現可能であるか評価・検討を実施する必要がある。

そこで、平成11年度には、既設の溶液混合工程の溶液混合精度を評価するために、既設の溶液混合工程におけるエアリフトポンプ式送液装置のモックアップ装置を製作した。

本年度は、昨年度製作した装置を使用して、既設の溶液混合工程の溶液混合精度を評価を実施し、既存の設備では、溶液調整のみで燃料仕様を満足する Pu 富化度調整を実施することが不可能であることを確認した。また、エア流量、真空度及び溶液密度等をパラメータとして送液試験を実施し、送液速度、配管内滞留量等の送液に関する特性を測定した。

また、これらの送液特性に関するデータを基に、溶液混合精度向上の検討を行い、装置一部の改造及び送液手順の変更を検討した。さらに、実際に既存のモックアップ装置を一部改造して送液試験を実施し、送液精度に関する評価・検討を行い、溶液混合のみでショートプロセスにおける燃料仕様を満足する Pu 富化度調整が可能であることを確認した。

本報告では、ショートプロセス技術開発のうち、Pu 富化度調整技術開発として平成12年度に実施した業務内容について報告する。

* 東海事業所 再処理センター 処理部 転換技術課

Development of producing MOX fuel by "Short Process"
- 1. Development of Pu/U ratio control by liquid mixing -
An annual report in fiscal 2000

Yutaka TAKASAWA*, Akihiro KAWABE*
Tsutomu KURITA*, Izumi TANAKA*

Abstract

In plutonium conversion development facility (abbreviated to PCDF) in JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute) Tokai Reprocessing Plant, investigations of producing MOX nuclear fuel by a simplified process have been studied. A study of this process, which is called "Short Process", has been carried out for the purpose of decreasing the production cost of MOX fuel in cooperation with plutonium fuel center in JNC Tokai Works.

The purposes for this study are,

1. to decrease the number of equipment by the simplification of our MOX fuel production process
2. to improve the working ratio
3. to stabilize the quality of MOX fuel
4. to decrease the amount of the hold-up of MOX fuel in glove boxes
5. to improve an efficiency of transporting nuclear materials
6. to decrease operating cost

In this "short process", it is necessary to mix plutonium nitrate solution and uranium nitrate solution with relatively high accuracy on the assumption that the adjustment of Pu/U ratio is controlled as a liquid state. As a result, the volume of these nitrate solutions has to be measured and transported to another vessel within high accuracy.

At first, in fiscal 1999, a mock-up apparatus equipped with airlift systems, which imitated solution-mixing process in PCDF, was designed, made and assembled together.

In fiscal 2000, by using this mock-up airlift apparatus, transferring experiments were carried out both to estimate the accuracy of Pu/U mixing ratio in PCDF operation plant and to confirm characteristics of the airlift pump systems in PCDF.

The results showed that Pu/U ratio control in PCDF plant could not always satisfy the specifications for MOX fuel.

From both the operation data in PCDF and results of our experiments, investigations were carried out for the purpose of improving the accuracy of Pu/U ratio control. Our mock-up airlift apparatus was modified and the accuracy of Pu/U ratio control was reexamined.

It was confirmed that Pu/U ratio control by modified airlift systems was within the accuracy required by the specification for MOX fuel.

The development of Pu/U ratio control by liquid mixing in fiscal 2000, which has been carried out as one of the "Short Process" studies, is reported in this report.

* Plutonium Conversion Technology Section, Tokai Reprocessing Plant, Tokai Works

目 次

1. 緒言	1
2. 開発スケジュール	3
3. 既設工程の調査	6
3.1 工程及び設備の概要	6
3.2 モックアップ対象機器の概要	7
3.3 運転情報の調査	8
3.3.1 ショートプロセスにおける Pu 富化度調整精度の目標	8
3.3.2 溶液の混合手順	9
3.3.3 現状の Pu/U 比の精度	10
3.4 計測および分析情報の調査	12
3.4.1 計測情報	12
3.4.2 分析情報	15
4. エアリフトポンプの理論	32
5. 送液試験	35
5.1 目的	35
5.2 試験装置	35
5.3 測定装置の校正	62
5.4 模擬溶液の検討	69
5.4.1 溶液基礎物性の調査	69
5.4.2 模擬溶液の選定	78
5.5 送液特性把握試験	86
5.5.1 目的	86
5.5.2 試験条件の検討	86
5.5.3 試験方法	88
5.5.4 試験結果	90
5.5.5 試験結果の検討	118
5.5.6 まとめ	130
5.6 送液精度評価試験	131
5.6.1 目的	131

5.6.2	試験条件の検討	131
5.6.3	試験方法	133
5.6.4	試験結果	134
5.6.5	試験結果の検討	147
5.6.6	まとめ	151
6.	試験装置の改造	152
6.1	目的	152
6.2	改造検討	152
6.2.1	改造案の提案	152
6.2.2	改造案の検討	153
6.2.3	定量槽構造の検討	154
6.3	試験装置および方法	157
6.3.1	試験の概要	157
6.3.2	試験装置	157
6.3.3	試験方法	158
6.4	試験結果	164
6.4.1	定量槽の性能確認	164
6.4.2	定量槽設置後の送液挙動確認試験	165
6.5	試験結果の検討	167
6.6	試験結果のまとめ	171
6.7	Pu/U 溶液混合精度の評価	172
6.7.1	前提条件	172
6.7.2	誤差の検討	174
6.7.3	Pu 富化度および溶液濃度の影響	177
6.7.4	まとめ	178
7.	結言	189
8.	参考文献	190
	添付資料	191

1. 緒言

プルトニウム転換技術開発施設では、マイクロ波加熱直接脱硝法により得られた MOX 粉末を FBR 燃料ペレットに直接成形するプロセス（以下、「ショートプロセス」と記載）の研究開発をプルトニウム燃料センターと協力して行っている。

現行プロセスは、MOX (Pu/U=1/1) 粉末、UO₂ 粉末、乾式回収粉末の 3 種類を所定の Pu/U 比に調整するための混合、ペレット成型のための添加剤混合、添加剤を除去するための予備焼結・脱ガスなどを含め、全部で 30 の工程から構成されている。この現行プロセスは、粉末取扱い工程が多いことによる設備内核物質滞留量の増大、工程数が多いことによるメンテナンス頻度あるいは運転員の被ばくの増大等の問題に加え、原料粉末が 3 種類であることによる焼結挙動への影響因子の増加などの問題点がある。

これに対して、ショートプロセスでは、燃料仕様を満足した Pu 富化度調整を溶液混合工程のみで行うことを前提にしており、上記の問題点の解決が期待されている。しかしながら、プルトニウム転換技術開発施設内の既存の設備では、設計段階において溶液混合工程における Pu 富化度調整は考慮されておらず、溶液混合工程において燃料仕様を満足する Pu 富化度調整を実施するためには、

- ① Pu/U 溶液混合方法の改良
- ② 液面微調整方法の開発
- ③ 高精度計量器の開発

等の技術開発が必要不可欠であるものと考えられる。

そこで、

- ① 既存設備の溶液混合精度の把握
- ② 送液精度向上の検討

を実施するために、昨年度は、プルトニウム転換技術開発施設の溶液混合工程で実際に使用されているエアリフトポンプ式送液装置のモックアップ装置を製作した。

引き続き本年度は、昨年度製作した装置を組み立て、模擬溶液を使用して送液試験を実際に実施し、既存送液設備の精度評価を行う。また、この既存設備

の送液精度評価結果より、燃料仕様を満足するPu 富化度調整を実施することが、既存設備のままでは困難であると判断された場合には、燃料仕様を満足する溶液混合を実現するための、装置改造及び送液手順の変更等の対策を施した後に、再度送液試験を実施し、送液精度を評価・検討する。

2. 開発スケジュール

ショートプロセス技術開発スケジュールを表 2-1 に示す。

本ショートプロセス技術開発は平成 11 年度から 14 年度の間実施され、Pu 富化度調整技術開発、粉末流動性改良技術開発、ペレット直接成型試験、ペレット溶解性評価試験、ダイ潤滑型成型機の開発及び粉末気流搬送システム開発に分けられる。

Pu 富化度調整技術開発は、

- ① ビーカスケール試験
- ② 高精度溶液計量法開発

に分けられる。

①はペレット直接成型試験に提供するために、Pu 富化度を調整した粉末をピカ規模で製造するものであり、②は溶液混合工程での Pu 富化度調整方法及び溶液調整に必要となる送液計測制御システムの検討を行うものである。

本報告書は、上記の②のうちの Pu/U 溶液混合における Pu 富化度調整技術開発に関する検討結果を報告するものである。

昨年度は、既存の溶液混合工程で使用されているエアリフトポンプの調査を実施し、モックアップ試験で必要となるモックアップ装置の製作を実施した。

本年度はこのモックアップ装置を使用して送液試験を実施し、各種試験データを取得し、溶液移送精度を評価・検討する。

本年度の検討結果を受け、平成 13 年度には溶液計測制御系を含めた溶液混合システムの検討を実施する予定である。

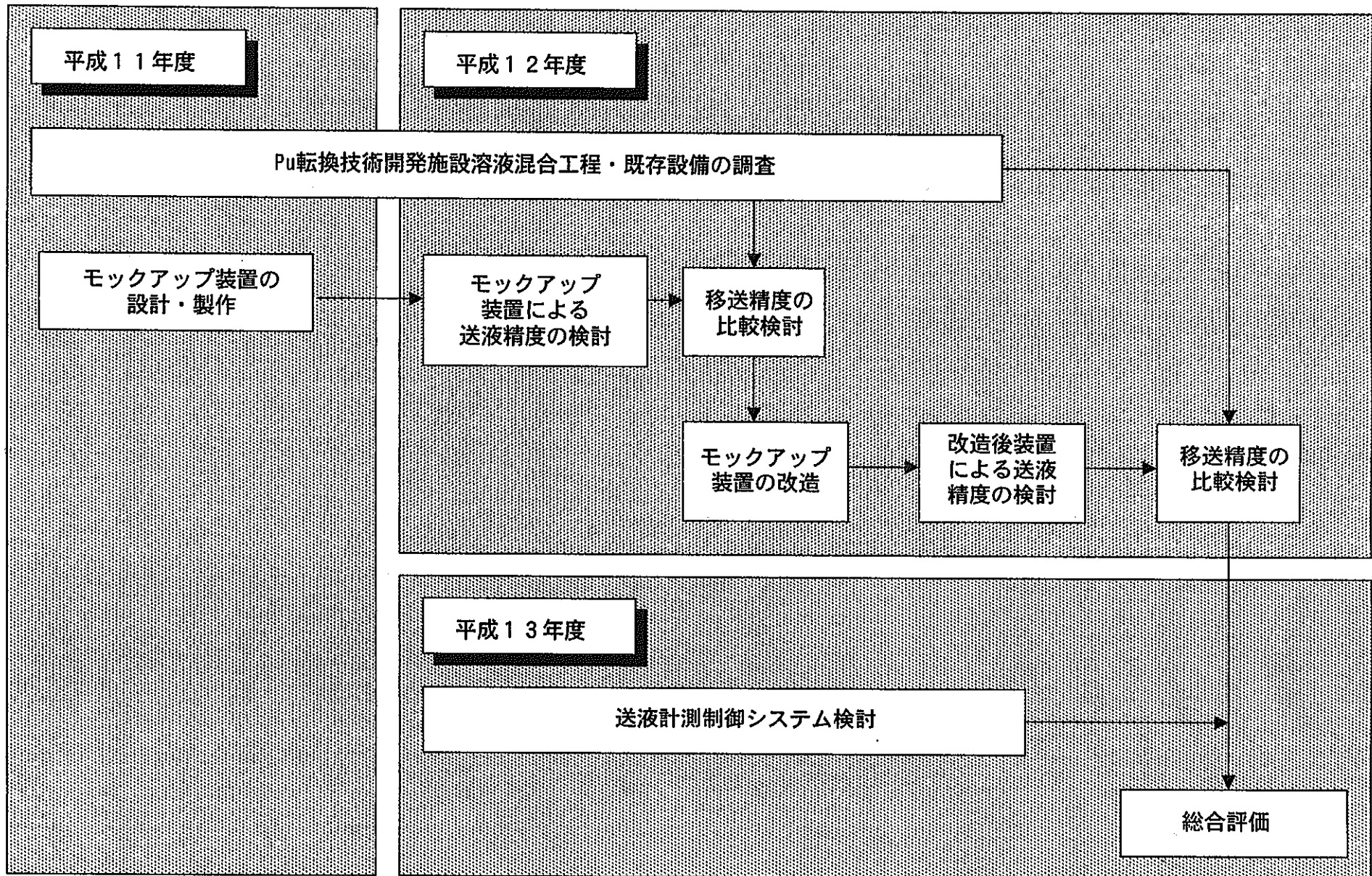
Pu 富化度調整技術開発に関する平成 11 年度～平成 13 年度のスケジュールのフロー図を図 2-1 に示す。

表2-1 ショートプロセス技術開発スケジュール(平成11～14年度)

	平成11年度	平成12年度	平成13年度	平成14年度
1. Pu富化度調整技術開発	①ピーカースケール試験	試験室準備		
	②高精度溶液計量法開発	モックアップ機製作、設備設計評価	モックアップ試験	液面計制御システム検討
2. 粉末流動性改良技術開発	①高温焙焼・還元試験	既設焙焼試験 (750、850、950℃)	高温焙焼試験 (~1200℃)	
	②粉末流動性評価試験	各種粉末の安息角等測定	コールド試験・ホット試験	
3. 脱硝造粒試験		委託研究	委託研究	
		コールド試験	ホット試験	
4. ペレット直接成型試験	①予備試験 (溶解サンプル製造)			
	②製造試験Ⅰ (溶液でPu富化度調整した粉末の物性評価と課題の抽出)			
	③製造試験Ⅱ (製造試験Ⅰを踏まえより詳細なPu富化度調整粉末特性評価)			
	④製造試験Ⅲ (流動性改良粉末によるペレット製造試験)			
	⑤製造試験Ⅳ (ペレット直接成型を成立させるプロセス及び条件の確立)			
5. ペレット溶解性評価試験				
6. ダイ潤滑型成型機の開発		調査	成型機概念設計	成型機詳細設計
7. 粉末気流搬送システム開発	調査：試験機の設計Ⅰ	試験機製作	性能試験	

* 点線：机上検討
実線：試験

図2-1 開発スケジュール (Pu富化度調整技術開発)



3. 既設工程の調査

本章では、Pu 富化度調整技術開発における開発対象である、Pu 転換技術開発施設の既設設備（受入工程（P11）及び混合工程（P12））及びモックアップ対象機器（エアリフトポンプ）についての概要を示す。

また、Pu 富化度調整技術開発に関して、実機を使用した溶液混合手順、Pu/U 混合精度、計測及び分析誤差などについての調査を実施し、ショートプロセスにおける供給原料粉末に要求される Pu/U 混合精度との比較・検討を実施する。

3.1 工程及び設備の概要

P11 受入工程及び P12 混合工程の工程概要図を図 3.1-1 に示す。

「製品貯蔵施設」のプルトニウム製品の貯蔵系（ユニット 267）のプルトニウム製品貯槽（267V10～16）から硝酸プルトニウム溶液を硝酸プルトニウム受入計量槽（P11V11）に受け入れる。

受け入れた溶液は、硝酸プルトニウム貯槽（P11V12）へ送液され、さらに、混合槽（P12V11）で硝酸ウラニル溶液と混合されたのち、混合液貯槽（P12V12）へ送られる。混合液は、混合液給液槽（P12V13,14）を經由して、一定量ずつ転換系の中間槽（P13V1201,3201）に送られる。

硝酸プルトニウム受入計量槽（P11V11）、硝酸プルトニウム貯槽（P11V12）、混合槽（P12V11）及び混合液貯槽（P12V12）には、それぞれ、液面計、密度計及び温度計を設けている。

硝酸プルトニウム受入計量槽（P11V11）、硝酸プルトニウム貯槽（P11V12）、混合槽（P12V11）及び混合液貯槽（P12V12）は臨界管理の観点から、環状槽となっている。

硝酸プルトニウム貯槽（P11V12）、混合槽（P12V11）及び硝酸ウラニル貯槽（P11V14）の図面を図 3.1-2～図 3.1-4 に示す。

3.2 モックアップ対象機器の概要

本件で模擬対象となる、プルトニウム転換技術開発施設の硝酸プルトニウム貯槽 (P11V12) から混合槽 (P12V11) への硝酸プルトニウム溶液移送を行っているエアリフトポンプの概要を以下に紹介する。

検討対象となる実機のエアリフトの送液系統図を図 3.2-1 に示す。また、エアリフト設計仕様を表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 エアリフト設計仕様
(硝酸プルトニウム貯槽 (P11V12) →混合槽 (P12V11))

項目	記号	仕様
セパレータ入口側揚程	Hs	6.5 m
セパレータ出口側揚程	Hd	5.13 m
真空度による液頭	hsv	2.98 m
公称液面	hl	1.17 m
最小サブマージェンス	hs ₁	2.58 m (40%)
最大サブマージェンス	hs ₂	3.75 m (58%)
設計真空度	h _d	4.5 m H ₂ O
液比重	ρ_s	1.51 g/cm ³
貯槽液比重	ρ_d	1.51 g/cm ³
底面からエアリフト空気入口までの高さ	h _a	0.4 m

3.3 運転情報の調査

Pu 富化度調整精度評価及びモックアップ装置を使用した Pu 富化度調整試験の実施に先立ち、

- ① ショートプロセスにおける Pu 富化度調整精度の目標値
- ② プルトニウム転換技術開発施設の既存設備による溶液混合手順
- ③ プルトニウム転換技術開発施設における溶液混合実績 (Pu/U 比)

に関する情報について調査を実施した。

3.3.1 ショートプロセスにおける Pu 富化度調整精度の目標

ショートプロセスでは、MOX ペレット仕様を満足する Pu 富化度調整を溶液混合工程で実施するため、溶液混合工程において、精度の高い溶液調整方法が必要となる。

ショートプロセスにおける Pu 富化度調整精度の目標は、プルトニウム濃度を任意の Pu 富化度に対して±2.5%^{注)}の誤差範囲内で調整できることである。

本検討では、上記の値を目標に精度評価及びモックアップ試験を実施することとする。

注) : 等価フィッサイル富化公差 $\Delta \varepsilon_{Pu}$ は、Pu 富化度を ε_{Pu} とした場合、

$$\Delta \varepsilon_{Pu} = (0.0025 + 0.0162 \times \varepsilon_{Pu})$$

で表すことができる。この式を用い、等価フィッサイル富化が 22.3 と 30.0wt% の時、公差はそれぞれ、0.60 と 0.72 となる。従って、種々の等価フィッサイル富化燃料を考慮し、公差は 0.5 とした。なお、この公差を任意の PuO_2 富化度に対する相対公差で表すと、±2.5% となる。

(「JNC TN8410 99-011、ショートプロセス技術開発計画 ー基礎試験実施計画書ー(技術報告)、1999年4月」より引用)

3.3.2 溶液の混合手順

プルトニウム転換技術開発施設における現状の運転では、表 3.3.2-1 に示す運転要領書(溶液混合)に従い、溶液の供給および混合運転が実施されている。運転手順の概略は、次の通りである。

① 運転準備

各液槽の液位が測定され、それぞれの槽の残液量が計算される。

② 硝酸ウラニル溶液の供給

まず、調整予定の混合溶液量から算出した必要量の硝酸ウラニル溶液を、硝酸ウラニル溶液ポンプで供給する。

③ 硝酸ウラニル溶液量の確定

混合槽内に装荷した硝酸ウラニル溶液の液位を測定し、供給した硝酸ウラニル溶液量を確定する。

④ 硝酸プルトニウム溶液の供給

硝酸ウラニル送液量の実績値より、硝酸プルトニウム溶液の必要量が決定され、エアリフトポンプによって硝酸プルトニウム溶液が供給される。

⑤ 送液量全体の確定

硝酸プルトニウム溶液を送液後、混合槽内の混合液の液位が測定され、送液量全体が決定される。

⑥ Pu/U 比の確定

送液終了後、混合槽内の混合溶液について、攪拌およびサンプリングが行われ、サンプルの分析により Pu/U 比が確定される。

3.3.3 現状の Pu/U 比の精度

(1) 混合溶液中の Pu/U 比の精度

1988 年度以降のプルトニウム転換技術開発施設における溶液混合後の Pu/U 比データ(約 150 バッチ分)を表 3.3.3-1 および図 3.3.3-1 に示す。なお、表 3.3.1-1 中の網掛けデータは、低い Pu/U 比を狙った溶液混合であるため、検討対象から(図 3.3.3-1 から)除外した。

プルトニウム転換技術開発施設において、溶液混合時の Pu/U 比の目標値は 0.97 である。図 3.3.3-1 より、現状の Pu/U 比の調整精度は、目標値に対して概ね -5.0% (3 点を除く)の範囲内にあり、3.3.1 項のショートプロセスにおける目標値をクリアしておらず、燃料仕様を満足させるためには、何らかの策を講ずることが必要であると考えられる。

(2) 混合溶液と製品粉末の Pu/U 比の関係

溶液混合工程で Pu 富化度調整を行った混合溶液は、脱硝、焙焼還元、粉碎・篩分、中間貯蔵、混合、充填及び貯蔵工程を経て、製品粉末として、プルトニウム燃料加工施設に払い出される。

混合溶液の Pu/U 比及び最終的に製品粉末として払い出される時の Pu/U 比の関係について調査した。表 3.3.3-2 および図 3.3.3-2 は、プルトニウム転換技術開発施設における 1990、1991 年度の混合溶液及びその溶液に対応する MOX 製品粉末の Pu/U 比データである。

図 3.3.3-2 より、混合溶液と製品粉末の Pu/U 比の間には違いがあることが明らかである。これは、脱硝工程以降は粉末を取扱う工程であるため、脱硝工程から粉末貯蔵工程の間で、Pu/U 比がわずかに異なる前ロットの MOX 粉末の一部が滞留しやすく、この残留 MOX 粉末が次のロットの MOX 粉末に混入するためであると考えられる。

この結果より、既存のプルトニウム転換技術開発施設の設備を使用して MOX 転換を実施する場合には、Pu 富化度調整に関して、溶液工程での Pu 富化度調整に加えて、各工程での滞留粉混入の影響が無視できなくなる。当然、溶液混合段階で精度良く Pu 富化度調整が可能となれば、各ロット間での Pu 富化度のばらつきは小さくなり、滞留粉の影響は現状より小さくなる

ことが予想されるものの評価・検討が必要となる。

しかしながら、本ショートプロセスでは工程の簡素化を目的としており、焙焼・還元工程後の粉碎・篩分、中間貯蔵、混合、充填及び貯蔵工程が省略されている。すなわち、焙焼・還元工程を経た MOX 粉末は、直接ペレット成型機に充填される。したがって、本ショートプロセスでは、既存のプロセスと比較して、溶液混合工程以降の工程が著しく簡素化されることから、上記の残留粉末の混入による影響はきわめて小さくなるものと考えられる。

実際には、ショートプロセスにおいても、溶液混合工程からペレット成型工程の間での、工程滞留粉末の影響はゼロではない為、検討が必要であると考えられるが、本検討では、上記の理由により工程滞留粉末の影響は無視することとする。

3.4 計測および分析情報の調査

本件で対象とする Pu 富化度調整精度を評価・検討するためには、溶液混合の調整技術に加えて、大きく、

- ① 槽内の溶液量の測定方法
- ② 溶液中の Pu 及び U 濃度の分析方法

に関する情報が必要となる。

そこで、ここでは、上記の 2 項目に関して調査を実施した。

3.4.1 計測情報

(1) 液量の測定方法 (1)

プルトニウム転換技術開発施設では、各溶液の液量測定にエレクトロノメーターを使用している。エレクトロノメーターの測定原理を以下に示す。

図 3.4.1-1 に示すように、槽には溶液中にその先端が位置するような 2 本のディップチューブと先端が槽上部に開放された 1 本のディップチューブが設置されている。ディップチューブにはエアが供給され、その先端からは数秒に 1 回程度の気泡が生じている。それぞれのディップチューブの途中からは導圧管が分岐しており、液圧の差を測定するようになっている。測定は以下の手順でおこなわれる。

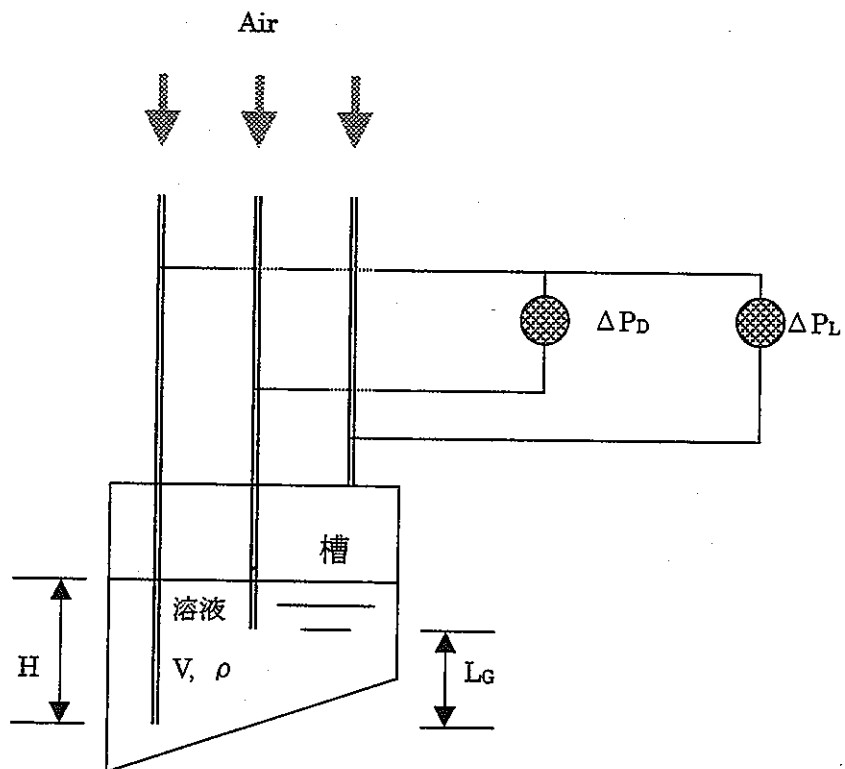
- ① ΔP_L と ΔP_D の 2 つの差圧を測定する。
- ② 別途決定されている L_G (ギャップ長) と ΔP_D から、式 3.4.1-2 によって ρ を求める。
- ③ 求めた ρ と ΔP_L から式 3.4.1-1 によって H を求める。
- ④ 別途決定されている F (校正式) を用いて、 H から V を求める。

なお、液位は槽の最深部からではなく、ディップチューブ先端から液面までの高さとする。

$$\Delta P_L = \rho g H \quad \dots\dots\dots (式 3.4.1-1)$$

$$\Delta P_D = \rho g L_G \quad \dots\dots\dots (式 3.4.1-2)$$

$$V = F (H) \quad \dots\dots\dots (式 3.4.1-3)$$



- = : デイップチューブ
- : 差圧センサー
- ΔP_L : 液位を示す差圧
- ΔP_D : 液位を示す差圧
- L_G : ギャップ長
- H : 液位
- ρ : 密度
- V : 液量
- g : 重力加速度
- F : 校正式

図 3.4.1-1 液量測定の実理図(1)

(2) 計測誤差

プルトニウム転換技術開発施設の液量測定（密度 1.5g/cm^3 の硝酸プルトニウム溶液 300L）における系統誤差の最大は、差圧測定 of 誤差を 200～300mmAq において最大 $\pm 1\text{ Pa}$ 、1000mmAq 以上で最大 $\pm 2\text{ Pa}$ と仮定した場合、校正式、ギャップ長さおよび各測定値について図 3.4.1-2 に示す配分となる。この時最終的に求まる液量における系統誤差の最大は 0.19% となる。

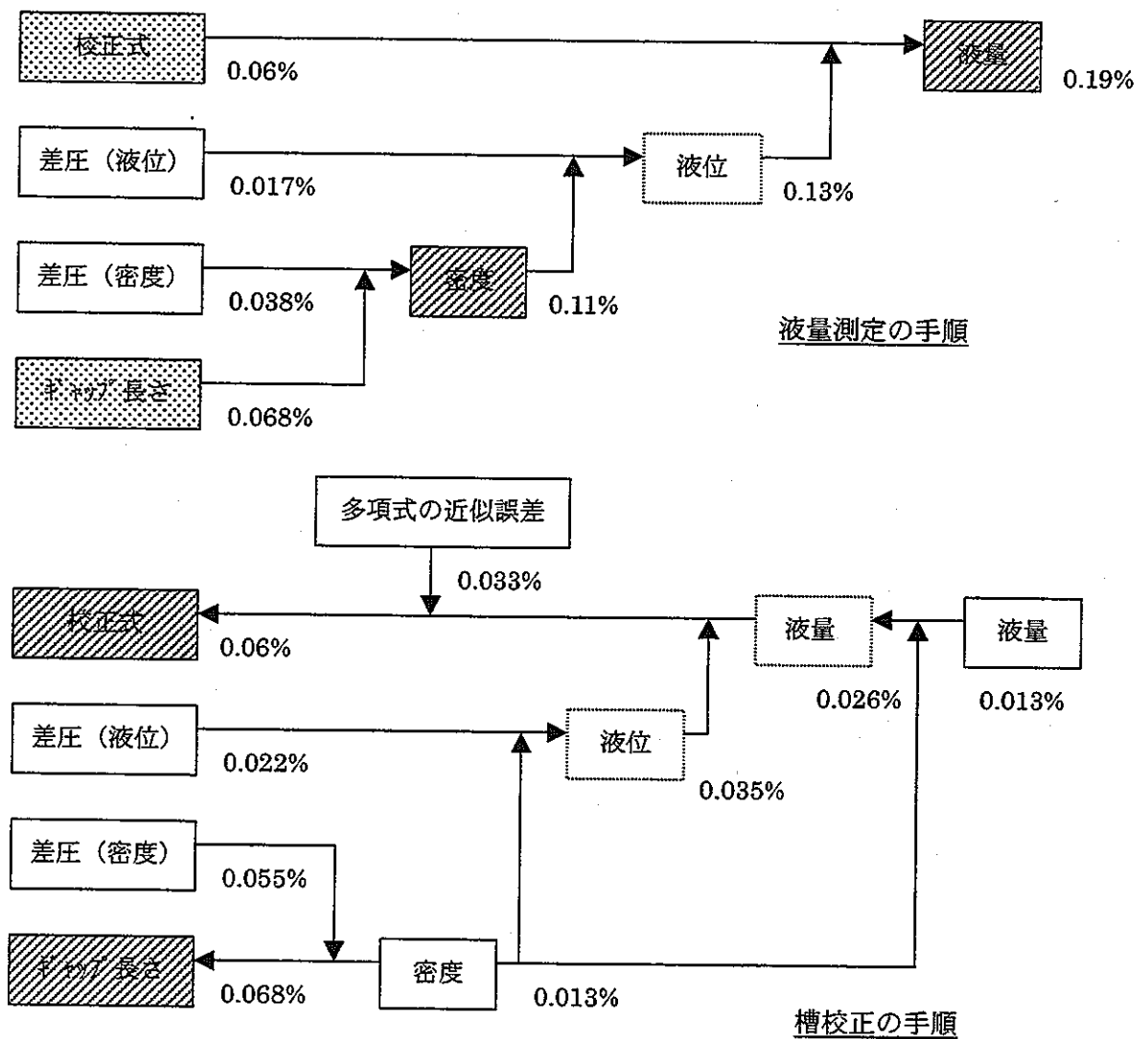


図 3.4.1-2 液量測定と槽校正における誤差伝播(1)

3.4.2 分析情報

(1) 溶液中の Pu, U 濃度分析方法

プルトニウム転換技術開発施設において、硝酸プルトニウム・硝酸ウランニウム混合溶液中の Pu および U 濃度の測定は、同位体希釈質量分析法 (IDMS 法) により行っている。

IDMS 法とは、試料と同位体組成の大きく異なる同位体組成を有し、元素重量が既知であるトレーサー(スパイクと呼ばれる)物質を試料に添加し、被スパイク試料(未知試料)とスパイク添加試料との同位体組成の変化から未知試料中の元素濃度を求めるものである。

分析手順は、大きく

- ①スパイク試料との混合
- ②イオン交換による、U と Pu の分離
- ③質量分析装置による同位体組成比の測定

に分けられる。

手順の概略フローを図 3.4.2-1 に示す。

(2) 分析誤差

Pu 転換技術開発施設では、核物質計量管理を目的として、標準試料及びサンプル試料の測定データをもとに、IDMS による U 及び Pu 濃度の分析誤差の検討が実施されている。^{*} ただし、検討内容については、その内容の性質上から非公開資料となっており、ここでの詳細の紹介は省略するが、ここでは、ランダム誤差及び系統誤差を二乗平均した誤差が、0.2%以下であることを示す。

また、1994 年に IAEA より、核物質の計量における不確定成分に対する国際的目標値が示されている。⁽¹¹⁾ 1993 年の分析誤差の目標値を表 3.4.2-1 に示す。

表 3.4.2-1 に示す様に、U 及び Pu 濃度のランダム誤差の目標値はそれぞれ 0.2% と示されている。

^{*}) 非公開資料

6章でのPu調整精度の検討では、U及びPu濃度の分析誤差が必要になるが、上記の2点を考慮し、それぞれについて0.2%として検討を進めることとする。

表 3.4.2-1 保障措置のための分析誤差の国際的目標値 (1993年)

Material Type: LEU Nitrate, Pu Nitrate, and LEU/Pu Nitrate Solutions

Measurement Method				Bulk		Sampling		U Conc.		235U Abundance		U Total		235U Total		Pu Conc.		Pu Total		NOTES	
Bulk	U	235U	Pu	RAN	BIF	RAN	BIF	RAN	BIF	RAN	BIF	RAN	BIF	RAN	BIF	RAN	BIF	RAN	BIF		
DIFT	TITR	TIMS		0.30	0.30	0.10		0.10	0.10	0.20	0.20	0.35	0.30	0.40	0.30					1/	
EBAL	TITR	TIMS		0.05	0.05	0.10		0.10	0.10	0.20	0.20	0.35	0.30	0.25	0.25						1/
DIFT	KEDG			0.30	0.30	0.10		0.20	0.20			0.35	0.30								1/ 2/
DIFT		TITR		0.30	0.30	0.20										0.15	0.15	0.40	0.25		2/ 4/
DIFT		IDMS		0.30	0.30	0.20										0.20	0.20	0.40	0.30		2/
DIFT		KEDG		0.30	0.30	0.20										0.20	0.20	0.40	0.30		2/ 3/ 4/
DIFT		KEDG		0.30	0.30	0.20										0.60	0.30	0.70	0.35		2/ 4/ 6/
DIFT	TITR	TIMS	TITR	0.30	0.30	0.20		0.10	0.10	0.20	0.20	0.35	0.30	0.40	0.30	0.40	0.40	0.40	0.30		3/ 4/
DIFT	IDMS	TIMS	IDMS	0.30	0.30	0.20		0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.30	0.45	0.30	0.20	0.20	0.40	0.30		3/
DIFT	XRF	TIMS	XRF	0.30	0.30	0.20		0.50	0.50	0.20	0.20	0.60	0.55	0.65	0.55	0.30	0.50	0.60	0.55		3/
DIFT	HKED	TIMS	HKED	0.30	0.30	0.20		0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.30	0.45	0.35	0.60	0.30	0.70	0.35		3/ 3/ 4/

- Notes:
- 1/ Uranyl nitrate solutions
 - 2/ Pu nitrate solutions
 - 3/ Mixed U/Pu solutions with U/Pu ratio between 1 and 100
 - 4/ Coulometry expected to give equivalent performance as potentiometric titration
 - 5/ KEDG with x-ray tube and optical cells
 - 6/ KEDG with radioisotope transmission sources
 - 7/ for LWR-type solutions
 - 8/ Measurement time 600-1200 sec.

1993 International Target Values for Uncertainty Components in Measurements of Amount of Nuclear Material for Safeguards Purposes (% relative standard deviation)

NOTE: RAN: Relative standard deviation of the repeatability of the measurement of a single laboratory within one inspection

BIF: Relative standard deviation of the between inspection uncertainty component for a single laboratory

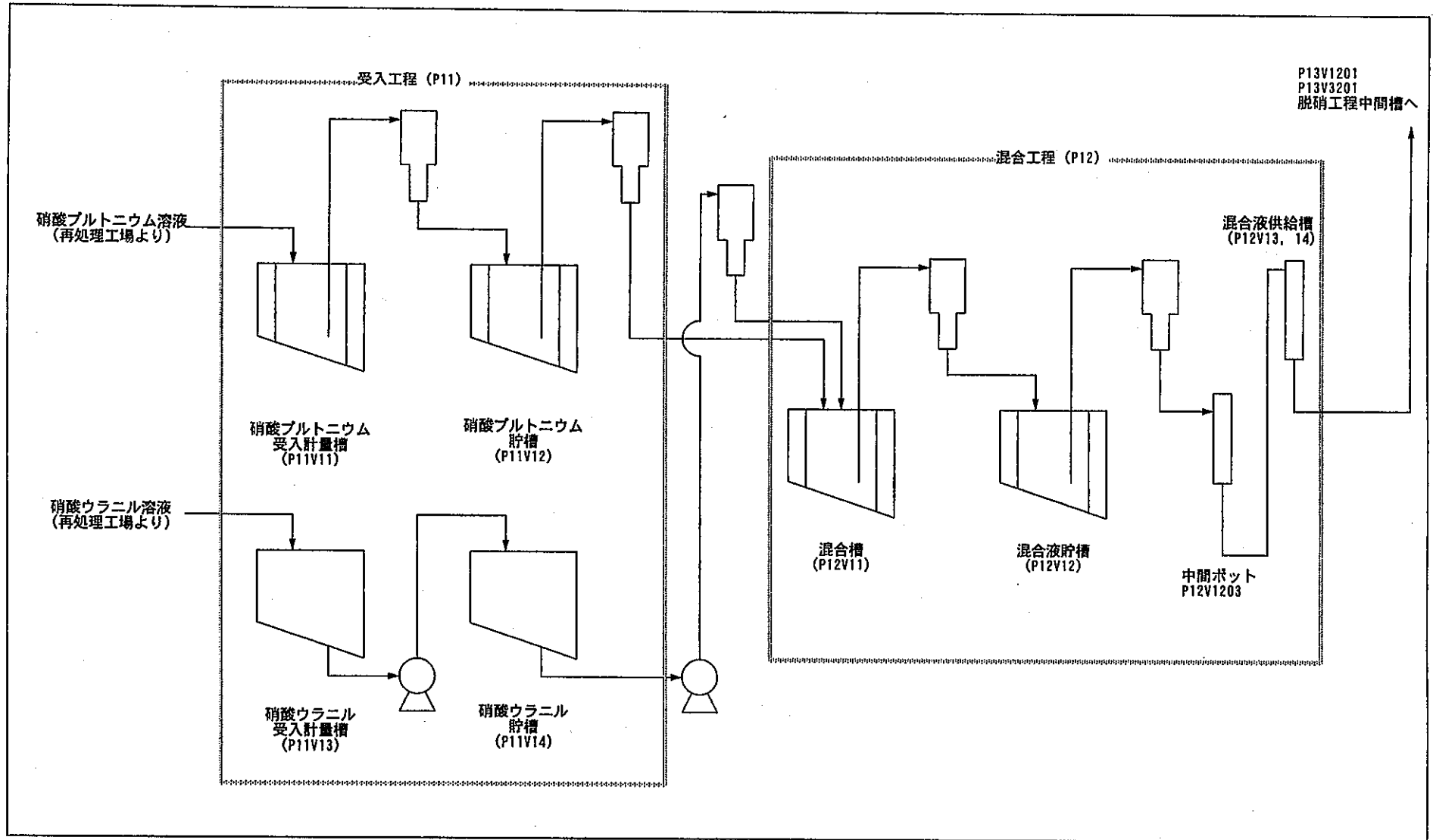


図3.1-1 工程概要図 (P11受入工程・P12混合工程)

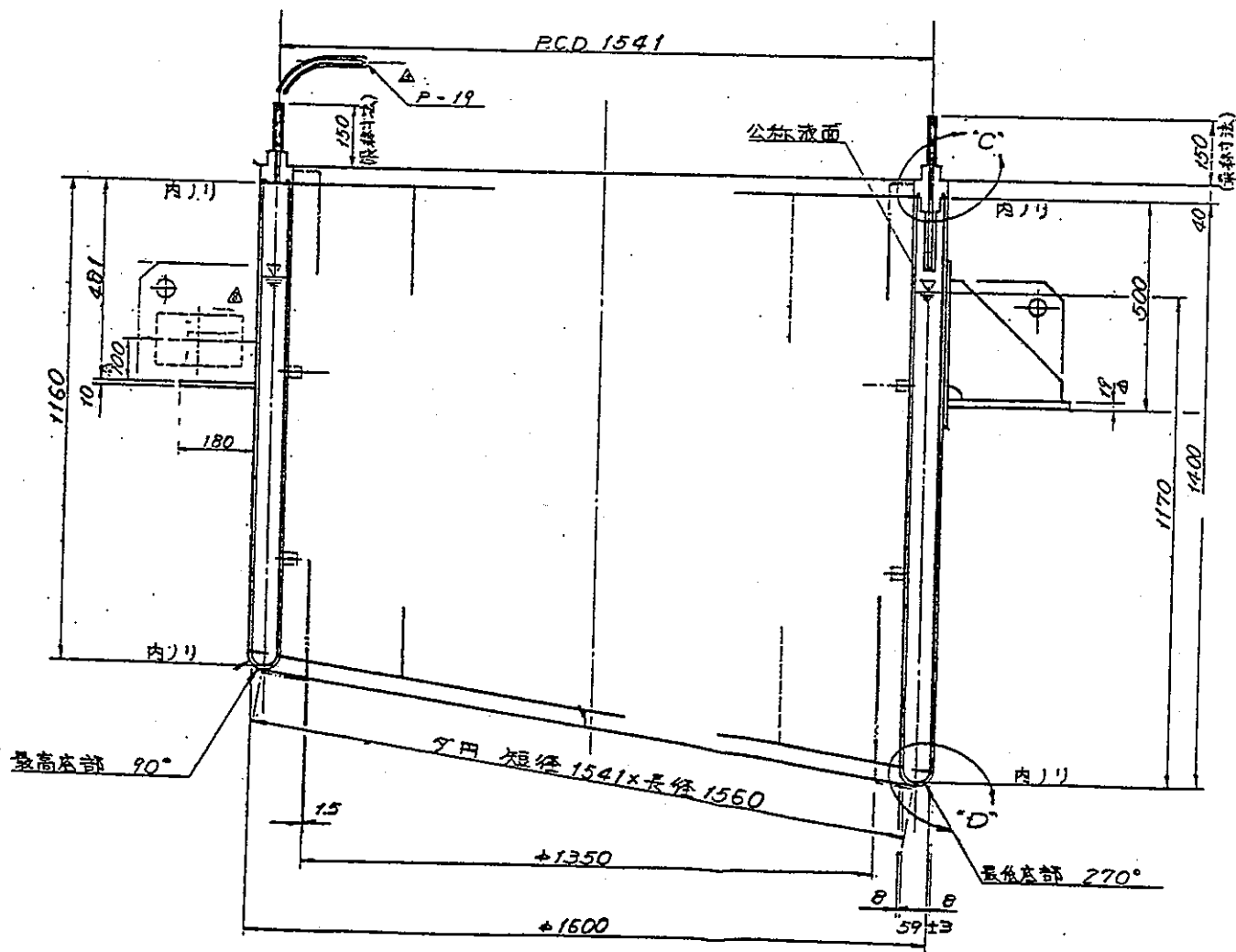


図3.1-2 硝酸プルトニウム貯槽 (P11V12) の図面

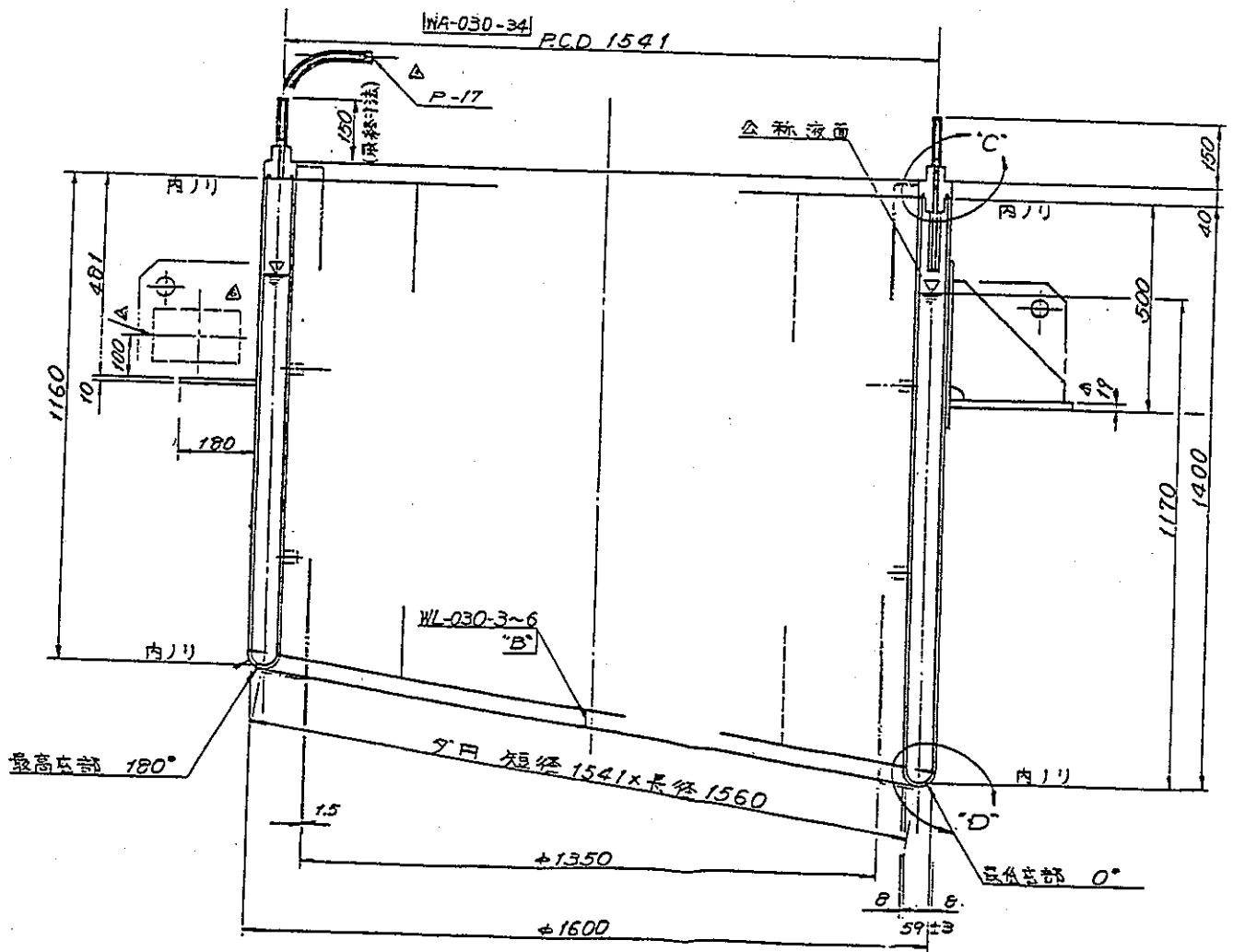


図3.1-3 混合槽 (P12V11) の図面

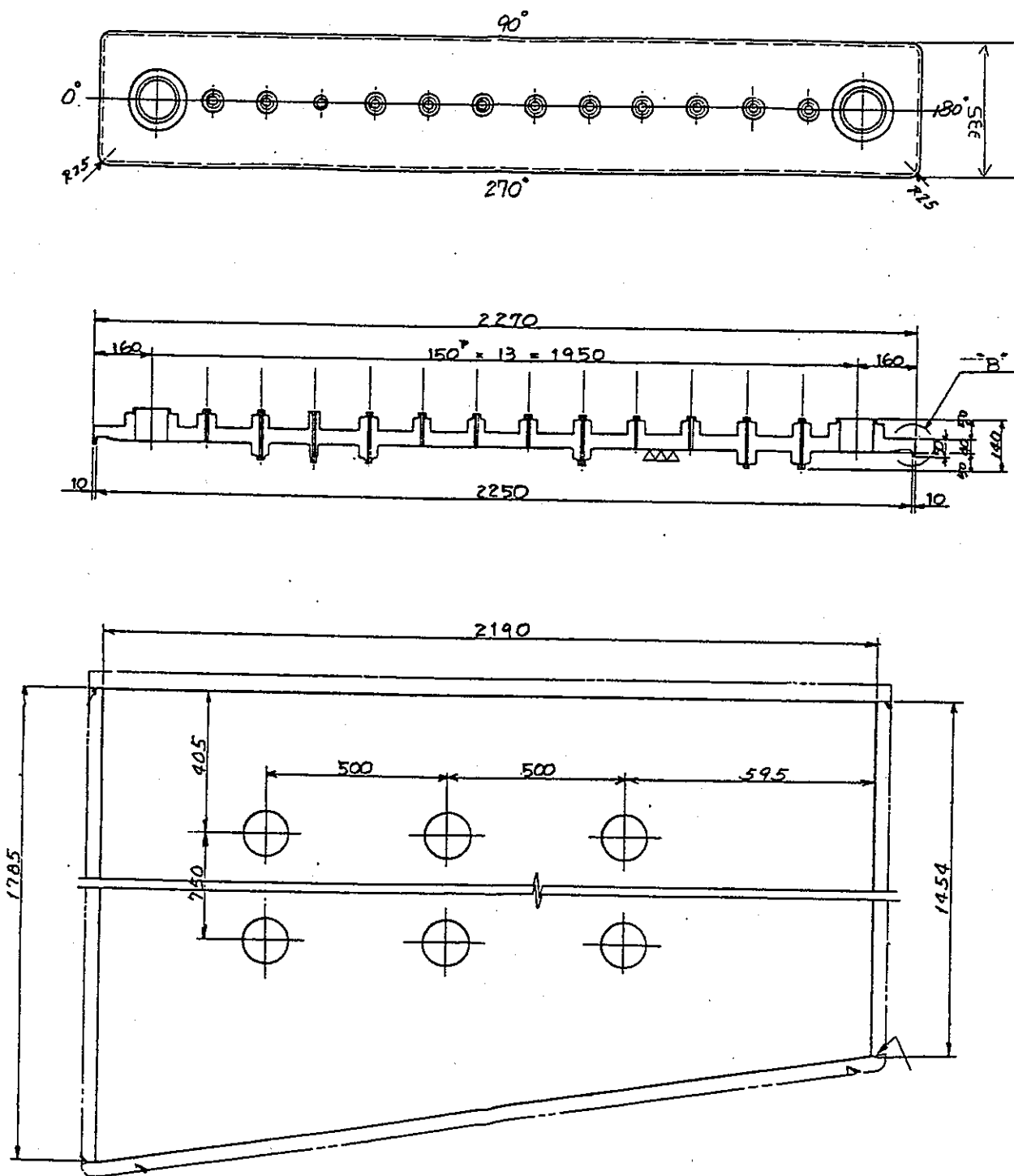


図3.1-4 硝酸ウラニル貯槽 (P11V14) の図面

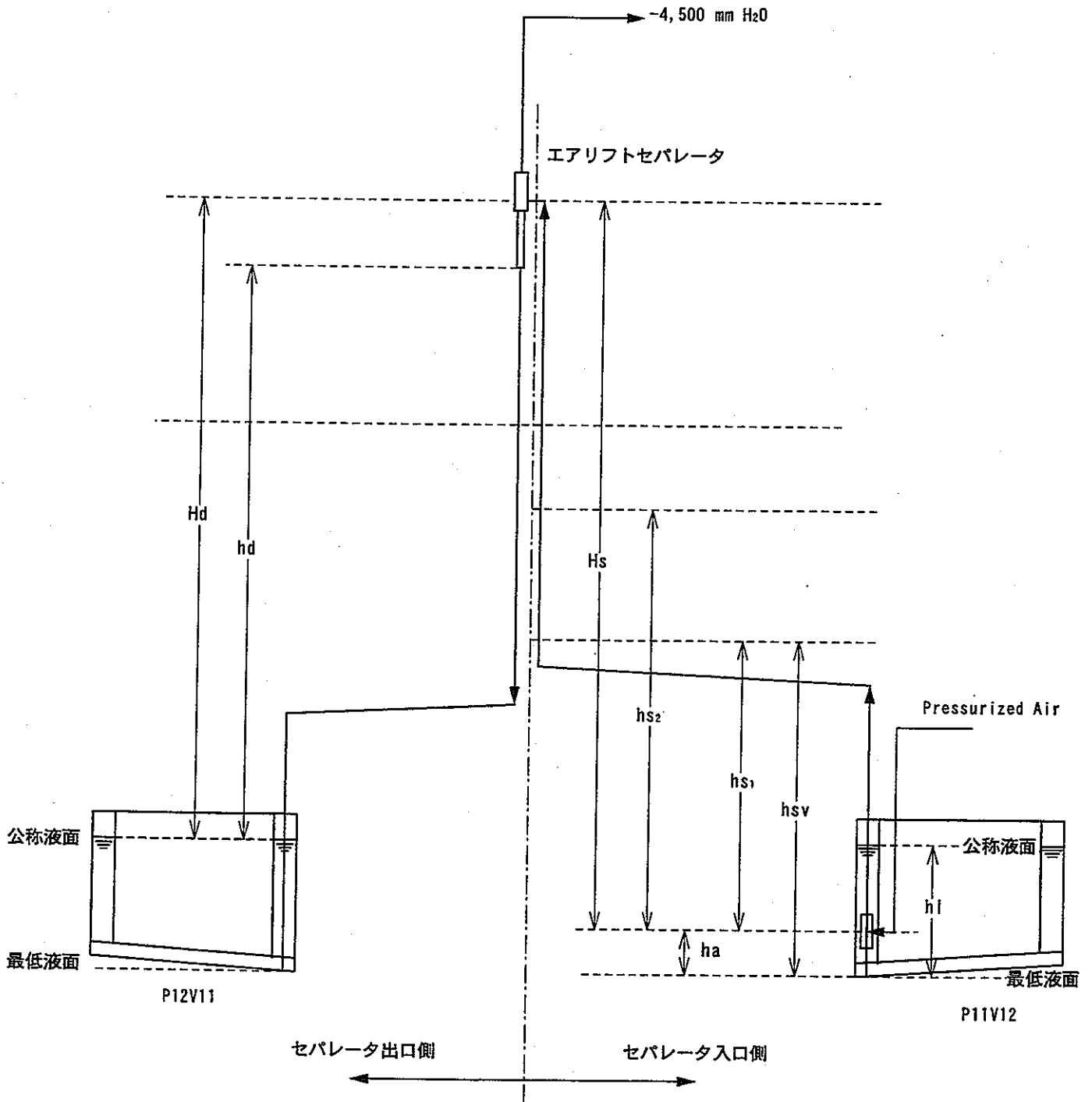


図3.2-1 エアリフトの送液系統図
(P11V12→P12V11)

表 3.3.2-1 溶液混合手順 (Pu 転換技術開発施設運転要領書) (1/3)

3. 6 溶液混合 (P11V12・P01V42・P42→P12V11)

項 目	作 業 要 領	備 考
1. 運転準備	1) P12V11内の残液の確認 ・残液量及びPu・U濃度を確認する。 2) P11V12 (Pu)・P01V42 (U) の溶液確認 ・各ベッセルの液量及び濃度を確認する。 3) 送液量の決定 ・P11V12及びP11V14の濃度とP12V11の残液量により、 $Pu/U=1$ となるように各々の送液量を決定する。 4) 真空ポンプ (P87K11) が運転されていること。 5) <u>P11B02の漏洩液の抜出し口が、異物等により閉塞した状態になっていないことを目視により確認する。</u>	LI(P12V11) LI(P11V12) PO1LRA*0 ±42-1 P87PIA* 11-2= 4200mmH ₂ O 拡大防止
2. ウラン送液開始	1) 核物質移動チェック 2) ポンプ (P4103) 起動。(O127-1) ①モード切替スイッチを「V42→P41」にセットする。 ②ポンプ切替スイッチを「P4103」にセットする。 ③W110キーロックを解除し、I126-1盤にて解除ランプ点灯確認 ④「バルブ操作ボタン開」釦を押す。 ⑤手動弁W619を開ける。 ⑥ " W638 " ⑦ " W402 " ⑧ " W627 " ⑨ " W530 " ⑩ " P41W514を開ける。 ⑪ " " W401 " ⑫ " " W403 " ⑬ " " W516 " ⑭「P4103起動」釦を押す。 ・P41V12のレベル計(LIA+ 12-1)を確認し、レベルが約60%になるまで監視する。 ⑮「P4103停止」釦を押す。 ・P41V12のレベル計(LIA+ 12-1)を確認し、レベルが約60%まで上昇していることを確認する。 ⑯「P41P1201起動」釦を押す。 ・P41V12のレベル計を監視し、レベルが0になったら、「P41P1201停止」釦を押す。	マニュアル参照 A224ランプ点灯 電磁弁W105, W110 が開くことを確認する。 LIA + 12-1=60%

表 3.3.2-1 溶液混合手順 (Pu 転換技術開発施設運転要領書) (2/3)

項 目	作 業 要 領	備 考
3. ウラン送液 停止	<p>⑦「P41P1201停止」鈕を押す。</p> <p>3) 送液中は、各ベッセルのレベル計を監視し、P12V11 液位が規定量になるまで送液を行う。</p> <p>1) 手動弁閉</p> <p>①「バルブ操作ボタン閉」鈕を押す。</p> <p>②手動弁P41W516を閉じる。</p> <p>③ W403</p> <p>④ W401</p> <p>⑤ W514</p> <p>⑥ P01W530</p> <p>⑦ W627</p> <p>⑧ W402</p> <p>⑨ W638</p> <p>⑩ W619</p> <p>⑪ W110キーロックバルブの施錠を行い、I126-1 にて解除ランプが消灯することを確認する。</p> <p>2) 各ベッセルの液位の安定後、P01V42、P12V11 の液量を確認する。</p>	<p>LI(P11V12) P01LRA*0 ±42-1</p> <p>W104, W110 が閉じ ることを確認する。</p> <p>A224ランプ消灯</p> <p>LI(P11V12) P01LRA*0 ±42-1</p>
4. プル送液開 始	<p>1) プル送液量の推定 ウラン送液の実績値により、プルの送液量を最終確定する。</p> <p>2) 核物質移動チェック</p> <p>3) プル送液オーダー値設定 LO11-2によりプル送液量を設定する。</p> <p>4) エアーリフト(A1201)運転 ・他のエアーリフトが運転していないことを確認する。</p> <p>①W127を開ける。</p> <p>②W589を開ける。</p> <p>③W591を開ける。</p> <p>④W309にてエアー流量を調整する。</p>	<p>マニュアル参照 配管残液分を考慮 に入れ、低目に設 定する。</p> <p>P112-2の真空度が 3500~4000mmH₂O であること。 P112-3の流量が 700Nℓ/hになるよ う調整する。</p>

表 3.3.2-1 溶液混合手順 (Pu 転換技術開発施設運転要領書) (3/3)

項 目	作 業 要 領	備 考
5. プル送液停止	1) 運転中は, LI (P12V11) を監視し, LO の設定値にて, エアーリフト (P1201) が停止することを確認する。 2) エアーリフト (P1201) が停止したら, 以下の弁操作を行う。 ① W591 を閉める。 ② W589 を閉める。 ③ LI (P12V11) が安定後, P12V11 側のプル受け入れ量を確定する。 3) 送液量の確定 P11V12, P11V14, P12V11 のレベル計により, 送液量及び受け取り量を確定する。	W127 は自動的に閉じる。 マニュアル参照
6. 溶液搅拌 サンプリング	運転要領書「P12V11 槽内搅拌及びサンプリング」を参照のこと。	

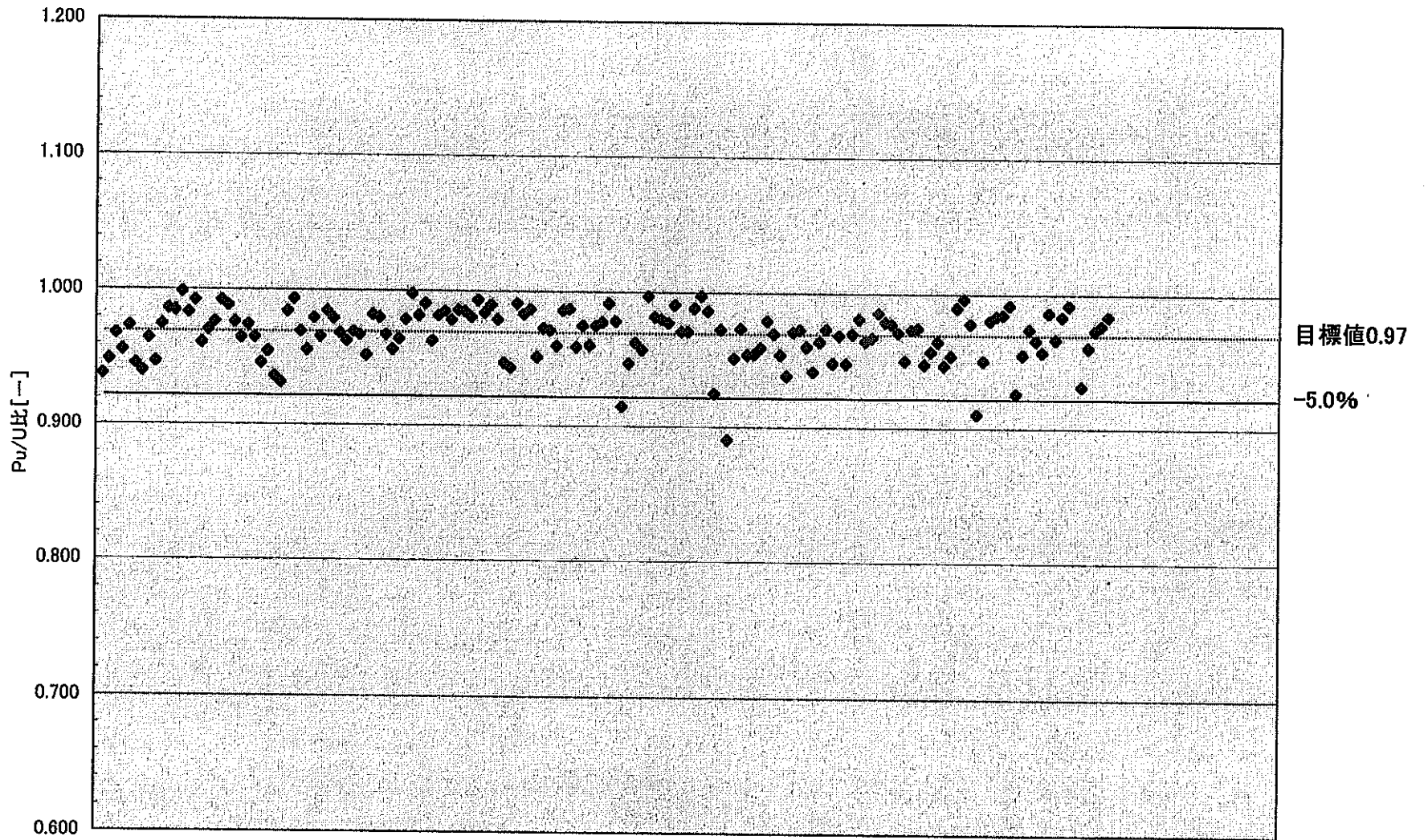


図3.3.3-1 溶液混合後のPu/U比(転換施設における運転データ)

表3.3.3-1 Pu/U比(転換施設における運転データ)

Date	Pu [g/L]	U [g/L]	Pu/U
1988/9/20	122.40	130.50	0.938
1988/10/4	123.50	130.20	0.949
1988/10/21	127.60	131.90	0.967
1989/1/10	135.20	141.50	0.955
1989/1/13	126.30	129.80	0.973
1989/2/1	124.80	132.00	0.945
1989/2/14	126.00	134.00	0.940
1989/5/16	123.80	128.40	0.964
1989/5/18	121.70	128.50	0.947
1989/5/31	126.50	129.80	0.975
1989/6/13	127.10	128.90	0.986
1989/6/29	128.60	130.60	0.985
1989/8/9	126.80	127.00	0.998
1989/8/28	128.30	130.50	0.983
1989/9/12	128.00	129.00	0.992
1989/9/18	123.00	128.00	0.961
1989/10/3	125.50	129.30	0.971
1989/10/18	124.00	127.00	0.976
1989/10/26	127.70	128.70	0.992
1990/1/16	130.20	131.70	0.989
1990/1/19	122.70	125.70	0.976
1990/1/31	125.80	130.40	0.965
1990/2/13	124.06	127.34	0.974
1990/2/22	125.66	130.22	0.965
1990/3/6	124.27	131.33	0.946
1990/3/16	124.85	130.76	0.955
1990/4/3	124.86	133.34	0.936
1990/4/13	125.22	134.36	0.932
1990/4/23	126.97	129.00	0.984
1990/5/10	129.76	130.60	0.994
1990/5/22	129.53	133.63	0.969
1990/8/20	114.40	119.70	0.956
1990/9/3	127.50	130.20	0.979
1990/9/11	126.20	130.70	0.966
1990/9/19	128.70	130.70	0.985
1990/9/28	128.10	130.80	0.979
1990/10/9	127.70	131.90	0.968
1990/10/22	126.27	131.17	0.963
1990/10/30	126.70	130.70	0.969
1990/11/8	126.20	130.50	0.967
1990/11/19	125.30	131.60	0.952
1990/12/10	126.60	128.90	0.982
1991/1/10	128.20	130.80	0.980
1991/1/25	127.40	131.70	0.967
1991/1/31	125.50	131.20	0.957
1991/2/7	126.50	131.20	0.964
1991/2/21	127.40	130.20	0.978
1991/3/7	129.00	129.30	0.998
1991/3/14	127.60	130.00	0.982
1991/3/29	127.30	128.50	0.991
1991/4/16	127.00	131.90	0.963
1991/5/9	128.80	131.20	0.982

表3.3.3-1 Pu/U比(転換施設における運転データ)

Date	Pu [g/L]	U [g/L]	Pu/U
1991/5/21	128.20	130.17	0.985
1991/6/10	128.10	130.90	0.979
1991/6/17	128.51	130.36	0.986
1991/10/28	122.70	124.60	0.985
1991/11/14	127.30	129.80	0.981
1991/11/21	128.10	129.00	0.993
1991/11/27	127.08	129.17	0.984
1991/12/6	128.29	129.66	0.989
1991/12/16	127.11	129.84	0.979
1992/1/29	125.20	132.20	0.947
1992/2/10	125.40	132.90	0.944
1992/2/21	128.10	129.30	0.991
1992/3/5	128.70	130.90	0.983
1992/3/16	128.12	129.87	0.987
1992/3/26	126.00	132.40	0.952
1992/4/23	127.50	131.10	0.973
1992/5/14	127.90	131.70	0.971
1992/5/22	126.60	131.90	0.960
1992/6/2	127.40	129.20	0.986
1992/6/10	128.20	129.90	0.987
1992/7/14	129.00	134.50	0.959
1992/8/24	120.00	123.10	0.975
1992/9/7	122.80	127.90	0.960
1992/9/17	127.50	130.80	0.975
1992/9/25	125.80	128.70	0.977
1992/10/7	126.90	128.00	0.991
1992/10/15	125.60	128.40	0.978
1992/10/23	120.60	131.80	0.915
1992/11/5	124.20	131.10	0.947
1992/11/13	125.00	129.90	0.962
1992/11/24	125.90	131.50	0.957
1992/12/3	128.60	129.00	0.997
1993/1/11	128.02	130.42	0.982
1993/1/20	126.40	129.00	0.980
1993/1/29	127.07	130.04	0.977
1993/2/10	128.20	129.41	0.991
1993/2/22	126.20	130.00	0.971
1993/3/4	126.20	130.00	0.971
1993/3/19	22.18	187.99	0.118
1993/3/25	125.20	126.70	0.988
1993/4/8	126.90	127.25	0.997
1993/4/16	125.24	126.99	0.986
1993/5/13	118.20	127.70	0.926
1993/6/1	116.80	120.10	0.973
1993/6/10	117.80	132.30	0.890
1993/6/16	99.23	104.30	0.951
1993/6/24	99.75	102.50	0.973
1993/7/27	102.20	107.10	0.954
1994/10/7	118.74	124.38	0.955
1994/10/13	123.84	129.10	0.959
1994/10/25	127.37	130.08	0.979
1994/11/7	127.97	131.98	0.970

表3.3.3-1 Pu/U比(転換施設における運転データ)

Date	Pu [g/L]	U [g/L]	Pu/U
1994/11/16	124.84	130.83	0.954
1994/11/28	123.86	131.93	0.939
1994/12/2	126.01	129.76	0.971
1995/1/11	127.50	131.08	0.973
1995/1/23	125.05	130.24	0.960
1995/2/2	126.04	133.81	0.942
1995/2/15	127.27	132.03	0.964
1995/2/23	126.74	130.24	0.973
1995/3/2	125.43	132.26	0.948
1995/3/13	127.85	131.97	0.969
1995/3/22	126.52	133.44	0.948
1995/3/31	126.42	130.33	0.970
1995/4/10	128.63	131.12	0.981
1995/4/21	127.60	132.28	0.965
1995/5/15	127.83	132.16	0.967
1995/5/24	122.85	124.65	0.986
1995/6/1	126.85	129.58	0.979
1995/6/14	126.32	129.24	0.977
1995/9/19	124.28	127.99	0.971
1995/10/4	117.77	123.88	0.951
1995/10/16	126.73	130.22	0.973
1995/10/30	127.56	130.89	0.975
1995/11/13	112.23	118.39	0.948
1995/12/6	111.79	116.77	0.957
1996/1/17	125.69	130.30	0.965
1996/1/24	124.44	131.41	0.947
1996/2/19	121.74	127.57	0.954
1996/2/26	127.23	128.54	0.990
1996/3/5	126.00	126.45	0.996
1996/3/18	128.42	131.31	0.978
1996/3/26	121.47	133.40	0.911
1996/4/4	120.03	126.25	0.951
1996/4/16	126.56	129.09	0.980
1996/4/24	127.52	129.63	0.984
1996/5/8	127.02	129.00	0.985
1996/5/16	127.07	128.12	0.992
1996/5/23	122.94	132.72	0.926
1996/6/5	125.04	130.91	0.955
1996/6/13	126.54	129.92	0.974
1996/6/24	127.34	131.86	0.966
1996/9/25	120.70	126.11	0.957
1996/10/9	127.14	128.92	0.986
1996/10/29	126.86	131.25	0.967
1996/11/15	119.14	121.16	0.983
1996/11/26	126.40	127.45	0.992
1996/12/13	120.94	129.77	0.932
1997/2/12	120.78	125.74	0.961
1997/2/19	124.97	128.44	0.973
1997/2/27	126.56	129.56	0.977
1997/3/6	127.99	130.12	0.984

表3.3.3-2 混合溶液と製品粉末のPu/U比の関係
 (プルトニウム転換技術開発施設における1990,1991年度運転データ)

Lot(混合液)	Pu/U比[-]	Lot(製品粉末)	Pu/U比[-]
X078	0.946	M147	0.959
X081	0.932	M154	0.957
X085	0.956	M162	0.949
		M163	0.943
X086	0.979	M165	0.968
X087	0.966	M167	0.958
X088	0.985	M169	0.986
X090	0.968	M173	0.976
X095	0.982	M182	0.957
		M183	0.964
		M184	0.971
		M185	0.973
X096	0.98	M187	0.977
		M188	0.973
X097	0.967	M190	0.968
X098	0.957	M192	0.965
		M193	0.963
X099	0.964	M194	0.966
		M195	0.966
		M196	0.963
X100	0.978	M198	0.976
		M199	0.978
X106	0.985	M214	0.978
		M215	0.977
X107	0.979	M217	0.974
		M218	0.977
X108	0.986	M220	0.992
		M221	0.996
X109	0.985	M222	0.997
X110	0.981	M228	0.982
X112	0.984	M231	0.99
		M232	0.992
		M233	0.992
X113	0.989	M234	0.997
		M235	0.994
		M236	0.993
X114	0.979	M239	0.977
		M240	0.967
X115	0.947	M241	0.956
		M242	0.951
		M243	0.926
X116	0.944	M245	0.946
		M246	0.945
X117	0.991	M248	0.98
		M249	0.986
X118	0.983	M251	0.991
		M252	0.991

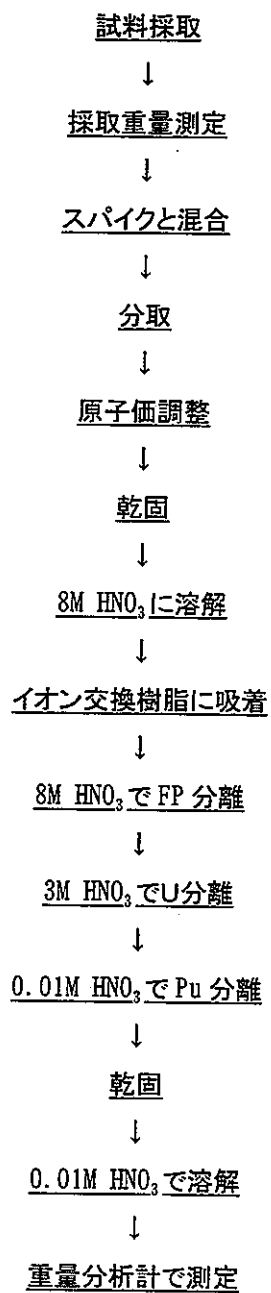


図 3.4.2-1 硝酸ウラニル及び硝酸プルトニウム混合溶液中の
U 及び Pu 濃度分析手順

4. エアリフトポンプの理論

本試験で使用するエアリフトポンプの一般的な理論を以下に示す。

- H_s : 揚水管の浸漬深さ
- H : 揚程
- V : 管内のある断面積を上昇する気泡水の速度
- v : 気泡の水に対する浮上速度
- ρ : 溶液の比重
- ρ_m : 気液混合層の平均密度
- Q : 揚水量
- Q_m : 平均空気流量

とおくと、

気液混合層の平均密度は次の式で表される。

$$\rho_m = \rho Q / \left(Q + Q_m \times \frac{V}{V+v} \right) \dots\dots\dots (式 4-1)$$

ここで、 v が V と比較して無視できるほど小さい場合には、式 4-1 は

$$\rho_m = \rho Q / (Q + Q_m) \dots\dots\dots (式 4-2)$$

と書ける。

ここで、

h_1 : 揚水の際の損失水頭^{注)}

とおき、気液混合層を非圧縮性の均一流体と考えると、

$$\rho H = \rho_m (H_s + H + h_1) \dots\dots\dots (式 4-3)$$

が成立する。

従って、揚程 H は、

$$H = H_s \left(\frac{\rho}{\rho_m} - 1 \right) - h_1 = H_s \frac{Q_m}{Q} - h_1 \quad \dots\dots\dots (式 4-4)$$

p_s : 揚水管下端内への空気吸い込み圧力

Q_s : 揚水管下端内への空気吸い込み流量

p_a : 揚水管上部出口の空気圧力

Q_a : 揚水管上部出口の空気流量

とし、気泡が揚水管中で等温変化するとすると、

$$p_s \times Q_s = p_a \times Q_a = \text{constant} \quad \dots\dots\dots (式 4-5)$$

であるため、揚水管中の平均空気流量 Q_m は、

$$\begin{aligned} Q_m &= \frac{1}{p_s - p_a} \times \int_{p_a}^{p_s} p_a Q_a \frac{1}{x} dx \\ &= \frac{p_a Q_a}{p_s - p_a} \times \ln \frac{p_s}{p_a} \quad \dots\dots\dots (式 4-6) \end{aligned}$$

と書ける。

したがって、揚水量 Q に対する空気量 Q_a の比は、

$$\frac{Q_a}{Q} = \frac{H + h_1}{H_s} \cdot \frac{p_s - p_a}{p_a} \cdot \frac{1}{\ln (p_s / p_a)} \quad \dots\dots (式 4-7)$$

$$p_s = p_a + \rho g H_s \quad \dots\dots\dots (式 4-8)$$

であるから、

$$\frac{Q_a}{Q} = \frac{\rho g (H + h_1)}{p_a} \cdot \frac{1}{\ln (p_s / p_a)} \quad \dots\dots\dots (式 4-9)$$

$$p_a / \rho g = 10 \text{ m H}_2\text{O} \quad \dots\dots\dots \quad (\text{式 4-10})$$

とすると

$$\frac{Q_a}{Q} = \frac{(H + h_f)}{10 \times \ln \{(10 + H_s) / 10\}} \quad \dots\dots\dots \quad (\text{式 4-11})$$

気泡ポンプの効率 (η_p) は、

$$\eta_p = \frac{\rho QH}{p_a Q_a \ln (p_s / p_a)} \quad \dots\dots\dots \quad (\text{式 4-12})$$

と書ける。

η_p の値は通常 25～65%の範囲である。

注) 損失水頭：流体が管内を流れたときの流体摩擦によって圧力損失を水注で表したもので、直管の長さ L と速度水頭 ($v^2 / 2g$) に比例し、内径 d に反比例することが実験的に確かめられている。ここで、 λ は管摩擦係数である。

$$h_f = \lambda \times (L / d) \times (v^2 / 2g)$$

5. 送液試験

5.1 目的

硝酸プルトニウム溶液及び硝酸ウラニル溶液の混合段階で、Pu 富化度の調整を高精度に行うためには、槽内の溶液量の正確な測定、溶液濃度の分析精度の向上に加えて、特に、エアリフト方式による硝酸プルトニウム貯槽 (P11V12) から混合槽 (P12V11) への硝酸プルトニウム溶液の移送量の精度を上げることが重要となる。

そこで、本件では、エアリフト方式による硝酸プルトニウム貯槽 (P11V12) から混合槽 (P12V11) への硝酸プルトニウム溶液の移送量の精度の向上に着目し、

- ① エアリフトポンプによる溶液移送の特性把握
- ② 送液精度の検討
- ③ 送液精度向上を目的とした装置構造の検討

を実施することを目的として、送液パラメータである、圧縮空気流量、真空度及び溶液密度をパラメータに送液試験を実施した。

5.2 試験装置

本装置は、プルトニウム転換技術開発施設内に設置してある、硝酸プルトニウム貯槽 (P11V12) から混合槽 (P12V11) へのエアリフトによる送液ラインを模擬したモックアップ装置であり、モックアップ装置で模擬した各項目は以下の通りである。

- ① エアリフトセパレータの形状、寸法
- ② 配管内径、長さ
- ③ エアリフトの圧縮空気注入部の形状、寸法
- ④ 機器配置
- ⑤ エアリフト揚程

なお、エアリフトセパレータ及び配管の材質については、実機では金属製であるが、モックアップ装置では、送液中の気液混合流の様子が目視観察できる

ように、透明塩化ビニール製とした。

データ測定ユニット部を除く試験装置全体の構成図を図 5.2-1 に示す。

本試験装置は、主に、平成 11 年度に準備した送液配管、エアリフトセパレータ、コンプレッサー及び真空ポンプと、本年度準備した、データ測定ユニット、溶液貯槽（送り側槽及び受け側槽）から構成される。

平成 11 年度に製作した本試験装置の詳細は、「ショートプロセス技術開発-1. Pu 富化度調整技術開発-（平成 11 年度実績報告）（JNC ZN8400 2000-026）」に記載されているが、本項においても、その概要について紹介する。

(1) 送液配管 (A) (上り)

(硝酸プルトニウム貯槽→エアリフトセパレータ間配管の模擬)

装置仕様

材質：透明塩化ビニール製

寸法：

- ① L 形管 (42mm^{OD}×35mm^{ID}×571.6mm/946mm)
- ② 直管 (42mm^{OD}×35mm^{ID}×1950mm)
- ③ L 形管 (42mm^{OD}×35mm^{ID}×400mm/800mm)
- ④ 直管 (42mm^{OD}×35mm^{ID}×500mm) ×2
- ⑤ 直管 (42mm^{OD}×35mm^{ID}×800mm)
- ⑥ 直管 (42mm^{OD}×35mm^{ID}×1558mm)

(2) 送液配管 (B) (下り) (エアリフトセパレータ→混合槽間配管の模擬)

[仕様]

材質：透明塩化ビニール製

寸法：

- ① 直管 (34mm^{OD}×28mm^{ID}×1000mm)
- ② 直管 (34mm^{OD}×28mm^{ID}×800mm)
- ③ 直管 (34mm^{OD}×28mm^{ID}×500mm) ×2
- ④ L 形管 (42mm^{OD}×35mm^{ID}×150mm/1500mm)

- ⑤ L形管 (42mm^{OD}×35mm^{ID}×150mm/502.5mm)
- ⑥ 直管 (34mm^{OD}×28mm^{ID}×579mm)
- ⑦ 直管 (34mm^{OD}×28mm^{ID}×1500mm)

(3) エアリフトセパレータ

エアリフトセパレータは、プルトニウム転換技術開発施設の溶液混合工程で使用されているP12D1202を模擬して製作した。

実機で使用されているエアリフトセパレータは全濃度臨界形状管理となっており、図 5.2-2 に示す形状となっている。本モックアップ試験で使用したエアリフトセパレータの仕様を以下に示す。なお、実験中の内部の観察が容易にできるように、透明塩化ビニール製とした。

図 5.2-3 に本モックアップ試験で使用したエアリフトセパレータの図面を示す。モックアップ装置のエアリフトセパレータの写真を図 5.2-4 に示す。

[仕様]

材質：透明塩化ビニール製

寸法：φ105mm^{ID}×φ65mm^{ID}×1000mm

(4) エア注入部

図 5.2-5 に実際にPu転換施設の実機で使用されているエアリフトの圧縮空気注入部の図面を示す。

モックアップ装置では、オリフィス径、溶液流入部の配管直径、空気流入部の配管直径を模擬した。

モックアップ試験で使用したエア注入部の図面を図 5.2-6 に示す。

(5) コンプレッサー

送液ラインに圧縮空気を供給するためにコンプレッサーを使用した。

使用したコンプレッサーの写真を図 5.2-7 に示す、また、コンプレッサーの仕様を以下に示す。

[仕様]

名称：日立ベビコン

運転方式：圧力開閉器式

出力：0.2 kW

形式：0.2 OP-5S

圧縮機

最高圧力：0.49 MPa

制御圧力 (ON-OFF) : 0.29~0.49MPa

シリンダー径×行程×シリンダー数：φ50mm×18mm×1

電動機：単相 50Hz、100V、310W

(6) 真空ポンプ

使用した真空ポンプの写真を図 5.2-8 に示す。

真空ポンプの仕様を以下に示す。

[仕様]

型名：耐蝕性ポンプ・GCD-135XA (真空機工社製)

形式：回転翼型、2段

排気速度：135 L/min (50 Hz)

到達圧力： 6.7×10^{-2} Pa (ガスバラストバルブ閉)

6.7 Pa (ガスバラストバルブ開)

使用電動機：100 V, 400 W, 4 極 コンデンサー始動 (単相)

全負荷電流値：8.8 A (単相、50 Hz)

回転速度：1420 rpm (単相、50 Hz)

重量：27.8 kg

使用雰囲気温度：7~40 °C

最大寸法：単相 182mm^W×518.5mm^L×250.5mm^H

(7) データ測定ユニット

データ測定ユニットの概念図を図 5.2-9 に示す。

① 超音波式変位センサー

超音波式変位センサーの写真を図 5.2-10 に、超音波式変位センサー・
アンプユニットの写真を図 5.2-11 に示す。また、仕様を以下に示す。

[仕様]

種類：ロングレンジタイプ
センサーヘッド：UD-320
アンプヘッド：UD-300
測定範囲：200～1300mm
表示分解能：1mm
指示精度（表示）：±1% of Full Scale
アナログ電流出力
出力電流：4～20 mA
適用負荷：0～500Ω
分解能：0.08 mA
温度特性：0.05% of Full Scale/℃
定格電源電圧：DC24V リップル（P-P）10%以下
定格消費電流：250mA 以下
重量：センサーヘッド 約190g
アンプユニット：約450g

② 電源ユニット

電源ユニットの写真を図 5.2-12 に示す。また、仕様を以下に示す。

[仕様]

名称：（株）KEYENCE 社製 電源ユニット
形式：KZ-U3
方式：スイッチング方式
入力電源電圧：AC100～240V±10%（50/60Hz）
出力電圧：DC24±10%
リップルノイズ：240mV p-p 以下

出力容量：1.4A

③ データ収集システム

データ収集システムの写真を図 5.2-13 に示す。また、仕様を以下に示す。

[仕様]

名称：(株) KEYENCE 社製 PC カード型データ収集システム

形式：NR-250

機能：アナログ電圧→デジタルデータ変換

信号入力

入力点数：16ch

アナログ電圧入力：±10V、±5V、±2.5V、±1V、±0.5V、±0.25V

最大入力電圧：±30V

変換

分解能：14Bit

最高サンプリング速度：100ms

④ 差圧伝送器

差圧伝送器の写真を図 5.2-14 に示す。また、仕様を以下に示す。

[仕様]

名称：横河電機株式会社製・EJ110

出力信号：4~20 mA DC 出力、BRAIN 形

測定スパン：-90~0 kPa

電源電圧：18~42 DC

負荷抵抗：250~600Ω

⑤ ロードセル

ロードセルの写真を図 5.2-15 及び図 5.2-16 に示す。また、仕様を以下に示す。

[仕様]

名称：株式会社共和電業社製 LUB-50KB 3個

定格容量：500N (50.99 kgf)

許容過負荷：150%

定格出力：2mV/V \pm 0.03%R0

非直線性： \pm 0.03%R0

印加電圧：1~12V AC または DC

ロードセル計装用コンディショナ：株式会社共和電業社製

WGA-710A

(8) 純水製造装置

純水製造装置の写真を図 5.2-17 に示す。また、仕様を以下に示す。

[仕様]

名称：オルガノ株式会社製 ピュアライト PRO-150

原水水質基準：

pH : 5.8~7.5

電気伝導率 : 200 μ S/cm

SDI : 4 以下

残留塩素 : 0~1.0 mg Cl/L 以下

全硬度 : 50 mg CaCO₃/L 以下

シリカ : 30 mg CaCO₃/L 以下

水温 : 10~30℃

処理水流量 : 130L/h 以上

処理水水質 : 1 μ S/cm 以下

(9) 模擬槽 (プルトニウム貯槽模擬、混合槽模擬)

名称：ダイライト容器 (ϕ 512mm^{OD}×810mm^H)

材質：ポリエチレン製

模擬槽の写真を図 5.2-18 に示す。

(10) 比重計

溶液密度の測定には比重計を使用した。比重計の写真を図 5.2-19 に示す。

名称 : TOKYO MOTOKI 製 標準比重計 19 本組

測定可能範囲 : 0.700~1.850 g/cm³

(11) 標準分銅

ロードセルの校正には以下の標準分銅を使用した。ロードセル校正用の標準分銅を図 5.2-20 に示す。

[仕様]

(株) 稲葉製作所製 標準分銅

重量 : 5kg, 10kg, 20kg

試験装置の外観写真を図 5.2-21 に示す。

試験装置の配管図 (モックアップ装置) を図 5.2-22 にそれぞれ示す。

また、装置架台部分の図面を図 5.2-23 に、試験装置架台の外観写真を図 5.2-24 に示す。

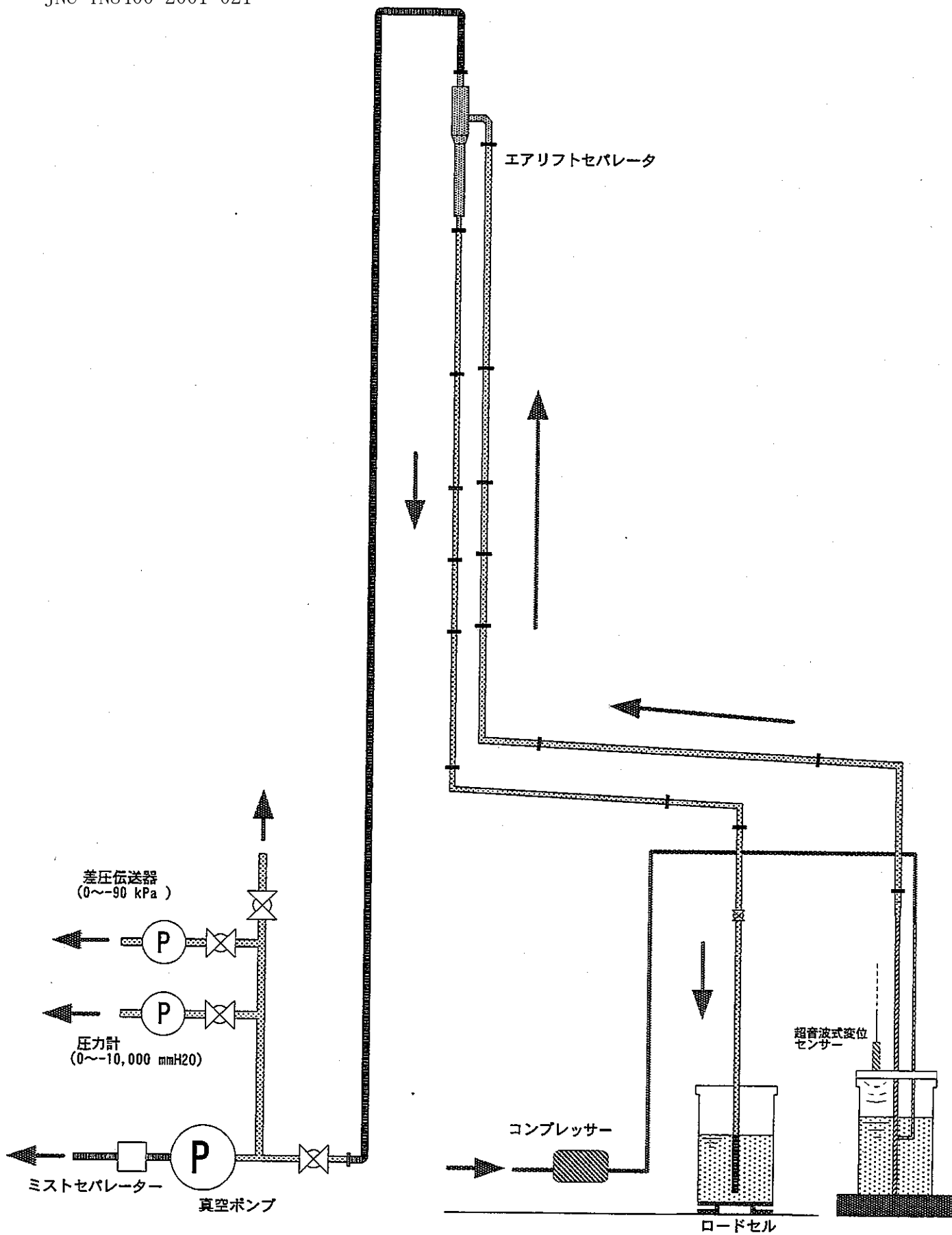


図5.2-1 試験装置全体の構成図

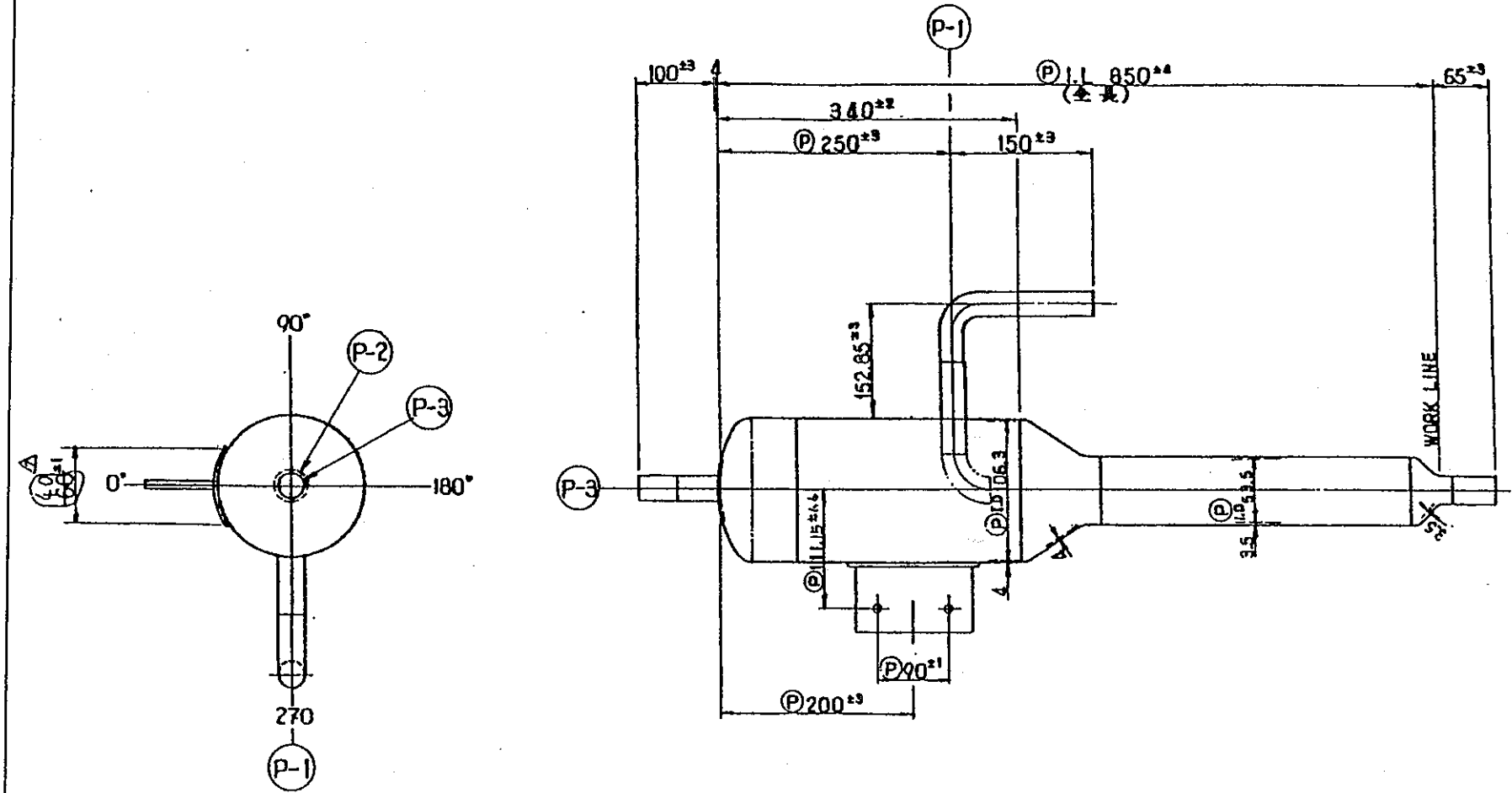
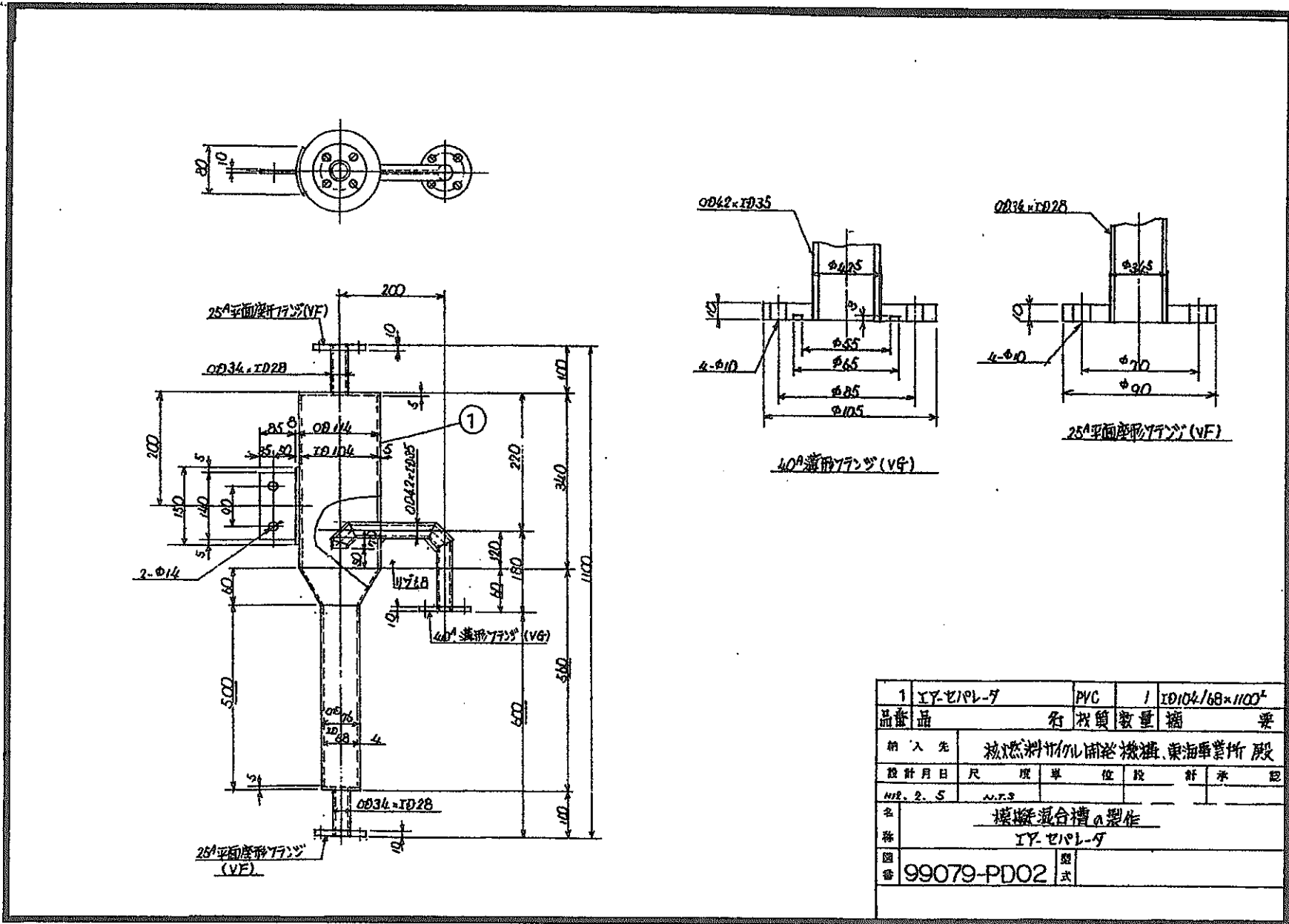


図5.2-2 実機のエアリフトセパレータの図面



1	エフセパレ-タ	PVC	1	10104/68×1100 ⁺
品番	名	材質	数量	備 考
納入先	核燃料サイクル開発機構 東海事業所 股			
設計月日	尺	原	単	位 設 計 承 認
412. 2. 5	~	~	~	~
名 称	模擬混合槽の製作			
図 号	エフセパレ-タ			
番 号	99079-PD02	図 式		

図5.2-3 エアリフトセパレータの図面 (モックアップ装置)

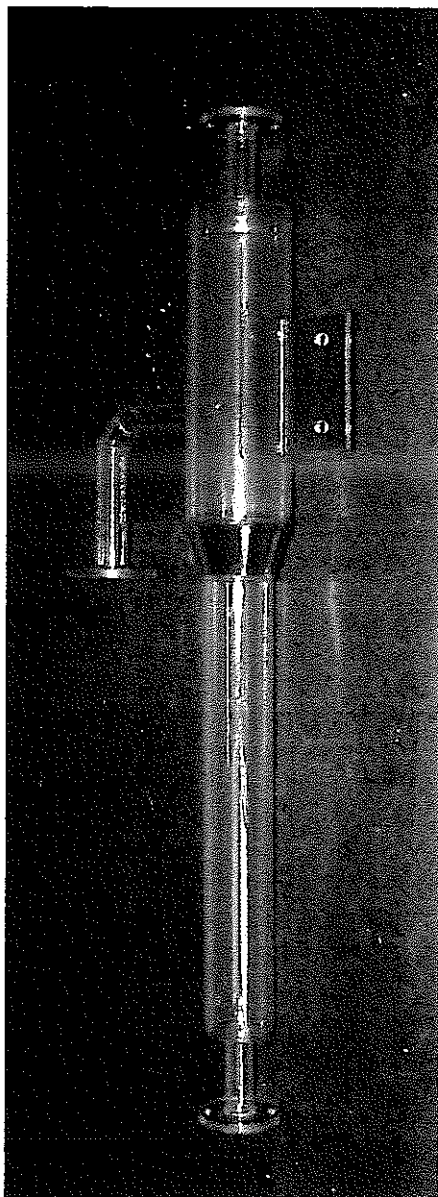


図5.2-4 エアリフトセパレータの写真
(モックアップ装置)

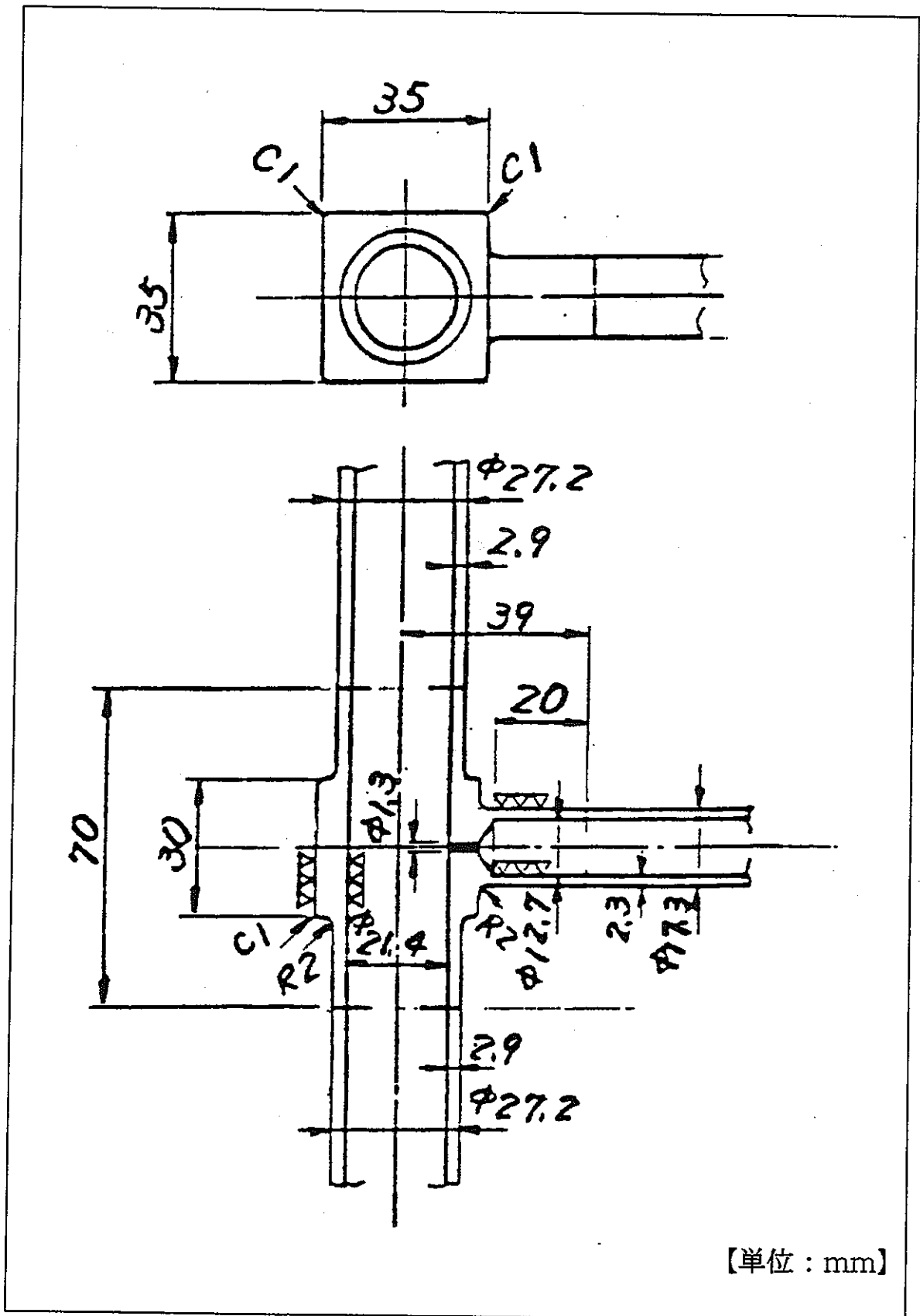


図5.2-5 実機エアリフト用圧縮空気注入部の図面

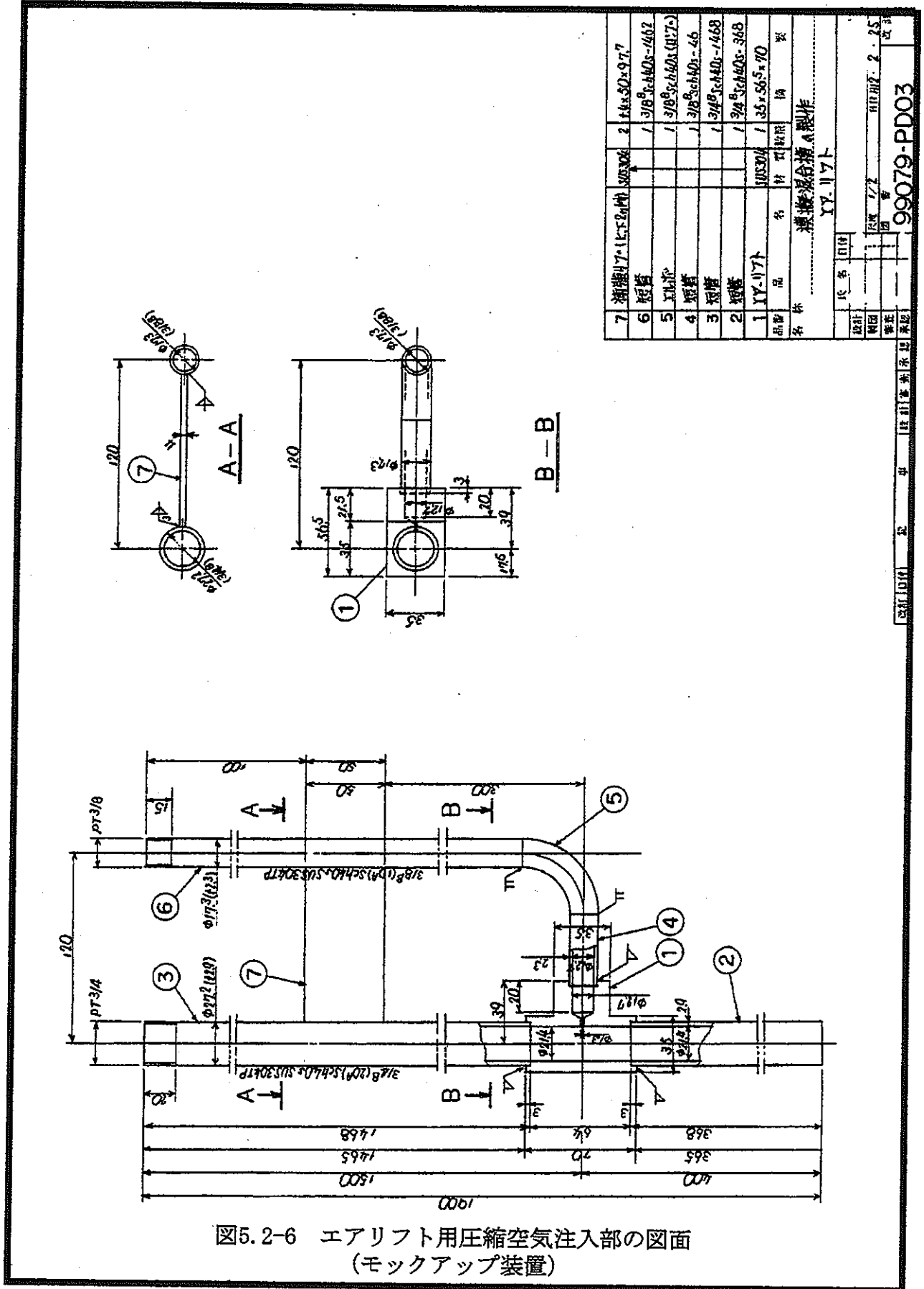


図5.2-6 エアリフト用圧縮空気注入部の図面 (モックアップ装置)

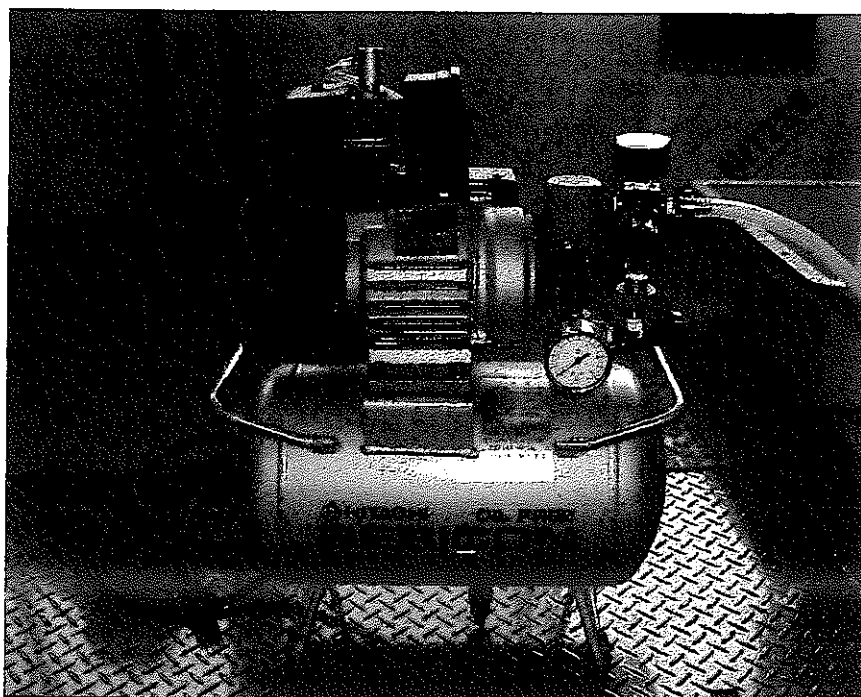


図5.2-7 コンプレッサーの写真

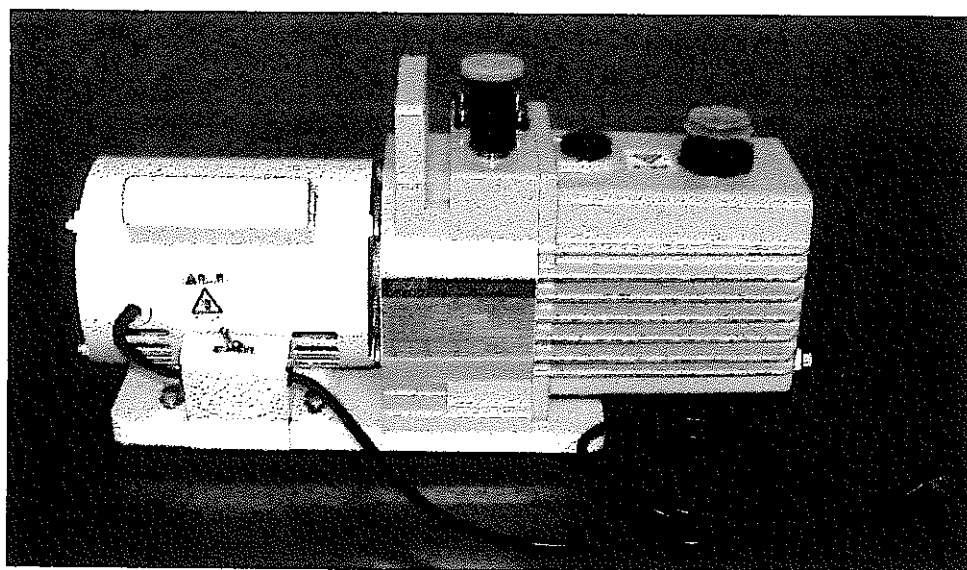


図5.2-8 真空ポンプの写真

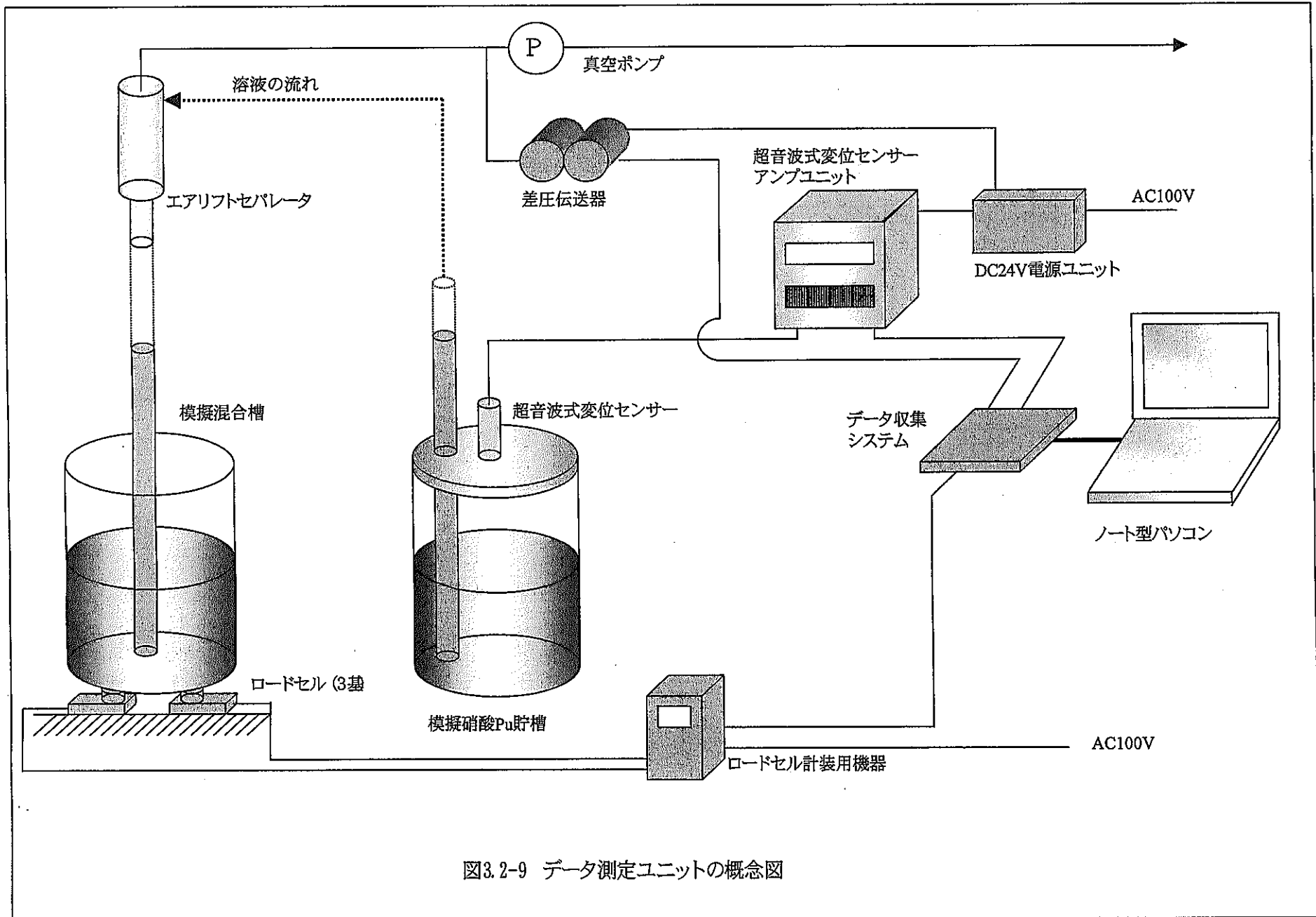


図3.2-9 データ測定ユニットの概念図



図5.2-10 超音波式変位センサー・センサーヘッドの写真

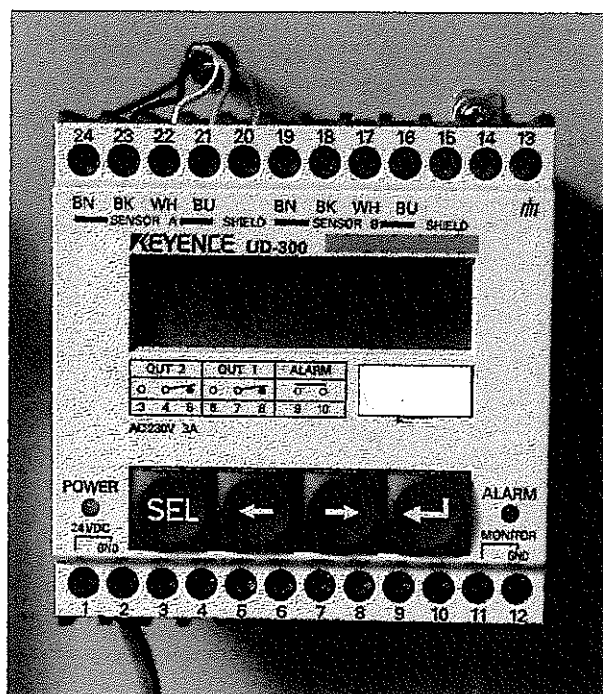


図5.2-11 超音波式変位センサー・アンプユニットの写真

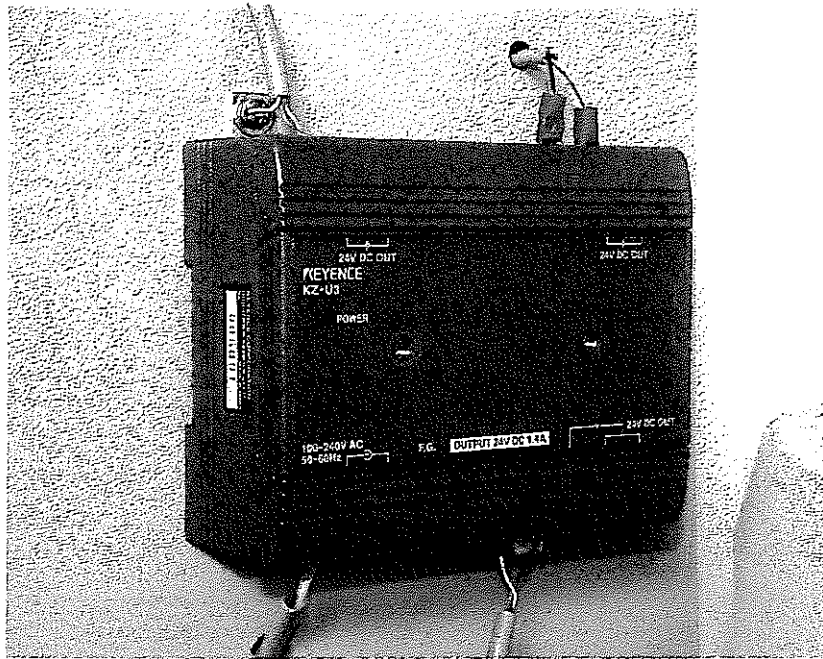


図5.2-12 DC24V電源ユニットの写真

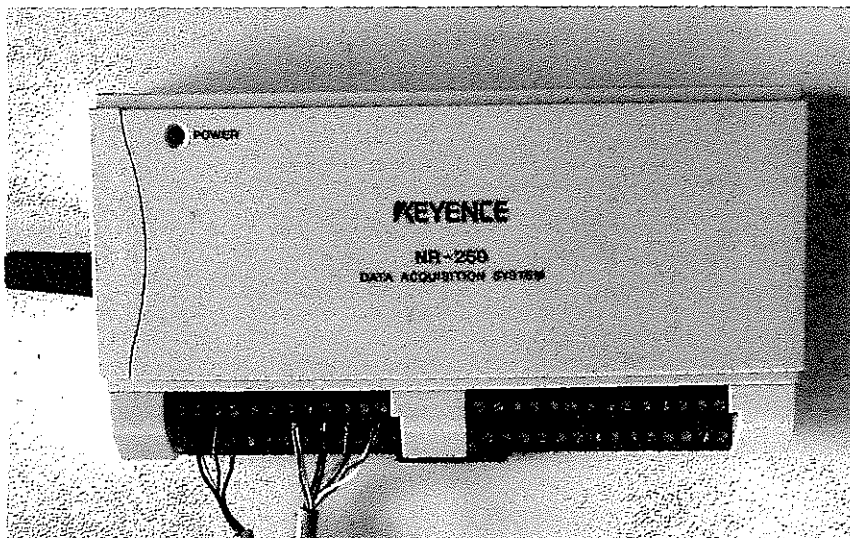


図5.2-13 データ収集システムの写真

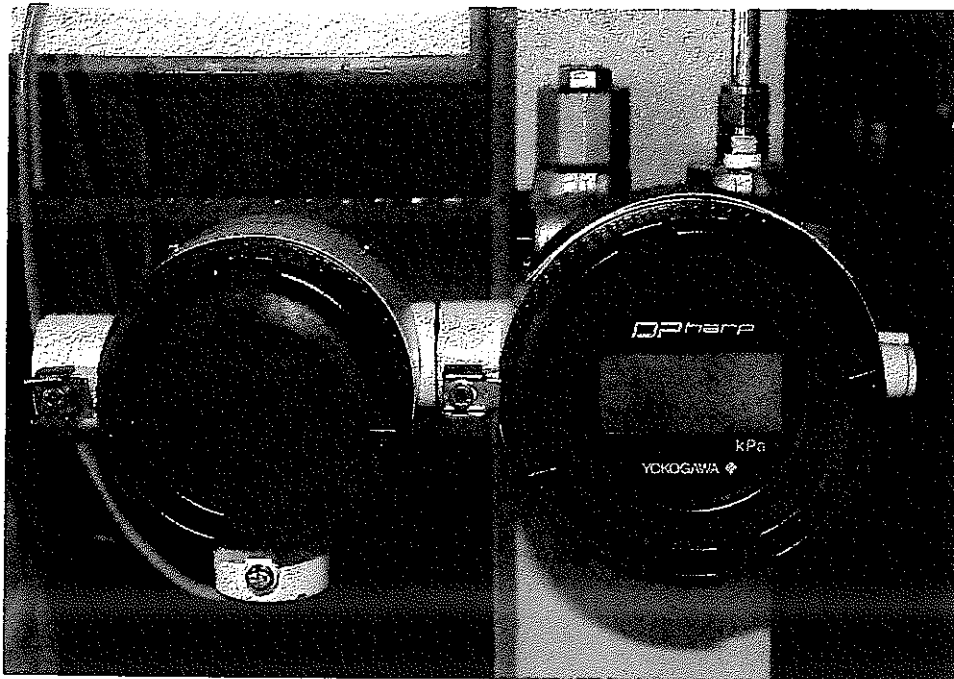


図5.2-14 差圧伝送器の写真

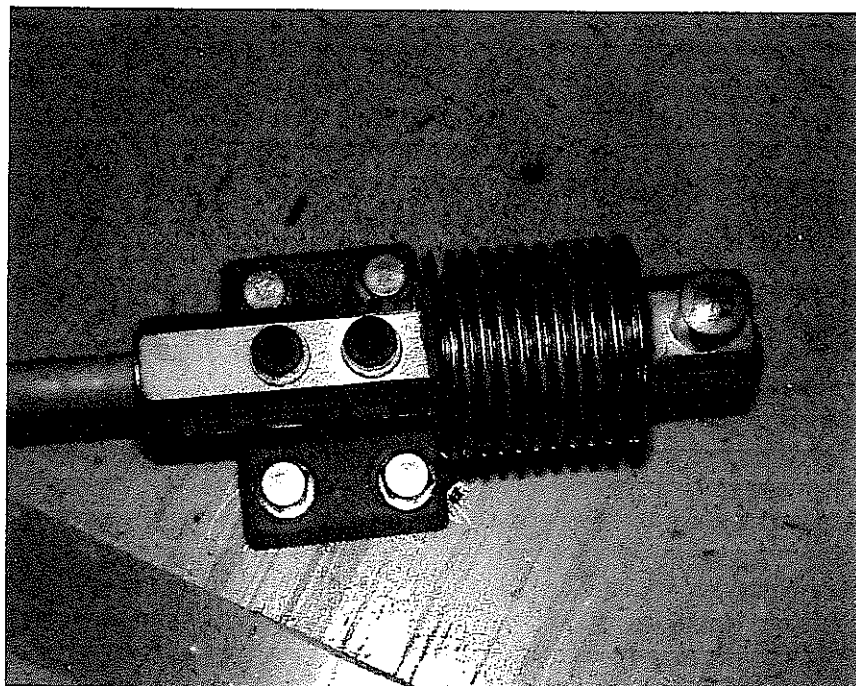


図5.2-15 ロードセルの写真



図5.2-16 ロードセルの写真
(最大負荷荷重50kg×3)

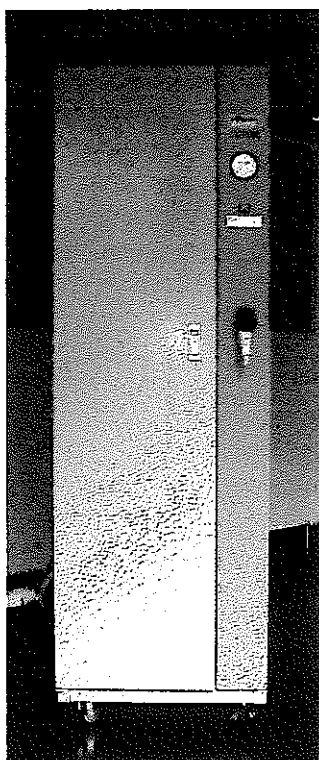


図5.2-17 純水製造装置の写真

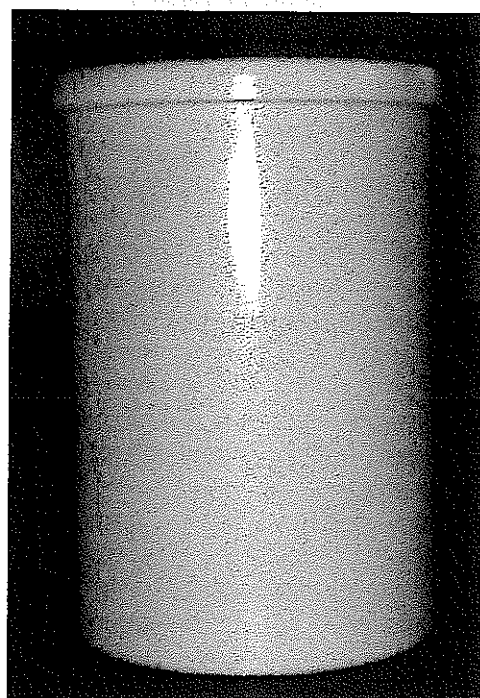
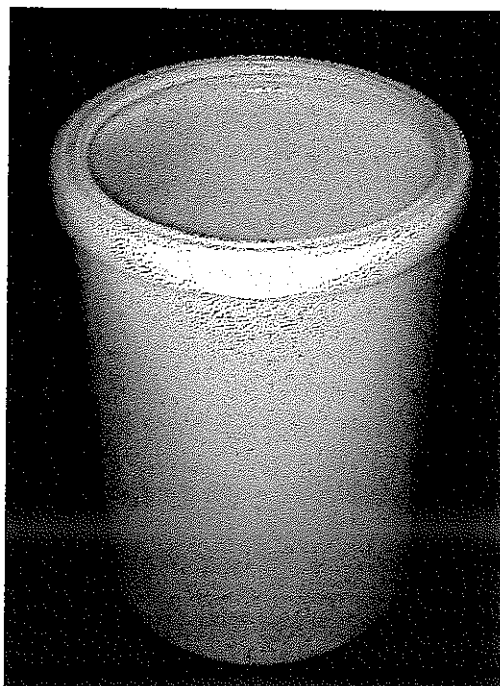


図5.2-18 溶液槽（受け槽及び送り槽）の外観写真

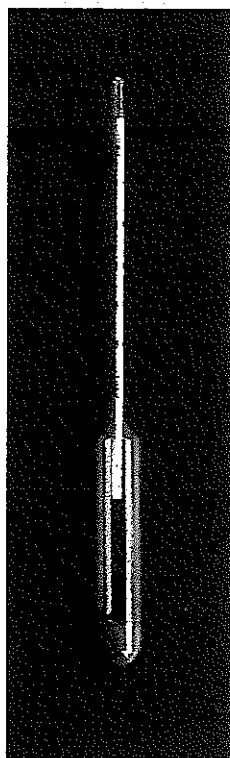
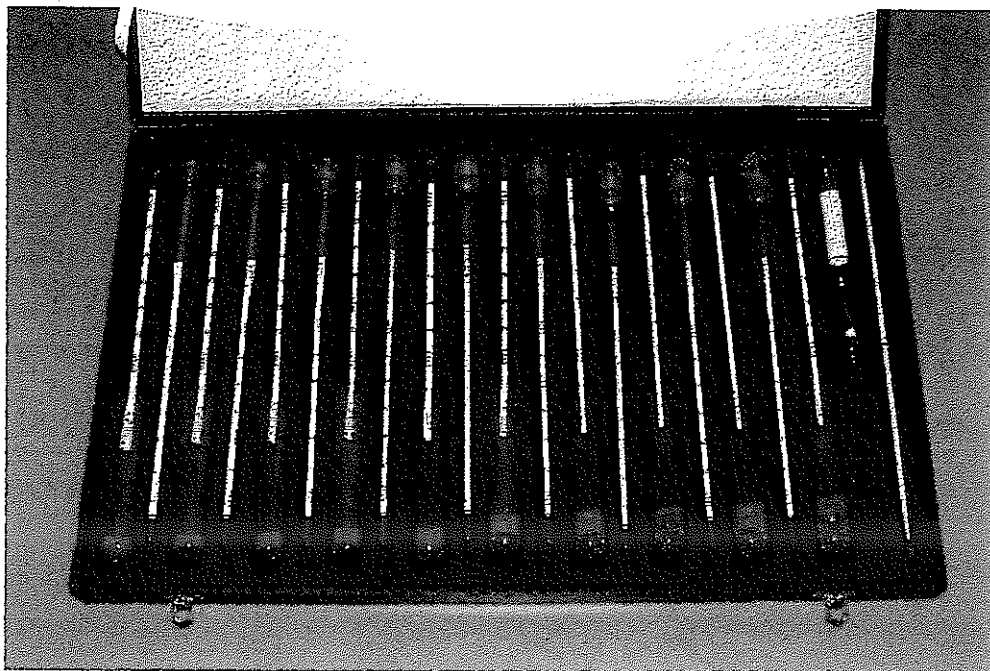


图5.2-19 溶液密度测定用比重計

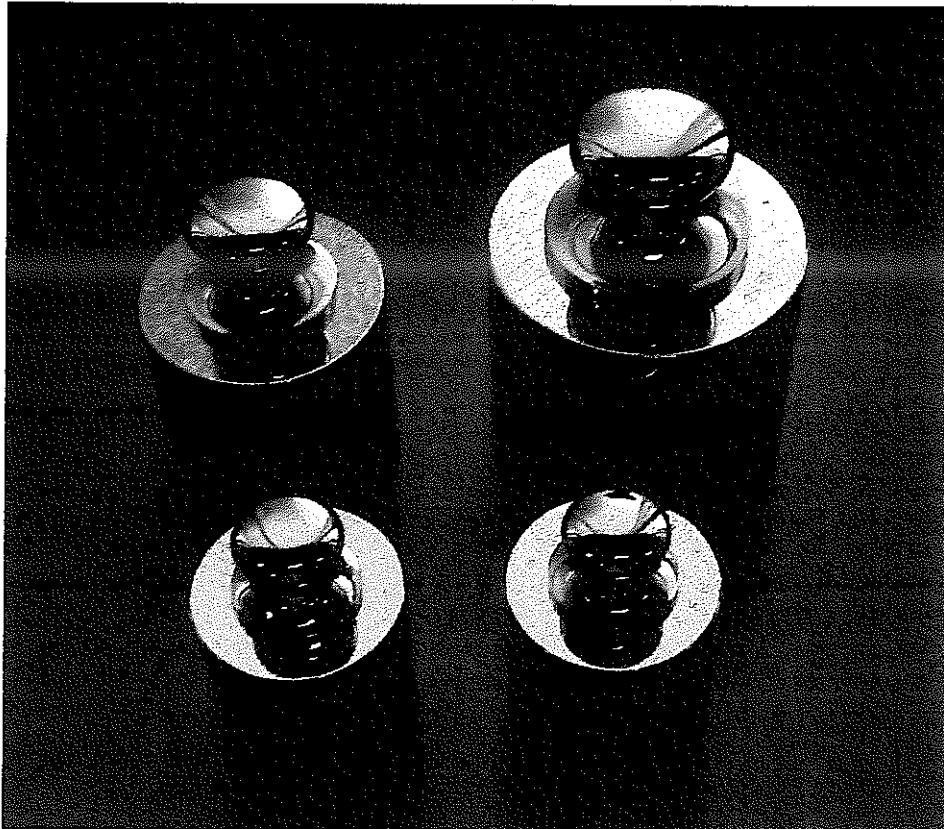


図5.2-20 ロードセル校正用標準分銅
(5kg, 10kg, 20kg)

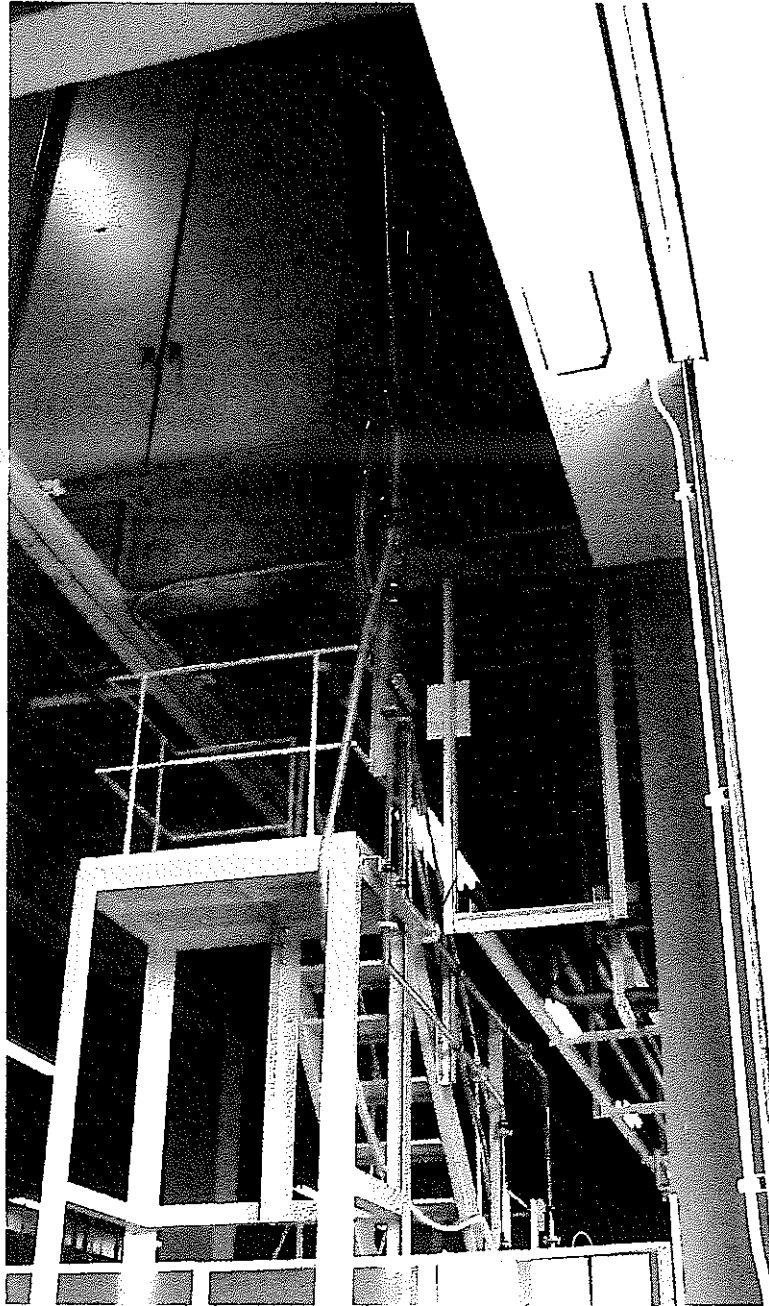


図5.2-21 試験装置の外観写真

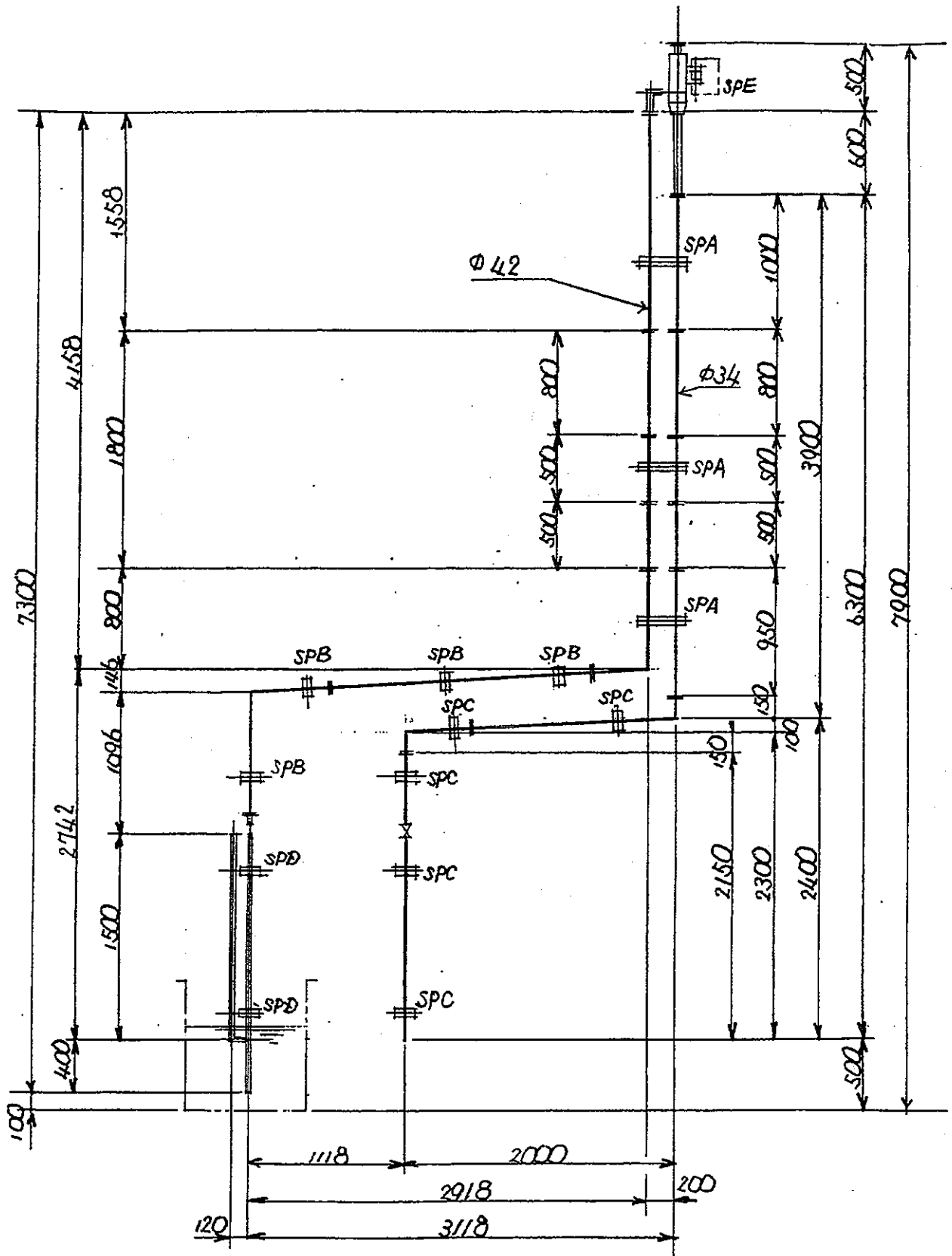


図5.2-22 試験装置の配管図 (モックアップ装置)

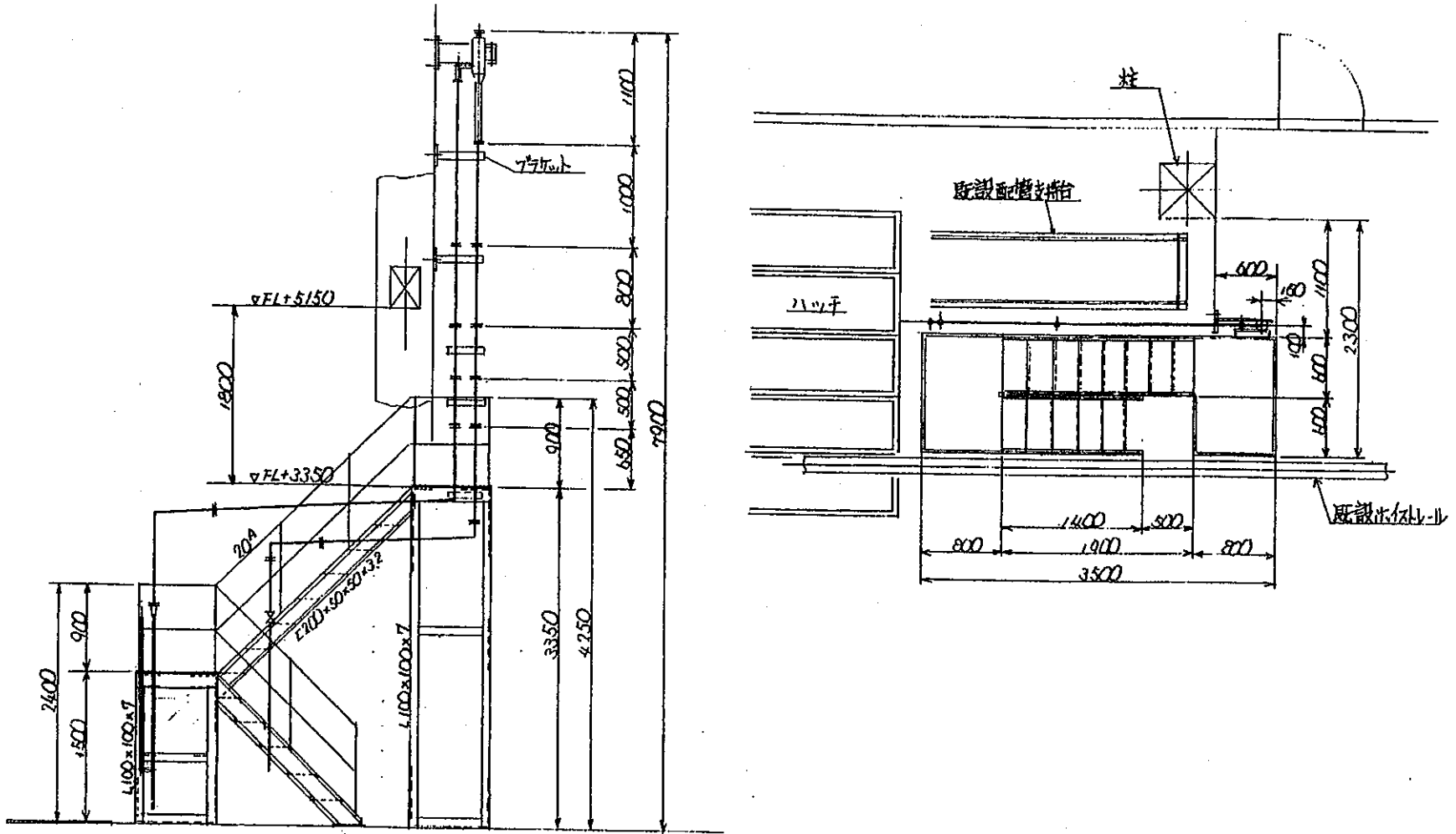


図5.2-23 装置架台部分の図面 (モックアップ装置)

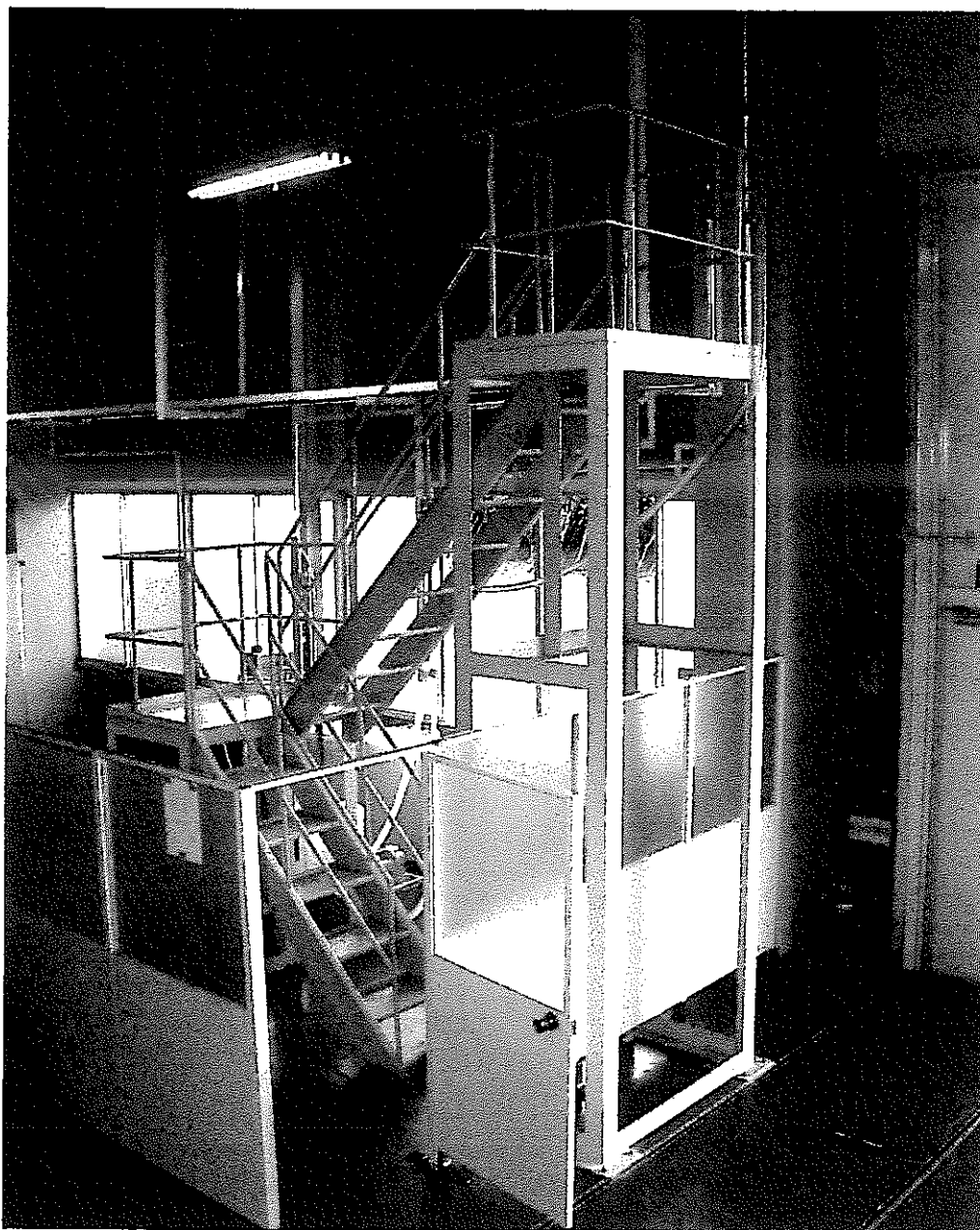


図5.2-24 試験装置架台の外観写真

5.3 測定装置の校正

送液試験に先立ち、槽内の溶液量の測定に使用した超音波式変位センサー及び重量測定に使用したロードセルの校正を実施した。

(1) 超音波式変位センサー

送り側槽（硝酸プルトニウム溶液貯槽模擬）の液量の定量には、

- ① 溶液の気液界面の波立ちが比較的少ないこと
- ② 溶液量を比較的高精度で測定可能なこと
- ③ 測定装置の設置が簡易なこと

等の理由により、超音波式変位センサーを液面計として使用した。

(a) 校正方法

硝酸 Pu 貯槽を模擬した送り側の槽中の溶液量は、槽の上蓋部分に設置した超音波式変位センサーを使用して測定した。

超音波式変位センサーからの信号はアンプユニットに送られ、超音波式変位センサーのアンプユニットからは電圧信号が出力される。その信号はアナログ・デジタルデータ変換カードを經由してノート型パソコンに1秒毎に取り込んだ。

超音波式変位センサーによる測定系の概念図を図 5.3-1 に示す。

超音波式変位センサーによる液量測定は、センサーヘッドから液面までの距離を測定するため、そのときの出力電圧を予め作成した校正直線に当てはめ、液量を算出する必要があるため、予め校正を実施した。

校正直線の作成手順を以下に示す。

- ① 送り側槽内の溶液量がゼロの状態での出力電圧を記録
- ② 2L のメスフラスコを使用して比重 1.000 g/cm^3 の水を 2L 毎に送り側槽に装荷
- ③ 溶液表面が安定した状態で出力電圧を記録
- ④ 溶液量が 120L に達するまで、②及び③を繰り返す
- ⑤ 得られたデータより、最小自乗法を使用して校正式を算出

(b) 校正結果

上記の校正方法により校正を実施し、得られた超音波式変位センサー出力電圧と液量の間を関数図 5.3-2 に示す。

図 5.3-2 を見ると、0～120L の範囲において、超音波式変位センサー出力電圧と液量の直線性の関係が得られており、最小自乗法を使用して一次式の校正式を導いた。

得られた校正式を以下に示す。

$$\text{溶液量 (L)} = -3.31 \times 10 \times \text{出力電圧 (V)} + 1.55 \times 10^2 \quad (\text{式 5.3-1})$$

本試験では、送り側槽（硝酸プルトニウム溶液貯槽模擬）の液量の定量に超音波式変位センサーを液面計として使用した。また、液面計出力と液量の換算は式 5.3-1 を使用した。

(2) ロードセル

受け側槽（混合槽模擬）の液量の測定には、

- ① 溶液の流入により送液中の気液界面の波立ちが比較的大きいこと
 - ② 容器の変形等にも依存せず、安定して溶液重量が測定可能なこと
- 等の理由により、ロードセルを使用して溶液重量を測定することとした。

(a) 校正方法

混合槽を模擬した受け側の槽中の溶液量は、槽の下部に設置したロードセルを使用して測定した。

ロードセルは 1 台の最高負荷加重は 50kg であり、3 台 1 組で構成され、0～150kg まで測定可能としている。

ロードセルからの信号は計装用コンディショナーに送られ、そこから電圧信号が出力される。その信号はアナログ・デジタルデータ変換カードを経由してノート型パソコンに 1 秒毎に取り込んだ。

ロードセルを使用した測定系の概念図を図 5.3-3 に示す。

ロードセルによる液量重量測定では、基本的に負荷重量とロードセル出力電圧には直線性が認められているものの、その直線の傾きはロードセルの種類及びその設定等で決定されるため、送液試験開始前に、予め校正を実施した。

使用したロードセルの校正手順を以下に示す。

- ① ロードセルに円環状の金属板（容器支持台 SUS 製、重量約 8kg）を装荷
- ② 計装用コンディショナの表示をゼロリセット
- ③ 5kg の標準分銅を装荷
- ④ 出力が安定したら出力電圧の記録
- ⑤ 5kg ずつ装荷量を増加
- ⑥ 装荷量 120kg まで⑤及び④の繰り返し
- ⑦ 最小自乗法により校正直線を算出

(b) 校正結果

図 5.3-4 にロードセル負荷重量と出力電圧の関係を示す。

図 5.3-4 を見れば明らかなように、0kg～130kg の範囲において、ロードセル負荷重量と出力電圧との間には直線性が得られている。

そこで、得られたロードセル負荷重量と出力電圧の関係のデータから、最小自乗法を用いて一次式で校正式を導出した。

校正式を以下に示す。

$$\underline{\text{出力電圧 (V) = 負荷重量 (kg) } \times 6.67 \times 10^{-2}} \quad (\text{式 5.3-2})$$

受け槽内の溶液重量は、式 5.3-2 を使用して算出した。また、重量から容積への変換は、毎日、試験開始前に溶液密度を比重計を使用して測定し、その溶液比重の測定結果より実施した。

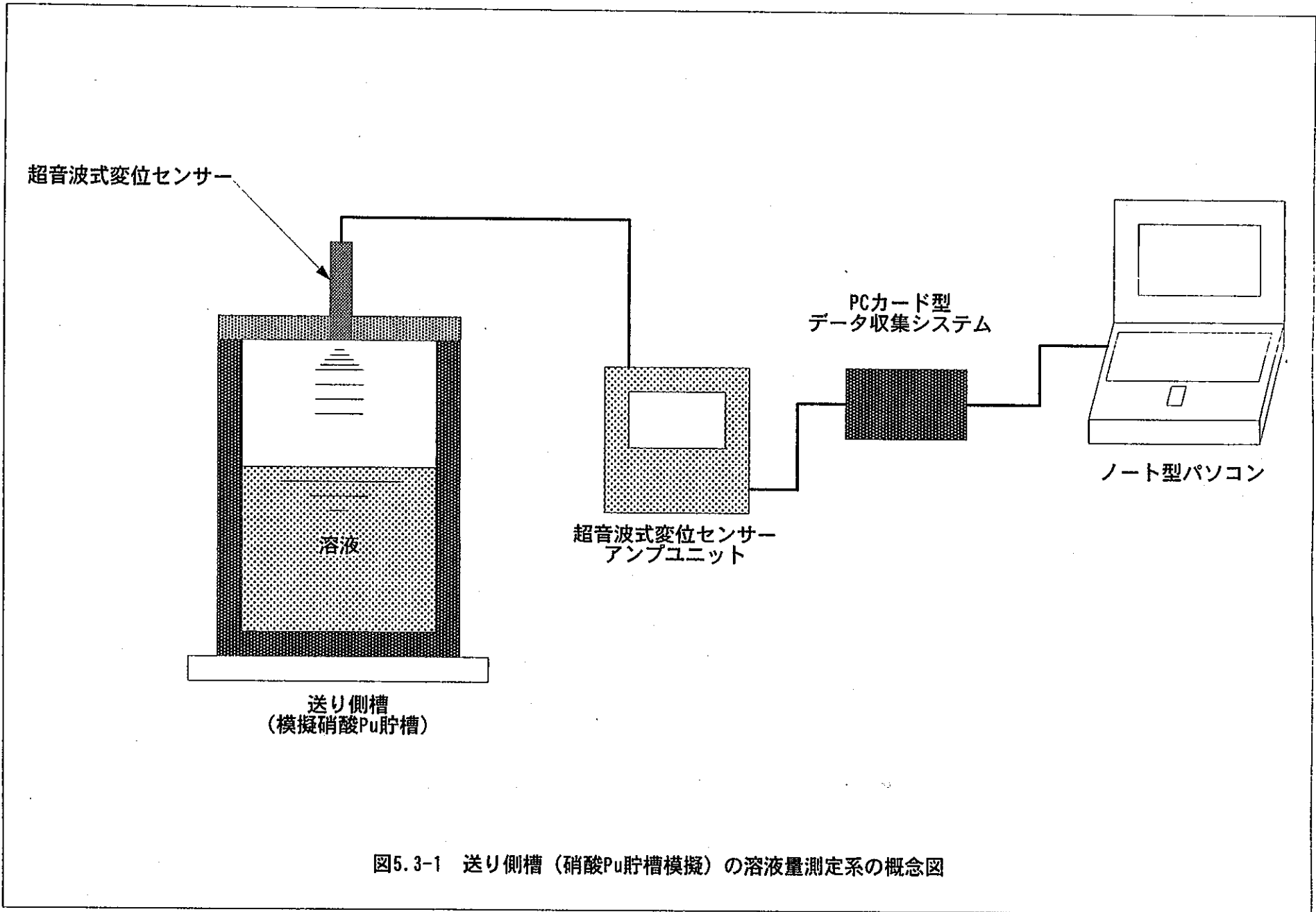


図5.3-1 送り側槽 (硝酸Pu貯槽模擬) の溶液量測定系の概念図

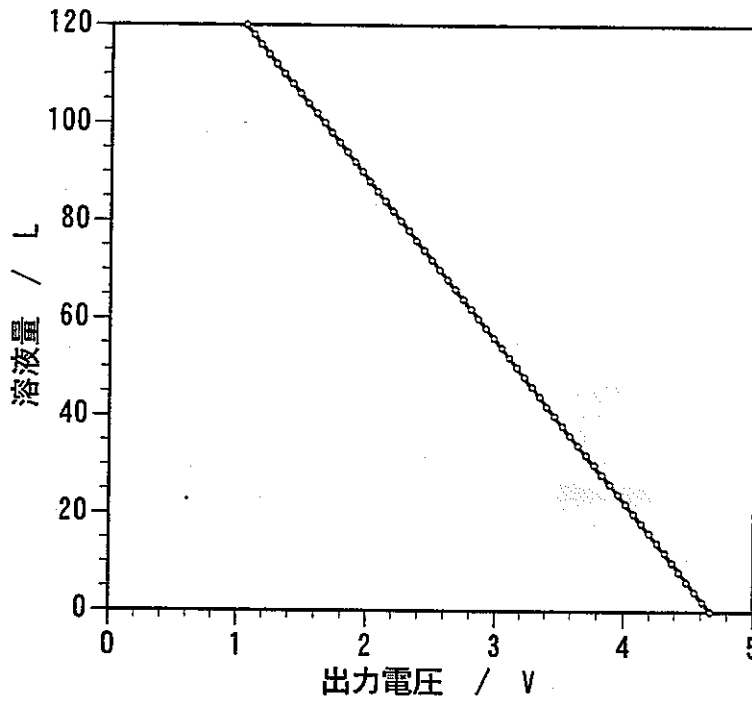


図5.3-2 超音波式変位センサー出力電圧と液量の関係

校正式：

$$\text{溶液量 (L)} = -3.31 \times 10^1 \times \text{出力電圧 (V)} + 1.55 \times 10^2$$

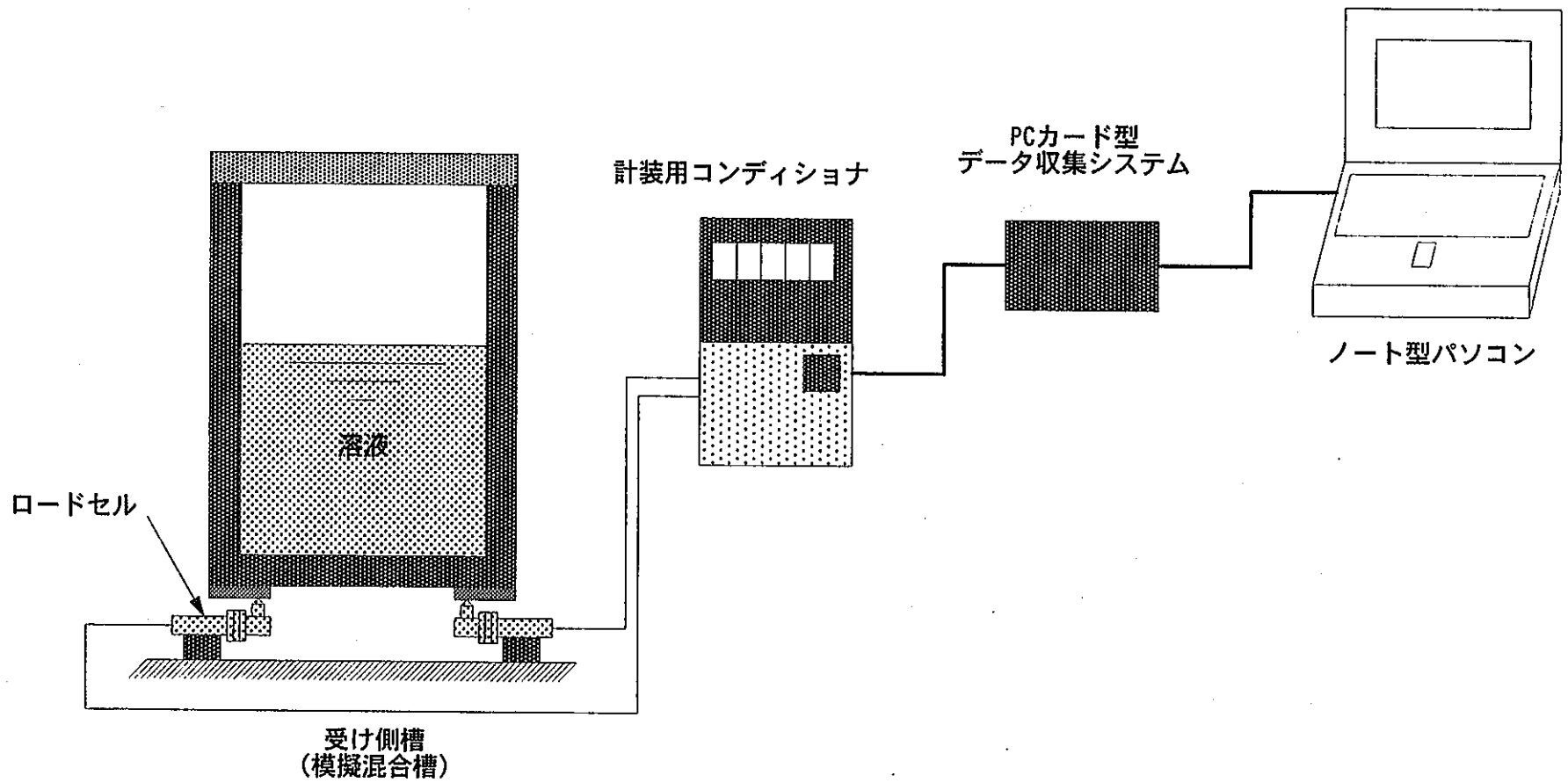


図5.3-3 受け側槽 (混合槽模擬) の溶液量測定系の概念図

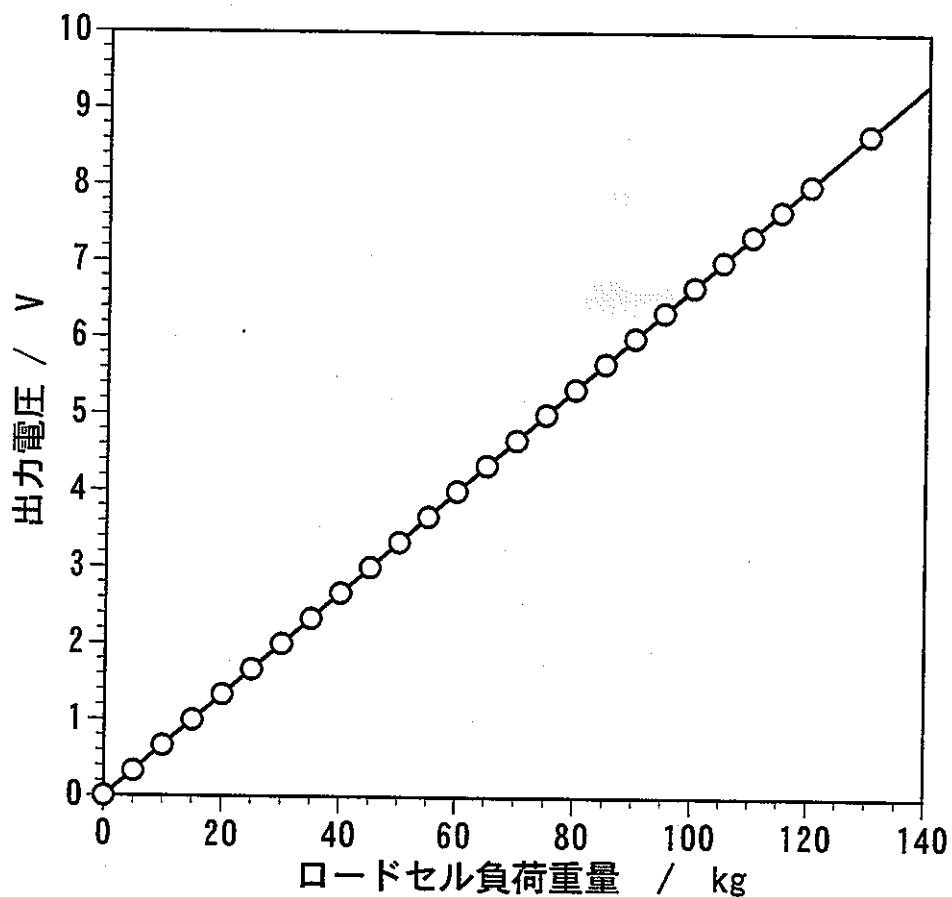


図5.3-4 ロードセル負荷重量と出力電圧の関係

校正式：出力電圧(V)=負荷重量(kg)×6.67×10⁻²

5.4 模擬溶液の検討

本モックアップ試験の対象となる Pu 転換技術開発施設の溶液混合工程では、硝酸プルトニウム溶液及び硝酸ウラニル溶液の混合が実施されているが、モックアップ装置を設置した試験室では、核燃料物質を使用できないため、非放射性物質の模擬溶液を使用する必要がある。

そこで、本試験の実施にあたり模擬溶液の選定を実施した。

模擬溶液の選定に先立ち、実際に使用している硝酸プルトニウム溶液、硝酸ウラニル溶液及びそれらの混合溶液の基礎物性の調査を実施した。

本項では、物性調査結果及び模擬溶液選定に関する検討結果を以下に示す。

5.4.1 溶液基礎物性の調査

MOX 粉末の原料となる、硝酸プルトニウム溶液、硝酸ウラニル溶液及びこれらの混合溶液の基礎物性の調査を実施した。

本件では、送液特性及び送液精度評価に大きな影響を与えるものと考えられる溶液の密度及び粘度に関する調査を実施した。

(1) 密度

(a) $UO_2(NO_3)_2$ 硝酸溶液

① Purex Technical Manual (HW-31000) ⁽²⁾

硝酸濃度 5N まで±1%の精度を有する $UO_2(NO_3)_2$ 硝酸溶液の密度式が Purex Technical Manual に記載されている。

Purex 工程での、 $NaNO_3$ 、 $NaNO_2$ 及び $Fe(NH_2SO_3)_2$ 等の水溶性物質の影響は小さく、本式からは除かれている。

25℃の硝酸ウラニル溶液の密度

$$d_{25} = 1.0012 + 0.3177 [UO_2(NO_3)_2] + 0.03096 [HNO_3] \dots\dots\dots \text{(式 5.4.1-1)}$$

d_{25} : 25℃の硝酸溶液の密度 (g/mL)

$[UO_2(NO_3)_2]$: ウラン濃度 (mol/L)

$[HNO_3]$: 硝酸濃度 (mol/L)

上記の 25℃の硝酸ウラニル溶液の密度は、次式によって各温度の硝酸溶液の密度に展開される。

$$d_t = 1.0125 \times d_{25} + 0.000145 \times t - 0.0005 \times t \times d_{25} - 0.0036$$

…………… (式 5.4.1-2)

② 臨界安全ハンドブック^③

日本原子力研究所で編集された臨界安全ハンドブックに $UO_2(NO_3)_2$ 硝酸溶液の密度式が示されている。

以下に示す密度式は、既存の文献に示される幾つかの密度式を比較検討し、本ハンドブックでは以下に示す Moeken の式を採択している。ここでは原式を換算しウラン濃度を (g-U/L) の単位で入るようにしている。温度換算は Moeken の式ではなく、①に示す Hanford より報告されている式を用いている。

検討の過程の詳細は JAERI-M83-047^④「ウラン・プルトニウム系の臨界計算・I」に記載されている。

25℃の硝酸溶液の密度

$$\rho_{25} = 1.0171 + 1.2944 \times 10^{-3} \times C_U + 0.0289 \times C_H \dots\dots\dots (式 5.4.1-3)$$

t℃の硝酸溶液の密度

$$\rho_t = 1.0125 \times \rho_{25} + 0.000145 \times t - 0.0005 \times \rho_{25} \times t - 0.0036$$

…………… (式 5.4.1-4)

- ρ_{25} : 25℃の硝酸溶液の密度 (g/cm³)
- ρ_t : t℃の硝酸溶液の密度 (g/cm³)
- C_U : ウラン濃度 (g-U/L)
- C_H : 硝酸濃度 (g-U/L)

(参考)

Moeken の式

$$\rho_{25} = 1.0171 + 0.3081 [\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2] + 0.0289 [\text{HNO}_3]$$

$$\rho_{20} = 1.0185 + 0.3086 [\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2] + 0.0294 [\text{HNO}_3]$$

$$\rho_t = \rho_{20} / \{1 + C \times (T - 20)\}$$

$$C = 3.41 \times 10^{-4} + 0.56 \times 10^{-4} \times [\text{HNO}_3] + 1.05 \times 10^{-4} \times [\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2]$$

$[\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2]$: 硝酸ウラニル濃度 (mol/L) (at 20°C)

$[\text{HNO}_3]$: 硝酸濃度 (mol/L) (at 20°C)

T : 温度 (°C)

③ Purex Technical Manual⁽⁵⁾

$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 濃度 0~2.6M (25°Cにおける飽和値) の範囲における、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-HNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ 系水溶液 (25°C) の密度曲線が Purex Technical Manual に示されている。

図 5.4.1-1 に $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 濃度と溶液密度の関係を示す。

また、25°Cの溶液の密度は次式で与えられている。

$$d_{25} = 0.99704 + 0.3166 \times [U] + 0.0327 \times [\text{HNO}_3] - 0.00113 \times [U] \times [\text{HNO}_3]$$

…………… (式 5.4.1-5)

d_{25} : density at 25°C, g/mL

[X] : molarity of solution component

さらに、25°Cの密度式は、以下の式により 0~40°Cの範囲に拡張される。

$$d_T = 1.0125 \times d_{25} + 0.000145 \times T - 0.0005 \times T \times d_{25} - 0.0036$$

…………… (式 5.4.1-6)

T : Temperature, °C

上記の密度式は、(a)-①のHW-31000 (文献番号(2)) の式とは係数が異なり、U濃度と硝酸濃度の積の影響項が追加されたが、詳細は不明である。

温度換算式についてはHW-31000 と全く変わっていない。

(b) Pu(NO₃)₄硝酸溶液

① Purex Technical Manual (HW-31000) ⁽²⁾

25°CにおけるPu(NO₃)₄硝酸溶液の密度式がPurex Technical Manualに記載されている。なお、原典には、温度補正に関する記載はない。

25°Cの硝酸プルトニウム溶液の密度

$$d_{25} = 1.0012 + 0.22 [\text{Pu}(\text{NO}_3)_4] + 0.03096 [\text{HNO}_3] \dots\dots\dots \text{(式 5.4.1-7)}$$

- d_{25} : 25°Cの硝酸溶液の密度 (g/mL)
- $[\text{Pu}(\text{NO}_3)_4]$: 硝酸プルトニウム濃度 (mol/L)
- $[\text{HNO}_3]$: 硝酸濃度 (mol/L)

② 臨界安全ハンドブック ⁽³⁾

日本原子力研究所で編集された臨界安全ハンドブックに Pu(NO₃)₄硝酸溶液の密度式が以下の様に示されている。

$$\begin{aligned} \rho_t = & 0.99708 + 1.65625 \times 10^{-3} \times C_{\text{Pu}} + 3.2959 \times 10^{-2} \times C_{\text{H}} - 5.9915 \times 10^{-4} \times T \\ & - 4.8706 \times 10^{-5} \times C_{\text{Pu}} \times C_{\text{H}} - 1.4217 \times 10^{-6} \times C_{\text{Pu}} \times T - 3.418 \times 10^{-8} \times C_{\text{Pu}}^2 \\ & \dots\dots\dots \text{(式 5.4.1-8)} \end{aligned}$$

- ρ_t : 溶液の密度 (g/cm³)
- C_{Pu} : プルトニウム濃度 (g-Pu/L)

C_H : 硝酸濃度 (mol/L)
 T : $T=t-25$
 t : 温度 (°C)

③ JAERI-M91-117⁽⁶⁾

Pu (IV) -硝酸水溶液系の密度式の改良が、桜井によって報告されている。

ここでは、Hofstetter らの密度測定データに著者の硝酸系密度測定データを加えて重回帰分析を行い、密度改良式を導出している。

適用範囲は以下の通りである。

Pu (IV) 濃度 : 0~480 g/L
 硝酸濃度 : 0~7 mol/L
 温度 : 10~60°C

$$\rho = 1.0012 + 1.6709 \times 10^{-3} \times C_{Pu} + 3.5573 \times 10^{-2} \times C_{HN} - 7.88 \times 10^{-5} \times T - 4.394 \times 10^{-8} \times C_{Pu}^2 - 3.62 \times 10^{-6} \times T^2 - 4.005 \times 10^{-5} \times C_{Pu} \times C_{HN} - 1.38 \times 10^{-6} \times C_{Pu} \times T - 1.104 \times 10^{-4} \times C_{HN} \times T - 3.5 \times 10^{-5} \times C_{HN}^3 + 4.1 \times 10^{-7} \times C_{HN} \times T^2$$

..... (式 5.4.1-9)

C_{Pu} : 25°CにおけるPu (IV) 濃度
 C_{HN} : 25°Cにおける硝酸濃度 (mol/L)
 T : 温度 (°C)

④ Reactor Handbook Vol. II Fuel Reprocessing, Second Edition⁽⁷⁾

Reactor Handbook Vol. II に $Pu(NO_3)_4$ 硝酸溶液の密度式が以下の様に記載されている。

[$Pu(NO_3)_4$] < 2.1 M, [HNO_3] < 9M の場合

$$\rho = 1.0 + 0.00146 \times C_{Pu} + 0.031 C_H \dots \dots \dots (式 5.4.1-10)$$

$[\text{Pu}(\text{NO}_3)_4] > 2.1 \text{ M}$, $[\text{HNO}_3] > 9\text{M}$ の場合

$$\rho = 1.0 + 0.00134 \times C_{\text{Pu}} + 0.031 C_{\text{H}} \dots \dots \dots \text{(式 5.4.1-11)}$$

- ρ : 溶液の密度 (g/cm³)
- C_{Pu} : プルトニウム濃度 (gPu/L)
- C_{H} : 硝酸濃度 (mol/L)

⑤ Purex Technical Manual⁽⁵⁾

Purex Technical Manual に $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 硝酸溶液の密度式が以下の様に示されている。

$$\text{Sp. G.} = 1 + (0.031) \times (\underline{\text{M}} \text{ HNO}_3) + (0.00146) \times (\text{g Pu/L}) \dots \dots \dots \text{(式 5.4.1-12)}$$

- Sp. G. : specific gravity of the solution at 25°C
- $\underline{\text{M}} \text{ HNO}_3$: molarity of nitric acid
- G Pu/L : concentration of plutonium, in g/L

(c) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 - \text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 硝酸溶液

① 臨界安全ハンドブック⁽³⁾

臨界安全ハンドブックには $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ の密度式と $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ の密度式から混合溶液の密度式を算出した以下の式が掲載されている。導出の過程は、JAERI-M 83-047「ウラン、プルトニウム溶液系の臨界計算・I」にその詳細が示されている。

また、この計算式と実験値との比較も行われていて、±0.4%の範囲内でよく一致している。しかし、実験データが限られた狭い範囲にあるため、U-Pu の割合の全域に対して適用可能かどうかは不明としている。

$$\rho_{U+Pu} = R_U \times \rho_{U (U+Pu)} + R_{Pu} \times \rho_{Pu (U+Pu)} - R_U \times C_{Pu} \{1.50 \times 10^{-3}/C_N - 3.05 \times 10^{-4}\}$$

..... (式 5.4.1-13)

$$R_U = C_U / (C_U + C_{Pu})$$

$$R_{Pu} = C_{Pu} / (C_U + C_{Pu})$$

$$C_N = 4C_{PN} + 2C_{UN} + C_H$$

ρ_{U+Pu} : Pu-U 混合溶液の密度 (g/cm³)

$\rho_{U (U+Pu)}$: 溶液中の U と Pu を全部 U と見たときの密度 (g/cm³)

$\rho_{Pu (U+Pu)}$: 溶液中の U と Pu を全部 Pu と見たときの密度 (g/cm³)

C_U : ウラン濃度 (gU/L)

C_{Pu} : プルトニウム濃度 (gPu/L)

C_{PN} : 硝酸プルトニウム濃度 (mol Pu(NO₃)₄/L)

C_{UN} : 硝酸ウラニル濃度 (mol UO₂(NO₃)₂/L)

C_H : 硝酸濃度 (mol HNO₃/L)

② JAERI-M88-127⁽⁸⁾

以下に示す式は、従来の 161 個の密度測定データに、最近報告された Cauchetier の 60 個のデータを加えて重回帰分析を行い導出したものである。

Pu+U 濃度 < 350 g/L

硝酸濃度 < 5M

温度 : 20 ~ 60°C

$$\begin{aligned} \rho = & 1.6903 \times 10^{-3} \times C_{Pu} + 1.4276 \times 10^{-3} \times C_U + 3.9956 \times 10^{-2} \times C_{HN} - 8.696 \times \\ & 10^{-8} \times C_{Pu}^2 - 1.087 \times 10^{-7} \times C_U^2 - 8.513 \times 10^{-4} \times C_{HN}^2 - 5.442 \times 10^{-6} \times \\ & T^2 - 4.4889 \times 10^{-5} \times C_{Pu} \times C_{HN} - 1.310 \times 10^{-5} \times C_{Pu} \times T - 1.564 \times 10^{-5} \times \\ & C_U \times C_{HN} - 9.487 \times 10^{-7} \times C_U \times T - 8.684 \times 10^{-5} \times C_{HN} \times T + 0.99833 \end{aligned}$$

..... (式 5.4.1-14)

- C_{Pu} : 25°Cにおけるプルトニウム濃度 (g/L)
- C_U : 25°Cにおけるウラン濃度 (g/L)
- C_{HNO_3} : 25°Cにおける硝酸濃度 (M)
- T : 温度 (°C)

(2) 粘度

(a) $UO_2(NO_3)_2$ 硝酸溶液

① Purex Technical Manual (HW-31000) ⁽²⁾ (RHO-MA-116) ⁽⁵⁾

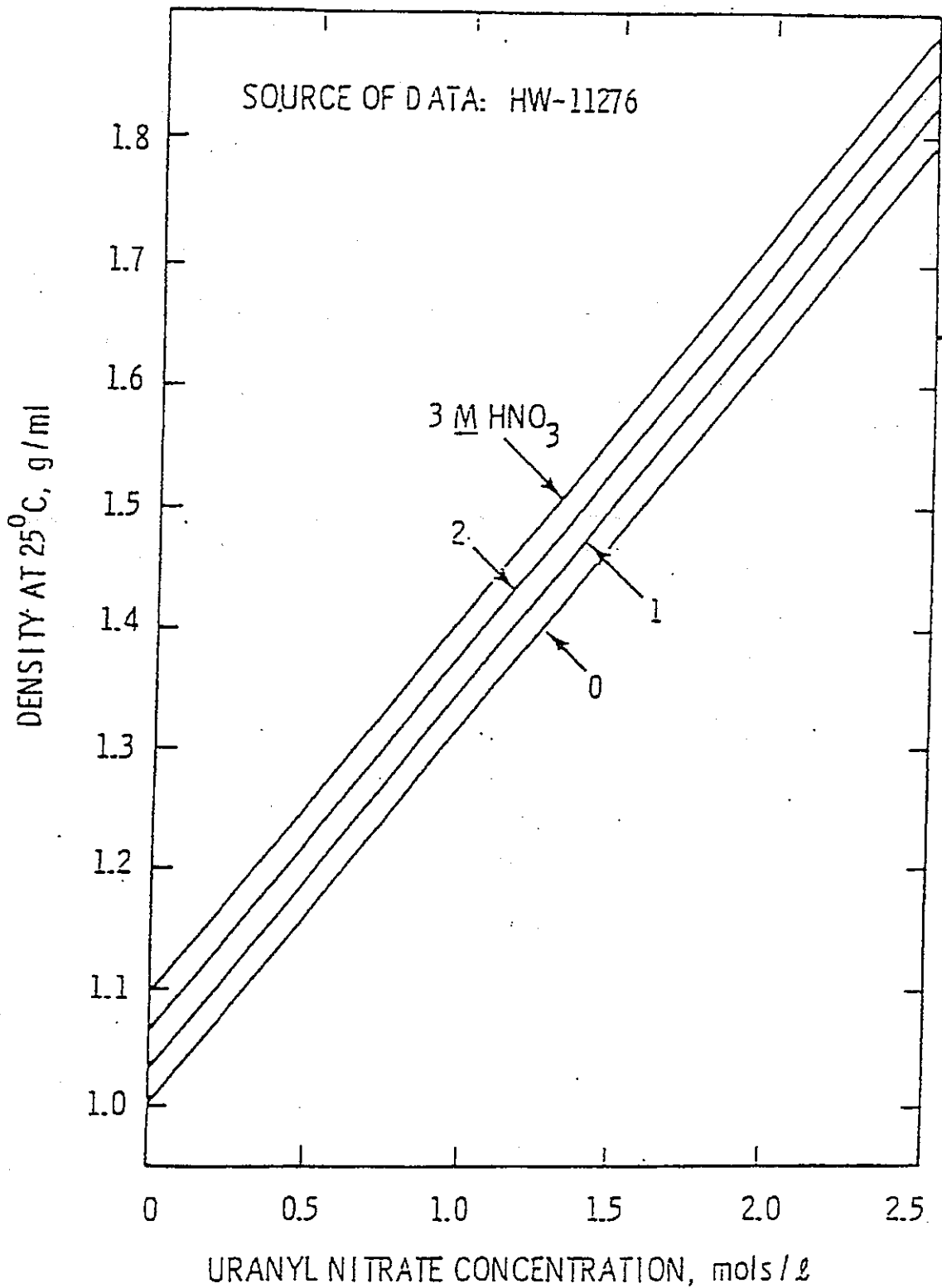
HW-31000 及び RHO-MA-116 に 25°C における $UO_2(NO_3)_2$ 硝酸溶液の粘度式が記載されている。

$$\log_{10} \eta = 0.9527 + 0.2426 \times M_U + 0.0100 M_U^2 + (0.0089 - 0.0023 M_U) M_H$$

..... (式 5.4.1-15)

- η : 粘度 (millipoise)
- M_U : $UO_2(NO_3)_2$ 濃度 (mol/L)
- M_H : HNO_3 濃度 (mol/L)

上記の式によると、1.35M $UO_2(NO_3)_2$ 、2.0M HNO_3 (25°C) で 20.4 millipoise となる。



RCP7908-143

Effect of Nitric Acid Concentration on Density of Uranyl Nitrate Solutions.

図5.4.1-1 硝酸ウラニル溶液濃度と溶液密度の関係

5.4.2 模擬溶液の選定

溶液の基礎物性である密度と粘性は、本件において評価対象としている、エアリフトポンプによる溶液の送液特性及び送液精度評価に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

そこで、本モックアップ試験で使用する溶液は、上記の物性値（密度及び粘性）を、実際にPu転換技術開発施設内で使用している硝酸ウラニル溶液及び硝酸プルトニウム溶液の物性値に近づける必要がある。

(1) 密度

硝酸ウラニル溶液及び硝酸プルトニウム溶液の密度は約 1.5 g/cm^3 と比較的大きく、エアリフトにより送液を行う場合には、溶液の物性の中でも、溶液密度は送液挙動に大きな影響を与えることが予想される。そこで、モックアップ試験では、水に何らかの化合物を溶解させ、その溶液比重を模擬することとした。

無機塩水溶液の密度表を表5.4.2-1に示す。

そこで、本試験では、溶液密度 1.5 g/cm^3 を達成すべく、溶解させる化合物を以下の観点から検討した。

- ① 作業員の皮膚への付着、吸入、飲み込み等に対して安全であること。
- ② 水溶液にした場合、ほぼ中性であること。
- ③ 廃棄上問題とならないこと。
- ④ 特別な措置を施さなくても、保管中に空気中で化学反応等により自然発火等を起こさないこと。

検討の結果、上記の①～④の条件及び溶液比重 1.5 g/cm^3 を満足するのに適切な化合物は見あたらなかった。そこで、目標とする溶液比重 1.3 g/cm^3 として再度検討を行った結果、塩化カルシウム(CaCl_2)が最適であると判断し、採用することとした。

使用したフレーク状の塩化カルシウム粉末の写真を図5.4.2-1に示す。

塩化カルシウムを水に混合することにより、最大 1.39 g/cm^3 までの溶液比重が実現可能である（ 25°C における水への飽和溶解度、40wt%で比重 1.3927 g/cm^3 ）が、本試験の試験パラメータ範囲としては $1.0 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$ 程度とした。

上記の検討により、本コールド試験で、 1.5 g/cm^3 の溶液比重を模擬すること

は不可能であるので、既存設備のモックアップ試験では、先ず、溶液密度 1.0g/cm^3 で送液試験を実施する。また、5.5 項に示すパラメータ試験では、 $1.0 \sim 1.3 \text{g/cm}^3$ の範囲で試験を行い、溶液密度が送液精度に与える影響について検討する。

(2) 粘度

溶液密度の選定と同時に、溶液粘度の検討も実施する必要があると考えられるが、本件では以下の理由により、粘度については模擬は行わず、その物性測定に留めることとした。

- ① モックアップ装置と実機では装置構成材料が異なること
- ② ①の理由により、モックアップと実機では濡れ性が異なること
- ③ 実際の溶液を使わずに、溶液密度も粘度も同時に合わせることは不可能であること

日本化学会編・化学便覧基礎編Ⅱのデータから外挿により求めた、塩化カルシウム水溶液の密度と粘度の関係を表 5.4.2-2 に示す。

表 5.4.2-3 に旭硝子株式会社の商品カタログから抜粋した塩化カルシウム水溶液の溶液表を示す。

表 5.4.2-2 塩化カルシウム水溶液の密度と粘度の関係

溶液の塩含有量	溶液密度	粘度 (at 20°C)
0	1.00g/cm^3	1.00 mPa s
11.5%	1.10g/cm^3	1.21 mPa s
21.9%	1.20g/cm^3	2.15 mPa s
31.2%	1.30g/cm^3	3.98 mPa s

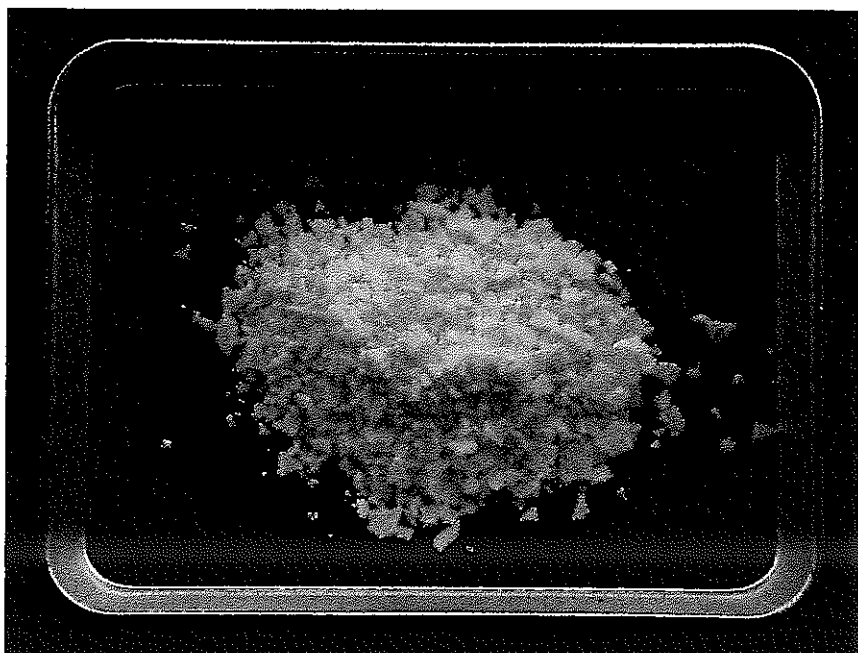


図5.4.2-1 溶液密度調整用塩化カルシウム粉末

表5.4.2-1 無機塩水溶液の密度表 (その1)

c. 無機塩水溶液の密度 (別記しない限り 25°C の値)

無機塩水溶液¹⁾ (密度の単位は g cm^{-3}) (1)

AgNO ₃		2	1.0167	8	1.0686	14	1.1180	40	1.4866	2	1.015 ₀
wt %		4	.0370	10	.0880	16	.1366			4	.033 ₅
0.2	0.9988	6	.0580	20	.1963	18	.1557			6	.052 ₅
0.4	1.0006	Al ₂ (SO ₄) ₃		30	.3263	20	.1753	CdCl ₂			
0.6	.0023	wt %		40	.486	25	.2260	2	1.0146	Co(NO ₃) ₂	
0.8	.0040	1	1.0069	50	.694	30	.2790	4	.0325	wt %	
1	.0057	2	.0167	60	.965	35	.3345	6	.0509	1	1.005 ₄
2	.014	4	.0370	Ba(NO ₃) ₂		40	.3927	8	.0699	2	.013 ₅
4	.031	6	.0580	wt %		CaI ₂		10	.0895	4	.030 ₄
6	.049	BaBr ₂		2	1.0151	wt %		12	.1098	6	.047 ₅
8	.067	2	1.0143	4	.0320	2	1.0138	14	.1307	8	.064 ₈
10	.086	4	.0321	6	.0494	4	.0309	16	.1522	CoSO ₄	
12	.105	6	.0505	8	.0674	6	.0485	18	.1743	wt %	
14	.125	8	.0695	BaSO ₄		8	.0668	20	.1970	1	1.0072
16	.146	10	.0892	wt %		10	.0857	25	.2580	2	.0174
18	.168	20	.1985	1	1.0058	20	.1906	30	.3246	4	.0380
20	.191	30	.3299	2	.0147	30	.3168	35	.3979	6	.0588
25	.252	40	.4893	3	.0237	40	.4700	40	.4797	8	.0800
30	.318	BaCl ₂		4	.0327	Ca(NO ₃) ₂		45	.5706	CrCl ₂ (18°C)	
35	.390	wt %		5	.0417	wt %		50	.6719	wt %	
40	.469	2	1.0147	CaBr ₂		2	1.0120	CdI ₂		mol dm ⁻³	
45	.55	4	.0328	2	1.0139	4	.0272	2	1.0141	0.067	1.0081
50	.66	6	.0514	4	.0312	6	.0427	4	.0314	0.167	.0221
55	.77	8	.0706	6	.0489	8	.0585	6	.0492	0.33	.0446
60	.91	10	.0905	8	.0672	10	.0746	8	.0675	0.67	.0888
65	2.06	12	.1111	10	.0860	12	.0911	10	.0863	1	.1316
70	.228	14	.1325	20	.1897	14	.1079	20	.1917	Cr(NO ₃) ₃ (18°C)	
AlCl ₃ (18°C)		16	.1546	30	.3099	16	.1250	30	.3194	mol dm ⁻³	
wt %		18	.1774	40	.453	18	.1424	40	.4767	0.033	1.0049
1	1.0075	20	.2010	50	.631	20	.1602	Cd(NO ₃) ₂ (18°C)		0.067	.0111
2	.0164	22	.2255	CaCl ₂		25	.2065	mol dm ⁻³		0.167	.0298
4	.0344	24	.2508	wt %		CdBr ₂		0.05	1.0084	0.33	.0605
6	.0526	26	.2769	2	1.0135	wt %		0.1	.0180	0.67	.1212
8	.0711	BaI ₂		4	.0302	2	1.0146	0.25	.0468	1	.1806
10	.0900	2	1.0142	6	.0471	4	.0326	0.5	.0943	CsBr	
12	.1093	4	.0318	8	.0643	6	.0510	1	.1887	wt %	
14	.1290	6	.0499	10	.0818	8	.0700	2	.3718	1	1.0049
16	.1491	Al(NO ₃) ₃		12	.0997	10	.0895	CoCl ₂		2	.0129
wt %		2	1.0142	CaCl ₂		20	.1979	wt %		4	.0292
1	1.0069	4	.0318	wt %		30	.3259	1	1.006 ₀	6	.0460
		6	.0499								

1) "International Critical Tables", Vol. III, p. 54-95, McGraw-Hill (1928).

表5.4.2-1 無機塩水溶液の密度表 (その2)

無機塩水溶液 (密度の単位は $g\ cm^{-3}$) (2)

8	1.0633	2	1.015 ₉	25	1.2689	2	1.0078	2	1.0112	70	1.4307
10	.0811	4	.034 ₆	30	.3347	4	.0187	4	.0251	KNO ₂ (17.5 °C)	
20	.1798	6	.054	35	.4085	6	.0298	6	.0388	8	.0527
30	.2974	8	.073 ₆	40	.4873	K ₂ CO ₃		8	.0569	10	.0669
40	.4399	10	.093 ₃	HgCl ₂		10	.0887	10	.0818	12	.0818
50	.6161	12	.114 ₅	wt %		14	.1272	14	.0981	14	.0981
CsCl		14	.135 ₇	1	1.0053	1	1.0060	KHSO ₄		1	1.005
wt %		16	.157 ₅	2	.0138	2	.0149	1	1.0039	2	.011
1	1.0047	18	.179 ₇	3	.0223	4	.0330	2	.0107	4	.024
2	.0125	20	.203	4	.0310	6	.0513	4	.0245	6	.037
4	.0284	Cu(NO ₃) ₂		5	.0397	10	.0887	6	.0386	8	.049
6	.0447	wt %		KBr		14	.1877	8	.0530	10	.062
8	.0615	1	1.005 ₀	wt %		20	.2297	10	.0677	20	.130
10	.0788	2	.012 ₈	1	1.0042	24	.2953	12	.0827	30	.203
12	.0967	4	.029 ₇	2	.0114	30	.3953	14	.0980	40	.284
14	.1151	6	.047 ₅	4	.0251	40	.5374	16	.1136	50	.378
16	.1340	8	.065 ₅	6	.0412	K ₂ CrO ₄ (18 °C)		KI		1	1.0032
18	.1536	CuSO ₄		8	.0566	wt %		1	1.0043	2	.0095
20	.1739	wt %		10	.0724	1	1.0066	2	.0117	4	.0220
22	.1948	1	1.007 ₃	12	.0886	2	.0147	4	.0268	6	.0348
24	.2185	2	.017 ₆	14	.1052	4	.0311	6	.0422	8	.0478
26	.2409	4	.038 ₇	16	.1223	6	.0477	8	.0581	10	.0609
28	.2641	6	.060 ₂	18	.1399	8	.0647	10	.0745	12	.0743
30	.2882	8	.082 ₅	20	.1579	10	.0821	12	.0913	14	.0880
35	.3522	10	.105 ₄	22	.1766	20	.1748	14	.1086	16	.1018
40	.4225	12	.128 ₉	24	.1957	30	.2784	16	.1265	18	.1160
45	.4999	FeCl ₂ (18 °C)		26	.2154	K ₂ Cr ₂ O ₇ (20 °C)		18	.1449	20	.1303
50	.5858	mol dm ⁻³		28	.2357	wt %		22	.1638	22	.1450
55	.6814	0.25	1.0264	30	.2566	1	1.0052	24	.1834	24	.1599
60	.7886	0.5	.0536	35	.3117	2	.0122	26	.2037	K ₂ SO ₄	
65	.9097	1	.1069	40	.3715	4	.0264	28	.2246	1	1.0051
CsI		1.5	.1594	KBrO ₃		6	.0408	30	.2462	2	.0132
wt %		2	.2105	wt %		8	.0554	35	.3279	4	.0296
1	1.0049	FeCl ₃		1	1.0044	10	.0703	40	.3927	6	.0462
2	.0128	wt %		2	.0119	K ₃ [Fe(CN) ₆]		45	.4637	8	.0630
4	.0290	1	1.005 ₃	3	.0194	wt %		50	.5420	10	.0800
6	.0457	2	.013 ₇	4	.0270	1	1.002 ₄	KIO ₃		1	1.0078
8	.0629	4	.030 ₉	5	.0346	2	.007 ₆	1	1.0057	2	.0175
10	.0807	6	.047 ₈	KCl		4	.018 ₈	2	.0144	3	.0272
20	.1792	8	.065 ₃	wt %		6	.030 ₀	3	.0232	4	.0370
30	.2969	10	.083 ₅	1	1.0034	8	.041 ₃	KMnO ₄		5	.0469
40	.4404	12	.102 ₁	2	.0098	10	.052 ₆	1	1.0037	6	.0569
50	.6190	14	.121 ₂	4	.0226	K ₄ [Fe(CN) ₆]		2	.0104	LiBr	
CsNO ₃		16	.140 ₂	6	.0354	wt %		3	.0172	1	1.0043
wt %		18	.160 ₂	8	.0485	1	1.003 ₉	4	.0240	2	.0116
1	1.0045	20	.180 ₃	10	.0617	2	.010 ₆	5	.0309	4	.0264
2	.0119	25	.232 ₀	12	.0751	4	.024 ₂	6	.0379	6	.0416
4	.0273	35	.350 ₅	14	.0887	6	.037 ₆	KNCS		8	.0572
6	.0430	40	.414 ₅	16	.1025	8	.051 ₄	1	1.1899	10	.0731
8	.0592	Fe ₂ (SO ₄) ₃ (18 °C)		18	.1165	10	.065 ₃	2	.2200	20	.1599
10	.0758	wt %		20	.1307	KHCO ₃		3	.2517	30	.2608
Cs ₂ SO ₄		1	1.0066	22	.1452	wt %		4	.2849	40	.3812
wt %		2	.0156	24	.1600	1	1.0038	5	.3195	50	.5288
1	1.0050	4	.0346	26	.1750	2	.0106	6	.3554	60	.7160
2	.0132	6	.0554	KClO ₃		4	.0241	KNCS		LiCl	
4	.0304	8	.0754	wt %		KH ₂ PO ₄		1	1.0029	1	1.0029
6	.0480	10	.0954	1	1.0034	1	1.0042	2	.0087	2	.0087
8	.0661	12	.1164	2	.0099			35	1.1899		
10	.0856	14	.1382	3	.0165			40	.2200		
20	.1897	16	.1602	4	.0233			45	.2517		
CuCl ₂		18	.1822	KCN				50	.2849		
wt %		20	.2061	wt %				55	.3195		
1	1.006 ₂			1	1.0024			60	.3554		
								65	.3925		

日本化学会編「改定3版 化学便覧 基礎編II」より

表5.4.2-1 無機塩水溶液の密度表 (その3)

無機塩水溶液 (密度の単位は $g\ cm^{-3}$) (3)

4	1.0202	4	1.0298	4	1.0364	2	1.0176	12	1.0969	8	1.0850
6	.0316	6	.0463	6	.0569	4	.0381	14	.1154	10	.1083
8	.0430	8	.0631	8	.0780	6	.0588	16	.1344		
10	.0545	10	.0801	10	.0998	8	.0797	18	.1541	Na ₃ P ₂ O ₇ (20°C)	
12	.0660	12	.0974	12	.1224	10	.1008	20	.1745	wt %	
14	.0777	14	.1149	14	.1458	12	.1223	22	.1957	1	1.009
16	.0894	16	.1326	16	.1699	14	.1442	24	.2146	2	.019
18	.1013	18	.1506	18	.1948			26	.2370	3	.028
20	.1134	20	.1689			NaH ₂ AsO ₄		28	.2603	4	.037
22	.1257	25	.2167	Na ₂ B ₄ O ₇ (15°C)		wt %		30	.2844		
24	.1383	30	.2671	wt %		1	1.0050	35	.3487	Na ₂ S	
26	.1512			1	1.0084	2	.0129	40	.4195	wt %	
28	.1643	MgI ₂		2	.0179	4	.0291	45	.4980	1	1.0098
30	.1777	wt %		3	.0274	6	.0457	50	.5853	2	.0211
35	.2127	2	1.0137	NaBr		8	.0626	55	.6832	4	.0440
40	.2500	4	.0307	wt %		10	.0798	60	.7937	6	.0672
45	.2898	6	.0483	1	1.0048	12	.0974			8	.0907
		8	.0665	2	.0126	14	.1153	NaNCS (18°C)		10	.1146
		10	.0854	4	.0284	NaHCO ₃ (18°C)		wt %		12	.1388
		20	.1900	6	.0447	wt %		1	1.0038	14	.1634
		30	.3156	8	.0613	1	1.0059	2	.0090	16	.1885
		40	.4702	10	.0785	2	.0132	4	.0196	18	.2140
				12	.0951	4	.0280	6	.0303	Na ₂ SO ₃	
		Mg(NO ₃) ₂		14	.1142	5	.0429	8	.0411	wt %	
		2	1.0119	16	.1329	Na ₂ HPO ₄ (18°C)		10	.0520	1	1.0078
		4	.0271	18	.1522	wt %		20	.1081	2	.0172
		6	.0426	20	.1721	1	1.009	30	.1677	4	.0363
		8	.0589	22	.1925	2	.020	40	.2280	6	.0556
		10	.0755	24	.2136	3	.031	NaNO ₂ (20°C)		8	.0751
		20	.1668	26	.2354	4	.043	wt %		10	.0948
		30	.2747	28	.2579	5	.055	1	1.005	12	.1146
		40	.4049	30	.2811	6	.067	2	.011	14	.1346
		50	.5657	35	.3428	NaH ₂ PO ₄		4	.024	15	.1549
		60	.7705	40	.4102	wt %		6	.038	18	.1755
						1	1.0045	8	.052	Na ₂ SO ₄	
		LiNO ₃				2	.0120	10	.065	wt %	
		1	1.0029			4	.0270	20	.137	1	1.0061
		2	.0087			6	.0422	NaNO ₃		2	.0151
		4	.0205			8	.0572	wt %		4	.0332
		6	.0326			10	.0730	1	1.0037	6	.0515
		8	.0448			NaHSO ₄		2	.0104	8	.0701
		10	.0572			wt %		4	.0239	10	.0890
		20	.1230			1	1.0047	6	.0376	12	.1083
		30	.1959			2	.0124	8	.0515	14	.1279
		40	.2804			4	.0279	10	.0656	16	.1479
						6	.0435	12	.0799	18	.1683
		Li ₂ SO ₄				8	.0593	14	.0945	20	.1890
		1	1.0056			10	.0753	16	.1094	22	.2102
		2	.0142			12	.0915	18	.1246	24	.2318
		4	.0316			14	.1079	20	.1402	Na ₂ S ₂ O ₃ (20°C)	
		6	.0491			16	.1245	22	.1561	wt %	
		8	.0669			18	.1413	24	.1723	1	1.0065
		10	.0848			20	.1583	26	.1888	2	.0148
						22	.1755	28	.2055	4	.0315
		MgBr ₂				NaI		30	.2225	6	.0483
		2	1.0139			wt %		35	.2668	8	.0654
		4	.0311			1	1.0047	40	.3140	10	.0827
		6	.0487			2	.0125	45	.3646	20	.1740
		8	.0668			4	.0284	Na ₃ PO ₄ (15°C)		30	.2739
		10	.0855			6	.0448	wt %		40	.3827
		20	.1885			8	.0616	1	1.0087	NH ₄ Br	
		30	.3089			10	.0790	2	.0194	wt %	
		40	.450					4	.0405	1	1.0027
								6	.0624		

日本化学会編「改定3版 化学便覧 基礎編II」より

表5.4.2-1 無機塩水溶液の密度表 (その4)

表 5-12 無機塩水溶液 (密度の単位は g cm^{-3}) (4)

2	1.0084	2	1.0051	PbCl ₂ (18 °C)		RbI		4	1.0306	TiNO ₃		
4	.0198	4	.0132	wt %		wt %		6	.0469	wt %		
6	.0314	6	.0214	0.1	0.9995	1	1.0047	8	.0634	1	1.0056	
8	.0432	8	.0297	.2	1.0005	2	.0125	10	.0802	2	.0142	
10	.0552	10	.0380	.3	.0014	4	.0283	12	.0974	3	.0230	
20	.1191	12	.0464	.4	.0023	6	.0446	14	.1150	4	.0319	
30	.1901	14	.0548	.5	.0032	8	.0615	16	.1331	5	.0409	
40	.2702	16	.0633	.6	.0041	10	.0788	18	.1516	6	.0501	
NH ₄ Cl			18	.0719	.7	.0051	20	.1745	20	.1706	7	.0594
wt %		20	.0806	.8	.0060	30	.2880	22	.1901	Ti ₂ SO ₄		
1	1.0002	22	.0894	.9	.0069	40	.4248	SrBr ₂		wt %		
2	.0033	24	.0982	Pb(NO ₃) ₂		45	.5043	2	1.0145	1	1.0054	
4	.0093	26	.1095	wt %		50	.5928	4	.0324	2	.0158	
6	.0153	28	.1186	1	1.0058	55	.6920	6	.0508	3	.0253	
8	.0212	30	.1277	2	.0146	RbNO ₃		8	.0697	4	.0348	
10	.0270	35	.1512	4	.0325	wt %		10	.0891	UO ₂ (NO ₃) ₂		
12	.0327	40	.1754	6	.0509	1	1.0042	20	.1971	wt %		
14	.0383	45	.2003	8	.0699	2	.0113	30	.327	1	1.0037	
16	.0439	50	.2258	10	.0896	4	.0258	40	.486	2	.0104	
18	.0494	(NH ₄) ₂ SO ₄		12	.1100	6	.0407	SrCl ₂		4	.0242	
20	.0549	wt %		14	.1311	8	.0559	wt %		6	.039	
22	.0603	1	1.0030	16	.1531	10	.0715	2	1.0149	8	.055	
24	.0657	2	.0089	18	.1762	20	.1560	4	.0311	10	.072	
NH ₄ ClO ₄			4	.0207	20	.2002	30	.2523	6	.0518	12	.091
wt %		6	.0324	8	.0441	22	.2248	Rb ₂ SO ₄		8	.0711	
1	1.0018	8	.0441	10	.0558	24	.2498	wt %		14	.111	
2	.0065	10	.0558	12	.0675	26	.2750	1	1.0054	16	.132	
4	.0160	12	.0675	14	.0791	28	.3002	2	.0138	18	.154	
6	.0257	16	.0907	16	.0907	30	.3254	4	.0309	20	.177	
8	.0355	18	.1022	18	.1022	RbBr		6	.0485	22	.201	
10	.0455	20	.1136	20	.1136	wt %		8	.0664	24	.226	
12	.0557	22	.1250	22	.1250	1	1.0047	10	.0848	26	.251	
14	.0660	24	.1364	24	.1364	2	.0125	20	.1844	28	.277	
(NH ₄) ₂ Fe(SO ₄) ₂			26	.1477	4	.0283	30	.3006	25	.258	30	.304
wt %		28	.1589	6	.0446	SnCl ₂ (15 °C)		30	.322	34	.360	
1	1.005	30	.1701	8	.0614	wt %		35	.393	40	.455	
2	.013	35	.1980	10	.0787	1	1.0068	Srl ₂		44	.524	
4	.029	40	.2257	20	.1736	2	.0146	wt %		50	.630	
6	.045	45	.2532	30	.2854	4	.0306	2	1.0142	ZnBr ₂		
8	.062	50	.2805	40	.4192	6	.0470	4	.0318	wt %		
10	.080	NiCl ₂		50	.5822	8	.0638	6	.0499	2	1.0154	
12	.098	wt %		RbCl		10	.0810	8	.0586	4	.0340	
14	.116	1	1.0060	wt %		12	.0986	10	.0880	6	.0529	
NH ₄ NCS			2	.015 ₂	1	1.0044	14	.1167	20	.1967	8	.0721
wt %		4	.034 ₅	2	.0118	2	.0118	16	.1353	30	.3267	
30	1.0645	6	.054 ₅	4	.0269	4	.0424	18	.1545	40	.4869	
32	.0887	Ni(NO ₃) ₂		6	.0424	6	.0424	20	.1743	30	.3139	
34	.0730	wt %		8	.0582	8	.0582	22	.1948	40	.458	
36	.0774	1	1.005 ₅	10	.0745	10	.0745	24	.2159	50	.638	
38	.0818	2	.014 ₁	12	.0912	12	.0912	26	.2377	60	.864	
40	.0863	4	.031 ₅	14	.1083	14	.1083	28	.2603	ZnCl ₂		
42	.0910	6	.049 ₄	16	.1260	16	.1260	30	.2837	wt %		
44	.0958	8	.067 ₅	18	.1441	18	.1441	35	.3461	2	1.0154	
46	.1007	10	.085 ₀	20	.1627	20	.1627	40	.4145	4	.0335	
48	.1057	20	.18 ₆	22	.1819	22	.1819	45	.4897	6	.0515	
50	.1108	30	.30 ₄	24	.2017	24	.2017	50	.5729	8	.0696	
52	.1161	NiSO ₄		26	.2220	26	.2220	55	.6656	10	.0878	
54	.1214	wt %		28	.2430	28	.2430	60	.7695	12	.1063	
56	.1268	1	1.007 ₃	30	.2646	30	.2646	65	.8865	14	.1251	
58	.1322	2	.017 ₇	35	.3215	35	.3215	ThCl ₄ (18 °C)		16	.1442	
NH ₄ NO ₃			4	.038 ₃	40	.3832	40	.3832	mol dm ⁻³	18	.1638	
wt %		6	.061 ₀	45	.4502	45	.4502	0.125	1.0421	20	.1836	
1	1.0011	SnCl ₄ (18 °C)		50	.5293	50	.5293	0.25	.0853	25	.2348	
		wt %				wt %		0.5	.1704	30	.2894	
						1	1.0065	0.75	.2540			
						2	.0145	1	.3919			

表5.4.2-3 塩化カルシウム溶液表

15℃		溶液の塩 含有量%	水100kgに対す る塩含有量kg	凍結 点 ℃	溶液の比熱
比 重	ボ-メ度				
1.00	0.1	0.1	0.1	- 0.0	1.003
1.01	1.6	1.3	1.3	- 0.6	0.986
1.02	3.0	2.5	2.6	- 1.2	0.968
1.03	4.3	3.6	3.7	- 1.8	0.950
1.04	5.7	4.8	5.0	- 2.4	0.932
1.05	7.0	5.9	6.3	- 3.0	0.915
1.06	8.3	7.1	7.6	- 3.7	0.899
1.07	9.6	8.3	9.0	- 4.4	0.882
1.08	10.8	9.4	10.4	- 5.2	0.866
1.09	12.0	10.5	11.7	- 6.1	0.851
1.10	13.2	11.5	13.0	- 7.1	0.836
1.11	14.4	12.6	14.4	- 8.1	0.822
1.12	15.6	13.7	15.9	- 9.1	0.808
1.13	16.7	14.7	17.3	-10.2	0.795
1.14	17.8	15.8	18.8	-11.4	0.782
1.15	18.9	16.8	20.2	-12.7	0.770
1.16	20.0	17.8	21.7	-14.2	0.758
1.17	21.1	18.9	23.3	-15.7	0.747
1.18	22.1	19.9	24.9	-17.4	0.737
1.19	23.1	20.9	26.5	-19.2	0.727
1.20	24.2	21.9	28.0	-21.2	0.717
1.21	25.1	22.8	29.6	-23.3	0.708
1.22	26.1	23.8	31.2	-25.7	0.700
1.23	27.1	24.7	32.9	-28.3	0.692
1.24	28.0	25.7	34.6	-31.2	0.685
1.25	29.0	26.6	36.2	-34.6	0.678
1.26	29.9	27.5	37.9	-38.6	0.671
1.27	30.8	28.4	39.7	-43.6	0.664
1.28	31.7	29.4	41.6	-50.1	0.658
1.286	32.2	29.9	42.7	-55.0	0.654
1.29	32.5	30.3	43.5	-50.6	0.651
1.30	33.4	31.2	45.4	-41.6	0.645
1.31	34.2	32.1	47.3	-33.9	0.639
1.32	35.1	33.0	49.3	-27.1	0.633
1.33	35.9	33.9	51.3	-21.2	0.627
1.34	36.7	34.7	53.2	-15.6	0.621
1.35	37.5	35.6	55.3	-10.2	0.616
1.36	38.3	36.4	57.4	- 5.1	0.610
1.37	39.1	37.3	59.5	- 0.0	0.604

「塩化カルシウム・カタログ（旭硝子株式会社）」より

5.5 送液特性把握試験

5.5.1 目的

送液特性把握試験では、プルトニウム転換技術開発施設で使用されているエアリフトポンプのモックアップ装置を使用して、エアリフトポンプに関する送液特性を把握することを目的として、溶液密度、圧縮空気流量及び真空度を試験パラメータにして送液試験を実施した。

5.5.2 試験条件の検討

試験実施に先立ち、送液特性に影響を与えると予想される各試験パラメータの検討を行った。

(1) 溶液密度

実際の硝酸プルトニウム溶液の密度は 1.5g/cm^3 程度であるが、本モックアップ試験では水に塩化カルシウムを溶解させることによって、 $1.00\sim 1.37\text{g/cm}^3$ の範囲で溶液密度を調整することが可能である。

送液挙動に対する溶液密度の影響を確認するために、本送液特性把握試験では、 1.0 、 1.1 、 1.2 及び 1.3g/cm^3 において検討を実施する。

(2) 真空度

既設工程の調査結果より、プルトニウム転換技術開発施設でエアリフトに使用されている真空系の真空度は $-0.035\text{MPa}\sim -0.040\text{MPa}$ であることが分かっている。この真空度は送液速度等の送液挙動、送液配管への溶液の滞留量等に大きな影響を与えることが予想される。

そこで、本検討では、上記の実機の運転条件を考慮し、実機の運転条件よりも少し広い範囲である $-0.030\text{MPa}\sim -0.045\text{MPa}$ で検討を実施することとする。

(3) 圧縮空気流量

送液挙動に対する圧縮空気流量の影響を確認するために、圧縮空気流量をパラメータとして送液試験を実施した。パラメータの範囲は、実機の運転条件を考慮し、 500 、 600 、 700 、 800 、 900 及び 1000NL/h において検討

を実施する。

(4) 送液量

送液量は以下の溶液条件より決定した。

① 硝酸プルトニウム溶液

Pu 濃度 : 208.3 g-Pu/L

硝酸濃度 : 6.8 mol/L

溶液密度 : 1.51g/cm³

② 硝酸ウラニル溶液

U 濃度 : 360 g-Pu/L

硝酸濃度 : 0.84 mol/L

溶液密度 : 1.51g/cm³

③ 混合溶液

全混合溶液量 : 200 L

Pu/U 比 : 3/7

ここで、

硝酸プルトニウム溶液量 : x リットル

硝酸ウラニル溶液量 : y リットル

とおけば、

$$x + y = 200$$

$$(208.3 \times x) / (360 \times y) = 3 / 7$$

より、

硝酸プルトニウム溶液量 : 85.1 L

硝酸ウラニル溶液量 : 114.9 L

となる。

プルトニウム転換施設の溶液混合工程では、先ず硝酸ウラニル溶液を混合槽に移送した後に、エアリフトポンプを使用して硝酸プルトニウム溶液を移送している。本モックアップ試験でも、この送液順序は変更しないこととし、上記の検討結果より、本モックアップ試験のエアリフトポンプで送液する溶液量は 85L とすることとする。

5.5.3 試験方法

送液試験は 5.2 項に示す試験装置を使用して実施した。測定に使用した超音波式変位センサー及びロードセルは 5.3 項に示す様に、予め校正を行い、測定に使用した。

試験方法手順を以下に示す。

(1) 送液開始前準備

- ① 超音波式液面計及びロードセルに通電を開始
(通電後 30 分以上経過した後に送液試験開始とした)
- ② 温度計で溶液温度を測定
- ③ 比重計にて溶液密度を測定
- ④ 送り側の槽（プルチウム貯槽模擬）及び受け側の槽（混合槽模擬）に所定量の溶液を装荷
試験開始前各槽内溶液量
送り側：～120L
受け側：～30L
- ⑤ コンプレッサーのスイッチを入れ、コンプレッサーの圧縮容器に圧縮空気を準備
- ⑥ データ測定・記録用 PC 及び測定用プログラムを起動

(2) 送液試験

- ① PC 操作にてデータ測定開始
- ② 各槽の初期装荷量の記録
- ③ 真空ポンプのスイッチを入れると同時に、送液ラインに所定流量の圧縮空気を流し、溶液の送液を開始する。
- ④ 真空ラインに設置してあるエアリークバルブを調節し、エアリフトセパレータ内の真空度を所定の真空度に調節する。
- ⑤ 受け槽の溶液量が所定量（85L）になった時点で、真空ポンプを停止するとともに圧縮空気の流量をゼロにする。
- ⑥ エアリフトセパレータ内部及び配管内部に残留した溶液が各槽にほぼ完全に流れ落ちた後に、各槽の送液後の溶液量を記録する。

- ⑦ PC 操作にて送液データを保存。

5.5.4 試験結果

(1) 溶液密度：1.0 g/cm³

溶液密度が 1.0 g/cm³にて、エアリフトセパレータ内部の真空度および圧縮空気流量をパラメータに試験を行った。

試験条件を表 5.5.4-1 に示す。

圧縮空気流量が 500 NL/h、真空度-0.030MPa の試験条件では、流量及び真空度が充分でなく送液ができなかったため、試験条件から削除した。

表 5.5.4-1 試験条件（溶液密度：1.0 g/cm³）

		圧縮空気流量 (NL/h)					
		500	600	700	800	900	1000
真空度 (MPa)	-0.030	-	○	○	○	○	○
	-0.035	○	○	○	○	○	○
	-0.040	○	○	○	○	○	○
	-0.045	○	○	○	○	○	○

各試験における、試験条件および試験結果を表 5.5.4-2 に示す。

溶液密度は 0.999~1.000g/cm³ の範囲、溶液温度は 22.5~25.0℃の範囲に保持されていたことが分かる。

送液停止（真空ポンプを OFF にし、圧縮空気流量を 0 NL/h にする）は、受け槽側の溶液量が所定量に（85L）なった時点で、作業員が手動操作にて行った。手動操作の為若干のばらつきがあるが、ほぼ一定値で停止操作を行うことができた。

本送液方法の特性上、送液開始時に配管出口部を溶液で塞いでおかなければ、エアリフトセパレータ内部の真空度が十分に上がらず送液ができなくなってしまう。そのため、送液前に受け槽にも予め 30L 程度の溶液を装荷した。

受け槽の溶液量はロードセルを使用して測定したが、送液開始前には送液

開始前の風袋（容器および送液前に装荷した溶液重量）を差し引き 0kg とした。

送液速度は、受け槽に送られた全溶液量（送液停止後に流れ込んだ溶液量を含む）を送液時間（送液開始から送液停止操作までの時間）で割って算出した。

溶液密度が $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ の場合の、送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化を添付資料に示す。

また、送液中の溶液の様子を図 5.5.4-1～図 5.5.4-11 に示す。写真の溶液の色が赤い理由は、写真撮影用に少量の水溶性赤インクを溶液に溶解させたためである。なお、実際の送液試験は、着色していない溶液で実施している。

送液開始直後に各槽の溶液量が急激に減少している。これは、送液ラインの真空度が上昇するにつれて、各槽内の溶液が配管中に吸い上げられるためである。

添付資料に示すの送液中のチャートを見ると、送液中は、ほぼ一定の送液速度で、溶液が安定して移送されていることが分かる。しかしながら、実際にエアリフトセパレータに流れ込む溶液は、図 5.5.4-6 に示す比較的大きな砲弾形気泡と、図 5.5.4-7 に示す比較的小さな気泡と溶液の混合流から構成され、数秒周期の断続流であることが確認されている。この挙動がチャートに現れてこないのは、エアリフトセパレータ部分にて、この脈動流が吸収・平滑化されてしまうためである。

さらに、送液開始直後よりも送液停止直前のほうが、送液速度が遅くなる傾向が認められている。これは、送り槽側の液面が下降することにより、送り槽側の配管内部に吸い上げられる溶液量が減少するためであると考えられる。

送液中の真空度の調節は、差圧伝送器からの真空度の支持値を見ながら、作業員が真空リークバルブを調節することにより実施した。そのため、真空度の調節時に、真空度に小さな乱れが生じており、それに伴い送液速度及び配管内滞留量にも変化が見られる。

送液停止時に、各槽の溶液量の急激な上昇が認められている。これは、送

液停止時に真空ポンプを停止させる為に、エアリフトセパレータ内部及び配管内部に滞留していた溶液が急激に各槽に流れ込んだことによる。

表5.5.4-2 試験条件及び試験結果 (溶液密度: 1.0 g/cm³)

試験条件				試験結果						
設定値		測定値		送り槽溶液量		受け槽溶液量		送液時間	送液速度	送液停止時
真空度	空気流量	溶液密度	溶液温度	送液前	送液後	送液前	送液後			受け槽溶液量
MPa	NL/h	g/cm ³	°C	L	L	L	L	min	L/min	L
-0.030	600	1.000	25.0	120.56	33.14	0	87.64	59.63	1.47	86.71
-0.030	700	0.999	24.5	119.89	32.17	0	87.74	42.77	2.05	86.14
-0.030	800	0.999	24.5	120.38	32.61	0	87.87	30.00	2.93	85.68
-0.030	900	0.999	22.5	120.18	32.21	0	88.03	26.10	3.37	85.17
-0.030	1000	0.999	22.5	120.13	32.17	0	87.87	21.75	4.04	85.22
-0.035	500	1.000	24.5	120.11	32.19	0	88.11	36.17	2.44	85.40
-0.035	600	1.000	24.5	120.55	33.01	0	88.07	25.00	3.52	84.58
-0.035	700	1.000	24.5	120.23	32.21	0	88.14	18.33	4.81	85.68
-0.035	800	1.000	24.5	119.96	31.80	0	88.27	15.58	5.66	85.15
-0.035	900	0.999	24.5	119.77	31.90	0	87.85	13.70	6.41	85.37
-0.035	1000	1.000	24.5	119.96	32.28	0	87.68	12.33	7.11	85.00
-0.040	500	0.999	22.5	120.28	31.40	0	88.62	18.00	4.92	85.39
-0.040	600	1.000	25.0	120.91	32.41	0	88.33	14.33	6.16	85.13
-0.040	700	1.000	25.0	120.28	31.35	0	88.86	11.58	7.67	85.97
-0.040	800	0.999	24.5	120.18	31.74	0	88.65	9.67	9.17	86.34
-0.040	900	1.000	22.5	120.28	30.57	0	89.68	8.05	11.14	86.38
-0.040	1000	1.000	22.5	120.13	31.54	0	88.69	8.08	10.97	85.48
-0.045	500	0.999	23.0	119.89	31.00	0	89.13	9.92	8.99	85.92
-0.045	600	0.999	23.0	119.94	31.20	0	89.06	8.25	10.80	85.52
-0.045	700	1.000	24.5	120.11	30.88	0	89.19	7.57	11.79	85.99
-0.045	800	0.999	22.5	120.13	30.62	0	89.59	6.83	13.11	84.87
-0.045	900	0.999	22.5	120.23	31.10	0	89.37	6.25	14.30	84.93
-0.045	1000	0.999	22.5	120.42	30.38	0	89.94	5.72	15.73	85.44

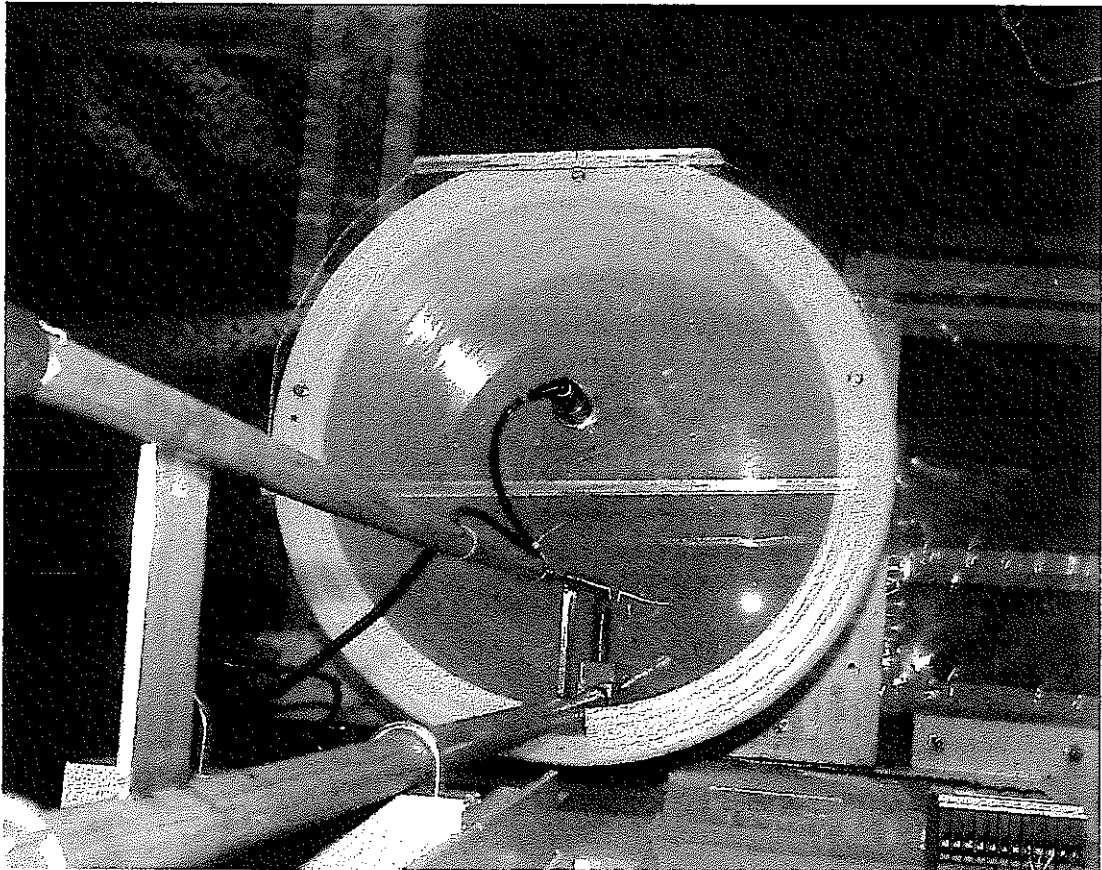


図5.5.4-1 送液中の模擬Pu貯槽（送り側槽）の様子
（溶液密度：1.0 g/cm³）



図5.5.4-2 送液中の模擬混合槽（受け側槽）の様子
(溶液密度：1.0 g/cm³)

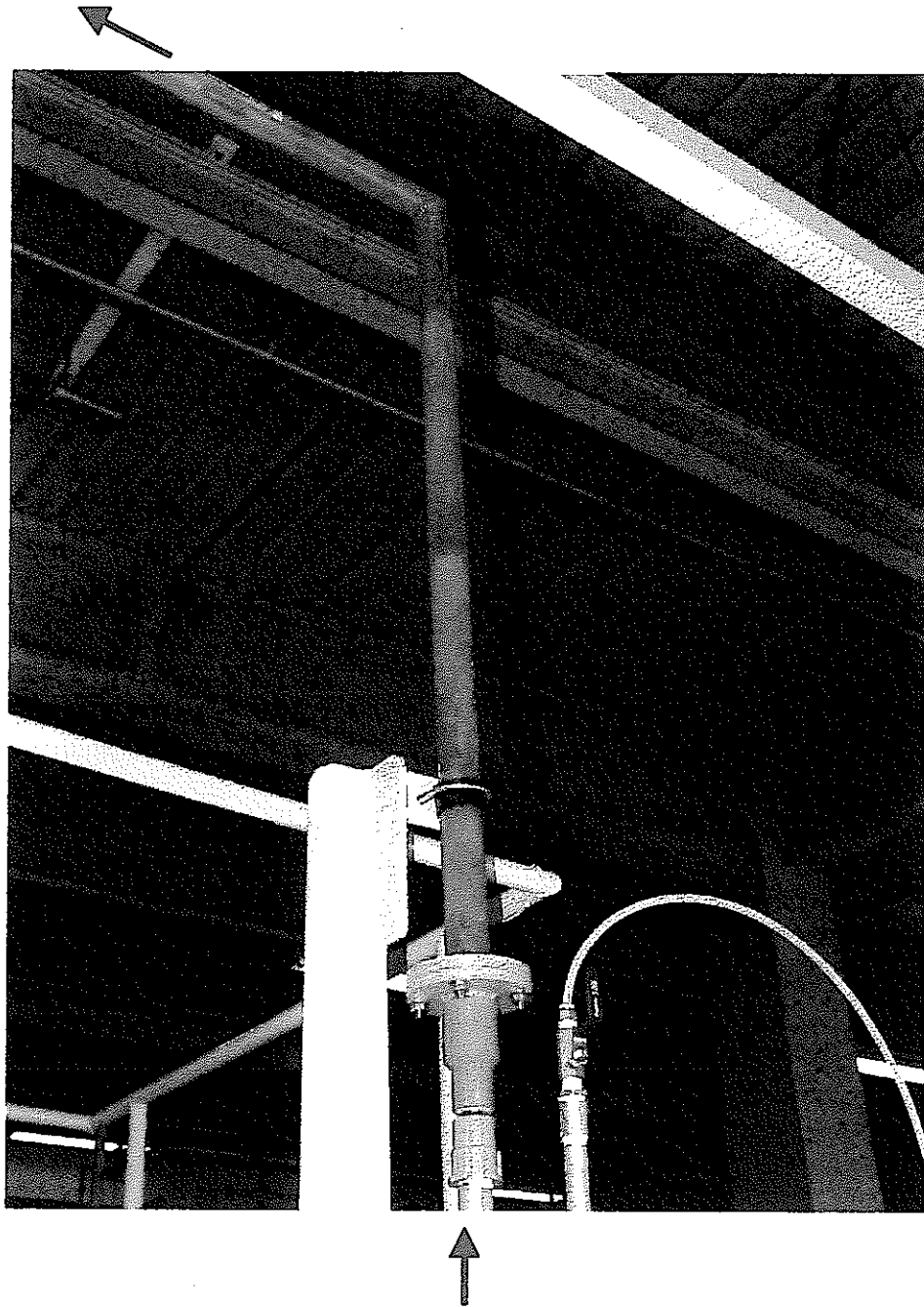


図5.5.4-3 送液中の配管内溶液の様子
(模擬Pu貯槽 (送り側槽) 上部)
(溶液密度: 1.0 g/cm^3)
(*写真撮影用に赤インクにて着色)

流れ方向 →

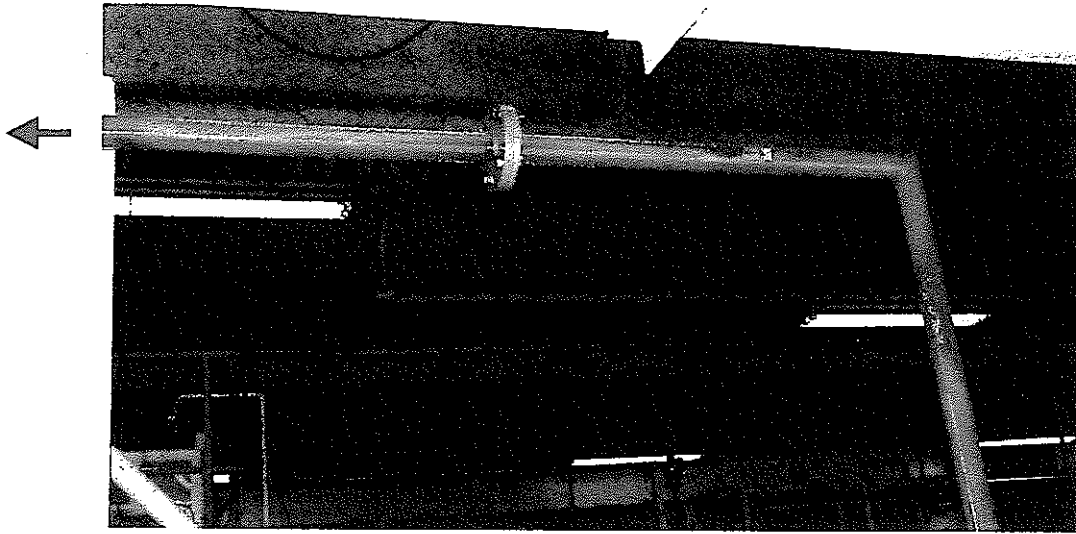


図5.5.4-4 送液中の配管内溶液の様子
(模擬Pu貯槽(送り側槽)上部)
(溶液密度: 1.0 g/cm^3)
(*写真撮影用に赤インクにて着色)

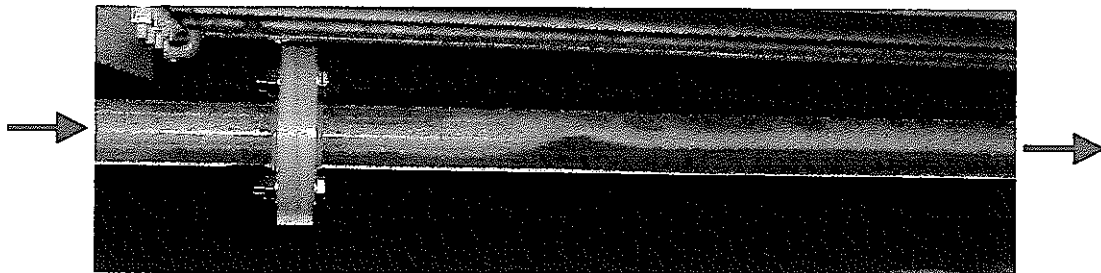
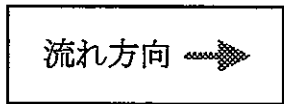


図5.5.4-5 送液中の配管内溶液の様子
(模擬Pu貯槽→エアリフトセパレータ間横配管)
(溶液密度: 1.0 g/cm^3)
(*写真撮影用に赤インクにて着色)



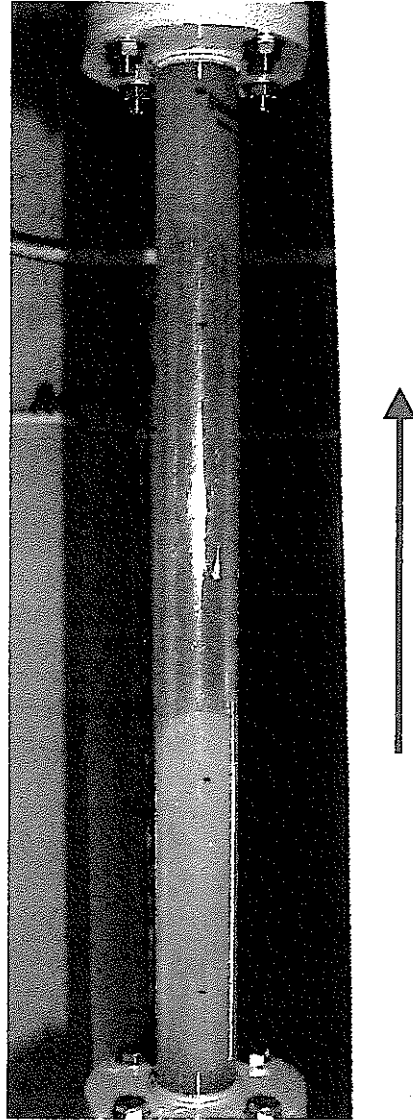


図5.5.4-6 送液中の配管内溶液の様子
(模擬Pu貯槽→エアリフトセパレータ間縦配管)
(溶液密度: 1.0 g/cm^3)
(*写真撮影用に赤インクにて着色)

流れ方向 →

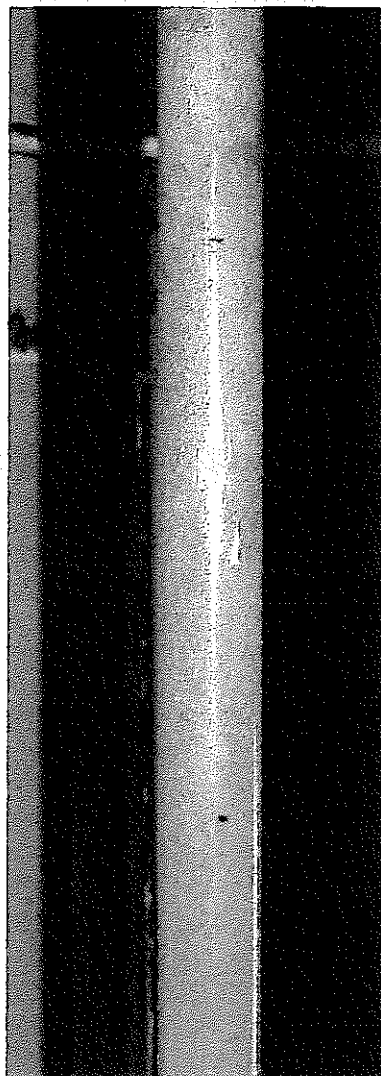
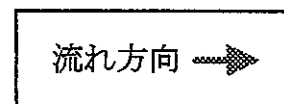


図5.5.4-7 送液中の配管内溶液の様子
(模擬Pu貯槽→エアリフトセパレータ間縦配管)
(溶液密度: 1.0 g/cm³)
(* 写真撮影用に赤インクにて着色)



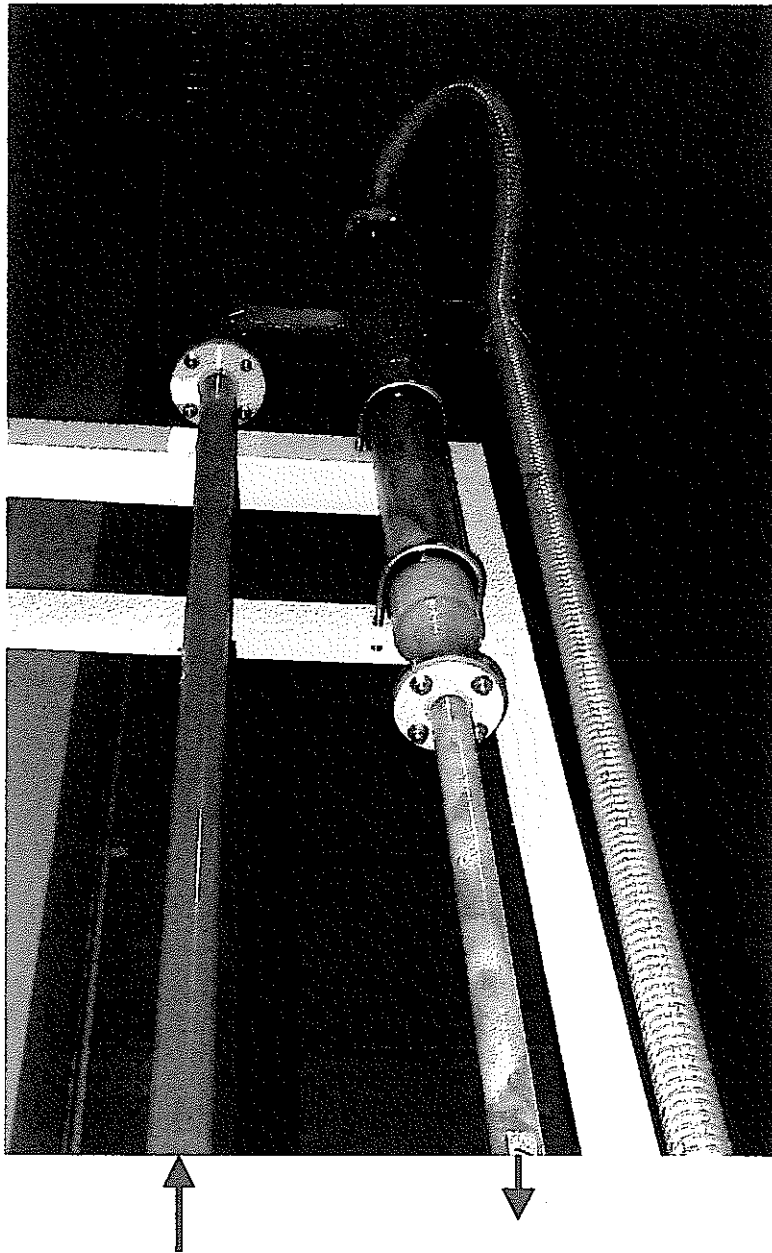


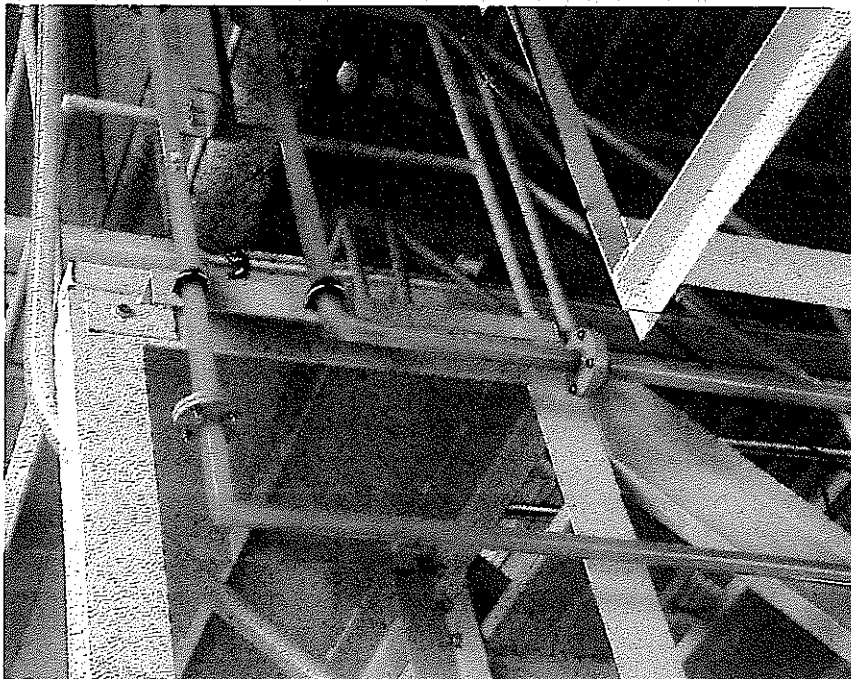
図5.5.4-8 送液中の配管内溶液の様子
(エアリフトセパレータ部分)
(溶液密度: 1.0 g/cm^3)
(*写真撮影用に赤インクにて着色)

流れ方向 →

エアリフトセパレータより



エアリフトセパレータへ



送り側槽より



受け側槽へ



図5.5.4-9 送液中の配管内溶液の様子
(エアリフトセパレータ下部)
(溶液密度: 1.0 g/cm³)
(*写真撮影用に赤インクにて着色)

流れ方向 →

エアリフトセパレータより

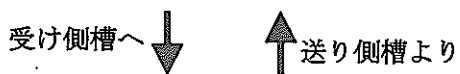
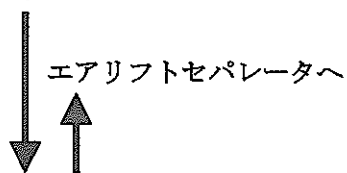


図5.5.4-10 送液中の配管内溶液の様子
(横配管部分)
(溶液密度: 1.0 g/cm^3)
(*写真撮影用に赤インクにて着色)



エアリフト
セパレータより

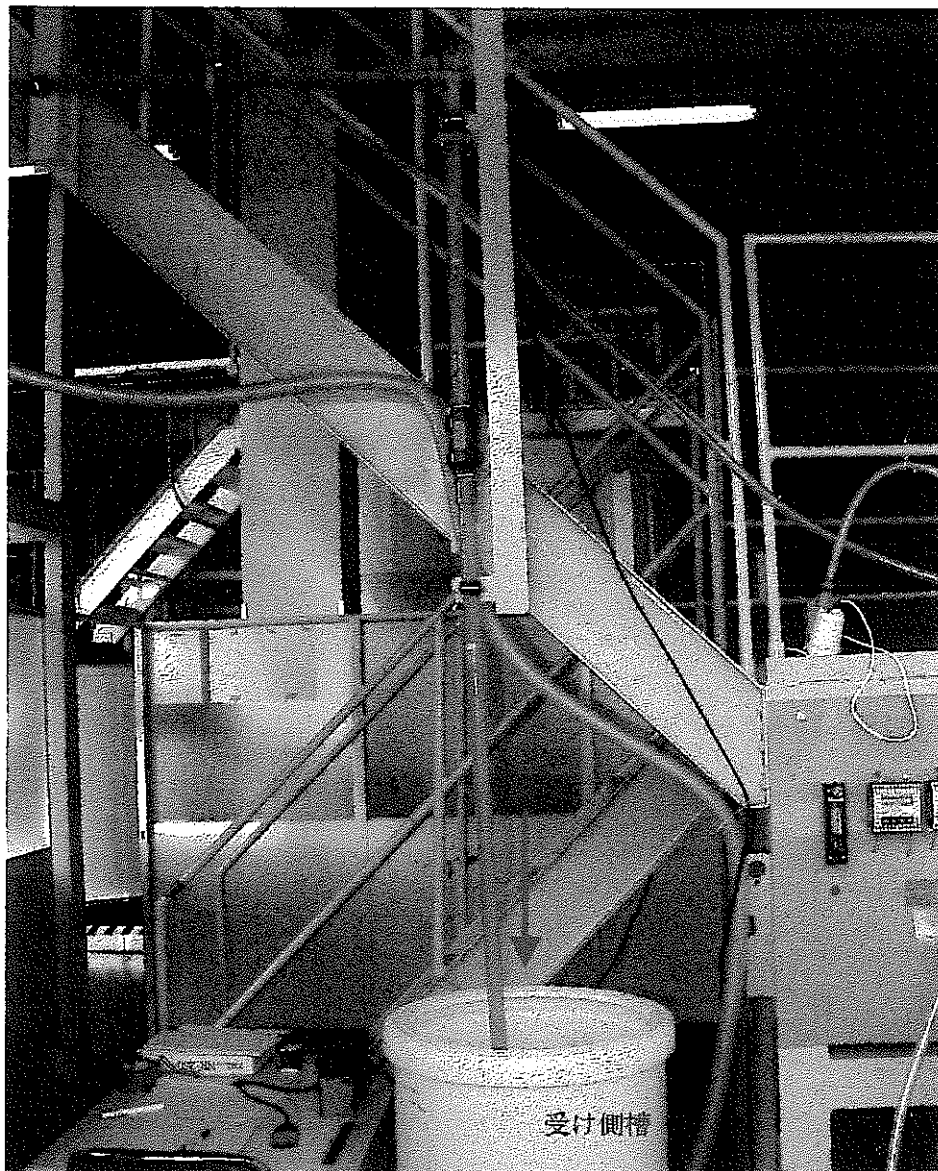
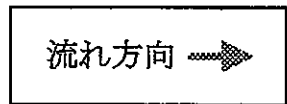


図5.5.4-11 送液中の配管内溶液の様子
(模擬混合槽 (受け側槽) 付近)
(溶液密度: 1.0 g/cm^3)
(*写真撮影用に赤インクにて着色)



(2) 溶液密度：1.1 g/cm³

溶液密度が 1.1 g/cm³にて、エアリフトセパレータ内部の真空度および圧縮空気流量をパラメータに試験を行った。

試験条件を表 5.5.4-3 に示す。本溶液密度では、実機の運転基本条件（圧縮空気流量が 700 NL/h、真空度-0.035MPa）にて、真空度または圧縮空気流量をパラメータにして表 5.5.4-3 に示す範囲で送液試験を実施した。

表 5.5.4-3 試験条件（溶液密度：1.1 g/cm³）

		圧縮空気流量 (NL/h)					
		500	600	700	800	900	1000
真空度 (MPa)	-0.030	-	-	○	-	-	-
	-0.035	○	○	○	○	○	○
	-0.040	-	-	○	-	-	-
	-0.045	-	-	○	-	-	-

各試験における、試験条件および試験結果を表 5.5.4-4 に示す。

溶液密度は 1.107~1.108g/cm³ の範囲、溶液温度は 21.5~24.5℃の範囲に保持されていたことが分かる。

送液停止（真空ポンプを OFF にし、圧縮空気流量を 0 NL/h にする）は、受け槽側の溶液量が所定量に（85L）なった時点で、作業員が手動操作にて行った。手動操作の為若干のばらつきがあるが、ほぼ一定値で停止操作を行うことができた。

本送液方法の特性上、送液開始時に配管出口部を溶液で塞いでおかなければ、エアリフトセパレータ内部の真空度が上がり送液ができなくなってしまう。そのため、送液前に受け槽にも予め 30L 程度の溶液を装荷した。受け槽の溶液量はロードセルを使用して測定したが、送液開始前には送液開始前の風袋（容器および送液前に装荷した溶液重量）を差し引き 0kg とした。

送液速度は、受け槽に送られた全溶液量（送液停止後に流れ込んだ溶液量

を含む)を送液時間(送液開始から送液停止操作までの時間)で割って算出した。

溶液密度が 1.1g/cm^3 の場合の、送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化を添付資料に示す。

溶液密度が 1.0g/cm^3 の場合と同様に、送液中の真空度の変化も比較的小さく、受け槽内の溶液量もほぼ安定して増加しており、連続的に安定した送液が実施されていたことが分かる。

また、その他の送液挙動も、溶液密度 1.0g/cm^3 の場合とほぼ同じであり、特異な挙動は認められていない。

表5.5.4-4 試験条件及び試験結果 (溶液密度1.1 g/cm³)

試験条件				試験結果						
設定値		測定値		送り槽溶液量		受け槽溶液量				送液停止時
真空度	空気流量	溶液密度	溶液温度	送液前	送液後	送液前	送液後	送液時間	送液速度	受け槽溶液量
MPa	NL/h	g/cm ³	°C	L	L	L	L	min	L/min	L
-0.030	700	1.108	21.5	120.13	32.41	0	87.81	47.07	1.87	85.09
-0.035	500	1.107	22.5	120.47	32.65	0	87.87	49.03	1.79	85.55
-0.035	600	1.107	24.5	119.89	32.37	0	88.21	32.33	2.73	85.39
-0.035	700	1.107	24.5	120.13	33.09	0	87.43	23.36	3.74	85.31
-0.035	800	1.108	21.5	119.55	32.90	0	87.77	20.53	4.28	85.83
-0.035	900	1.107	24.5	120.37	32.36	0	88.02	17.85	4.93	85.87
-0.035	1000	1.108	21.5	120.23	32.03	0	88.19	15.78	5.59	85.33
-0.040	700	1.108	21.5	120.13	31.74	0	88.46	15.68	5.64	85.33
-0.045	700	1.108	21.5	120.28	31.20	0	89.00	9.65	9.22	85.59

(3) 溶液密度：1.2 g/cm³

溶液密度が1.2 g/cm³にて、エアリフトセパレータ内部の真空度および圧縮空気流量をパラメータに試験を行った。

試験条件を表5.5.4-5に示す。本溶液密度では、実機の運転基本条件(圧縮空気流量が700 NL/h、真空度-0.035MPa)にて、真空度または圧縮空気流量をパラメータにして表5.5.4-5に示す範囲で送液試験を実施した。

ただし、圧縮空気流量が700 NL/h、真空度-0.045MPaの試験条件の場合には、数回の試験を実施したが、いずれの場合も、送液途中でエアリフトセパレータから真空系に溶液が混入してしまった為、試験を中断した。溶液密度を上げるために塩化カルシウムを水に溶解させたが、この結果、溶液の性状が変化し、エアリフトセパレータ内部での気液分離が送液速度の上昇に追いつかなくなり、エアリフトセパレータ上部から溶液がオーバーフローしてしまったためであると考えられる。

表5.5.4-5 試験条件 (溶液密度：1.2 g/cm³)

		圧縮空気流量 (NL/h)					
		500	600	700	800	900	1000
真空度 (MPa)	-0.030	-	-	○	-	-	-
	-0.035	○	○	○	○	○	○
	-0.040	-	-	○	-	-	-
	-0.045	-	-	×	-	-	-

○：試験実施、×：試験中断、-：未実施

各試験における、試験条件および試験結果を表5.5.4-6に示す。

溶液密度は1.212~1.215g/cm³の範囲、溶液温度は21.0~27.0℃の範囲に保持されていた。

送液停止(真空ポンプをOFFにし、圧縮空気流量を0 NL/hにする)は、受け槽側の溶液量が所定量に(85L)なった時点で、作業員が手動操作にて

行った。手動操作の為若干のばらつきがあるが、ほぼ一定値で停止操作を行うことができた。

本送液方法の特性上、送液開始時に配管出口部を溶液で塞いでおかなければ、エアリフトセパレータ内部の真空度が上がり送液ができなくなってしまう。そのため、送液前に受け槽にも予め 30L 程度の溶液を装荷した。受け槽の溶液量はロードセルを使用して測定したが、送液開始前には送液開始前の風袋（容器および送液前に装荷した溶液重量）を差し引き 0kg とした。

送液速度は、受け槽に送られた全溶液量（送液停止後に流れ込んだ溶液量を含む）を送液時間（送液開始から送液停止操作までの時間）で割って算出した。

溶液密度が 1.2g/cm^3 の場合の、送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化を添付資料に示す。

また、試験中の様子を図 5.5.4-12～図 5.5.4-16 に示す。

塩化カルシウムを水に溶解させたときには、弱アルカリ性を示すことから、中和滴定用指示薬であるフェノールフタレインを溶液に若干溶解させ、溶液を着色した。

溶液密度 1.0g/cm^3 及び 1.1g/cm^3 の様子と大きく異なるのは、真空度の脈動的变化が見られることである。

これは、エアリフトセパレータへの溶液の流入が、数秒周期の脈動流に加え、数十秒周期の脈動流が観察されるようになったためである。この、数十秒単位の脈動的挙動は、真空度の変化、送り槽及び受け槽の溶液量のチャートにも表れており、比較的送液速度が速い場合に顕著であることが分かる。

表5.5.4-6 試験条件及び試験結果 (溶液密度1.2 g/cm³)

試験条件				試験結果						
設定値		測定値		送り槽溶液量		受け槽溶液量				送液停止時
真空度	空気流量	溶液密度	溶液温度	送液前	送液後	送液前	送液後	送液時間	送液速度	受け槽溶液量
MPa	NL/h	g/cm ³	℃	L	L	L	L	min	L/min	L
-0.030	700	1.215	22.0	120.47	33.33	0	87.20	55.25	1.58	85.10
-0.035	500	1.212	27.0	120.09	33.09	0	87.72	66.75	1.31	85.51
-0.035	600	1.215	22.0	120.38	33.72	0	86.80	37.13	2.34	85.05
-0.035	700	1.212	27.0	120.09	32.60	0	87.74	33.07	2.65	85.09
-0.035	800	1.212	27.0	120.09	33.38	0	87.01	25.17	3.46	85.20
-0.035	900	1.215	22.0	120.38	33.09	0	87.47	21.50	4.07	85.13
-0.035	1000	1.212	27.0	120.13	33.09	0	87.65	18.83	4.65	85.20
-0.040	700	1.215	22.0	120.28	32.66	0	87.90	21.08	4.17	85.77

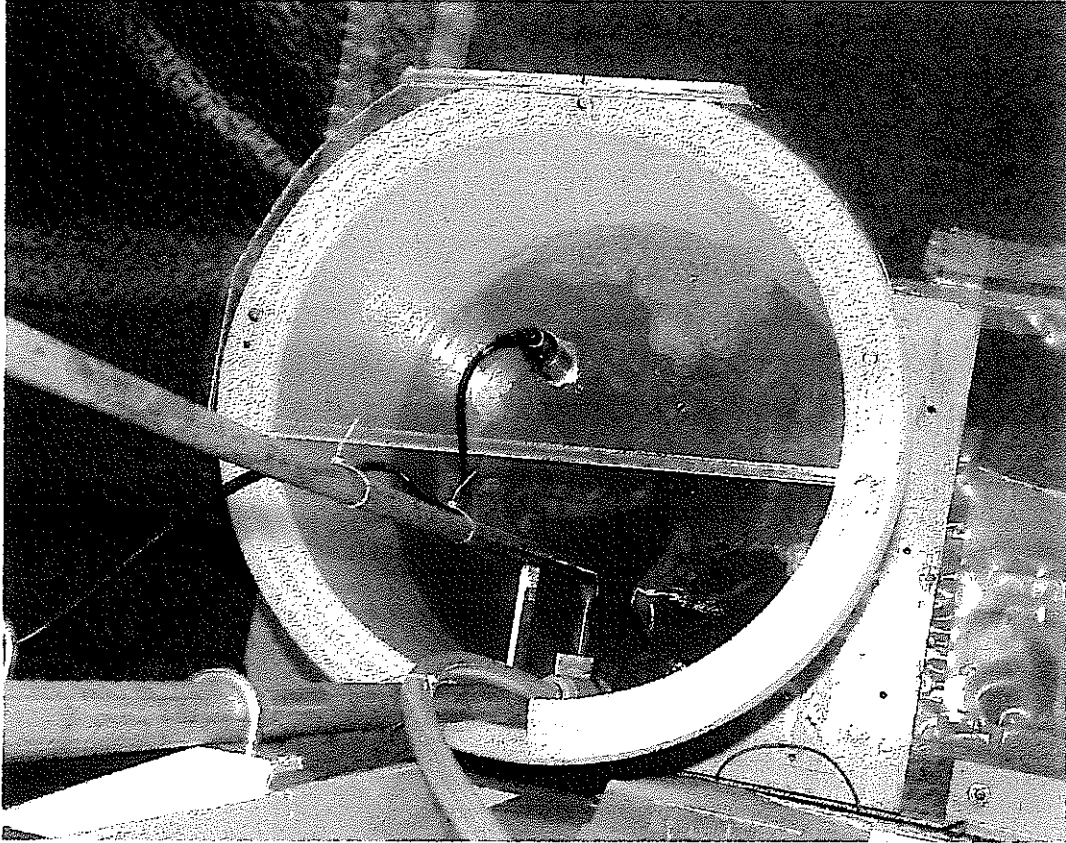


図5.5.4-12 送液中の模擬Pu貯槽（送り側槽）の様子
（溶液密度：1.2 g/cm³）



図5.5.4-13 送液中の模擬混合槽（受け側槽）の様子
（溶液密度：1.2 g/cm³）



図5.5.4-14 送液中の配管内溶液の様子
(模擬Pu貯槽(送り側槽)上部)
(溶液密度: 1.2 g/cm^3)

流れ方向 →



図5.5.4-15 送液中の配管内溶液の様子
(エアリフトセパレータ部)
(溶液密度：1.2 g/cm³)

流れ方向 →

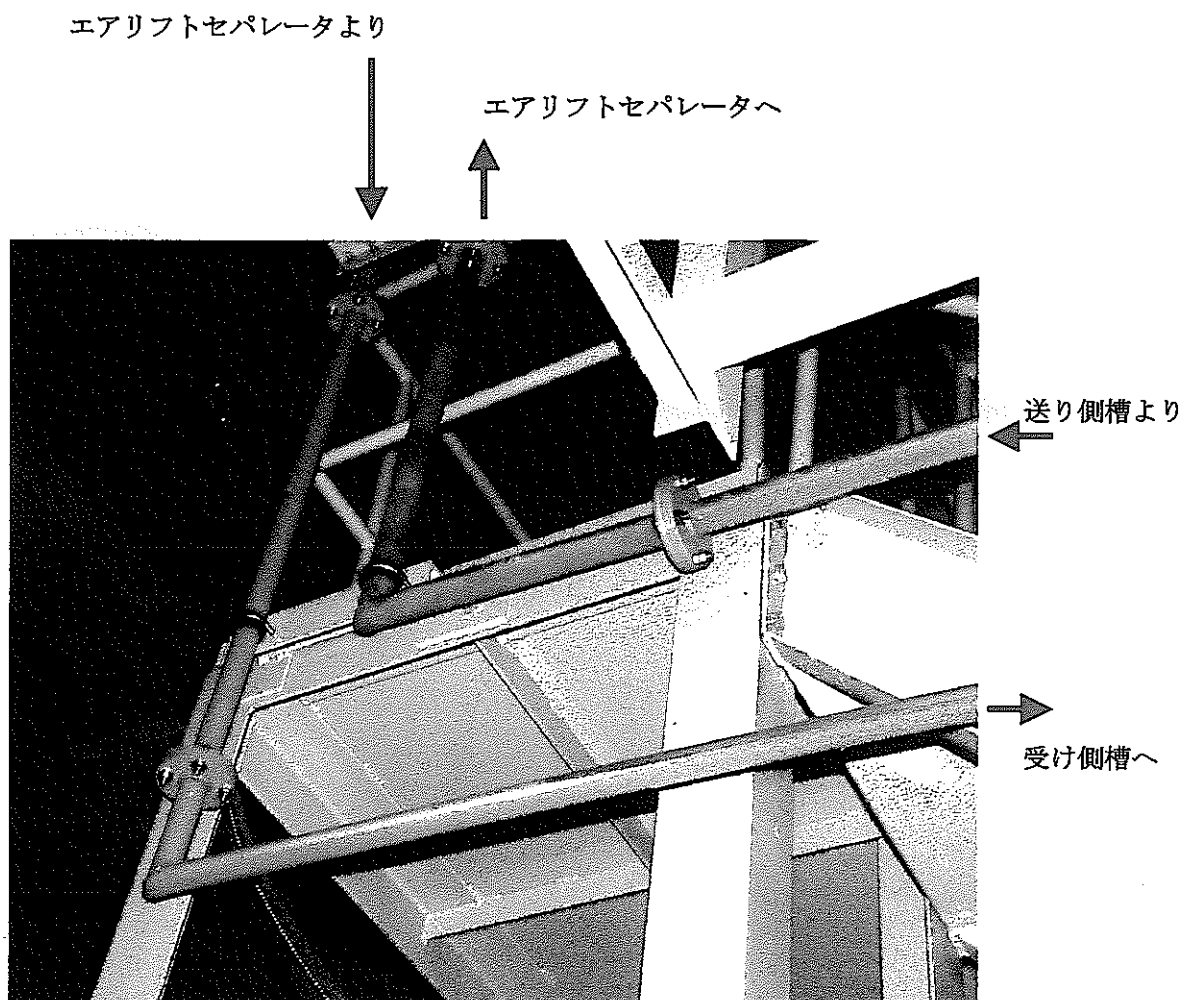


図5.5.4-16 送液中の配管内溶液の様子
(エアリフトセパレータ下部)
(溶液密度 : 1.2 g/cm³)

流れ方向 →

(4) 溶液密度：1.3 g/cm³

溶液密度が 1.3 g/cm³にて、エアリフトセパレータ内部の真空度および圧縮空気流量をパラメータに試験を行った。

試験条件を表 5.5.4-7 に示す。本溶液密度では、実機の運転基本条件（圧縮空気流量が 700 NL/h、真空度-0.035MPa）にて、真空度または圧縮空気流量をパラメータにして表 5.5.4-7 に示す範囲で送液試験を実施した。

ただし、圧縮空気流量が 700 NL/h、真空度-0.045MPa 及び圧縮空気流量が 1000 NL/h、真空度-0.035MPa の試験条件の場合には、数回の試験を実施したが、いずれの場合も、送液途中でエアリフトセパレータから真空系に溶液が混入してしまった為、試験を中断した。溶液密度を上げるために塩化カルシウムを水に溶解させたが、この結果、溶液の性状が変化し、エアリフトセパレータ内部での気液分離が送液速度の上昇に追いつかなくなったためであると考えられる。

表 5.5.4-7 試験条件（溶液密度：1.3 g/cm³）

		圧縮空気流量 (NL/h)					
		500	600	700	800	900	1000
真空度 (MPa)	-0.030	-	-	○	-	-	-
	-0.035	○	○	○	○	○	×
	-0.040	-	-	○	-	-	-
	-0.045	-	-	×	-	-	-

○：試験実施、×：試験中断、-：未実施

各試験における、試験条件および試験結果を表 5.5.4-8 に示す。

溶液密度は 1.300~1.306g/cm³ の範囲、溶液温度は 16.5~27.0℃の範囲に保持されていた。

送液停止（真空ポンプを OFF にし、圧縮空気流量を 0 NL/h にする）は、受け槽側の溶液量が所定量に（85L）なった時点で、作業員が手動操作にて行っ

た。手動操作の為若干のばらつきがあるが、ほぼ一定値で停止操作を行うことができた。

本送液方法の特性上、送液開始時に配管出口部を溶液で塞いでおかなければ、エアリフトセパレータ内部の真空度が上がり送液ができなくなってしまう。そのため、送液前に受け槽にも予め 30L 程度の溶液を装荷した。受け槽の溶液量はロードセルを使用して測定したが、送液開始前には送液開始前の風袋（容器および送液前に装荷した溶液重量）を差し引き 0kg とした。

送液速度は、受け槽に送られた全溶液量（送液停止後に流れ込んだ溶液量を含む）を送液時間（送液開始から送液停止操作までの時間）で割って算出した。

溶液密度が 1.3g/cm^3 の場合の、送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化を添付資料に示す。

溶液密度が 1.2g/cm^3 の場合と同様に、真空度及び各槽の溶液量の変化に脈動的変動が現れている。

表5.5.4-8 試験条件及び試験結果 (溶液密度1.3 g/cm³)

試験条件				試験結果						
設定値		測定値		送り槽溶液量		受け槽溶液量				送液停止時
真空度	空気流量	溶液密度	溶液温度	送液前	送液後	送液前	送液後	送液時間	送液速度	受け槽溶液量
MPa	NL/h	g/cm ³	°C	L	L	L	L	min	L/min	L
-0.030	700	1.304	20.0	120.42	33.57	0	88.68	67.23	1.32	85.27
-0.035	500	1.300	27.0	120.23	34.06	0	86.71	61.88	1.40	85.18
-0.035	600	1.302	21.5	120.23	33.33	0	87.17	43.42	2.01	84.66
-0.035	600	1.306	16.5	120.67	33.48	0	86.85	47.52	1.83	85.07
-0.035	700	1.302	21.5	120.28	32.95	0	87.10	37.30	2.34	84.97
-0.035	800	1.302	21.5	120.23	33.09	0	87.25	30.87	2.83	85.01
-0.035	900	1.300	27.0	120.28	32.75	0	87.74	26.67	3.29	85.09
-0.040	700	1.304	20.0	120.42	32.46	0	87.59	24.20	3.62	84.76

5.5.5 試験結果の検討

(1) 圧縮空気流量の影響

各真空度における圧縮空気流量と溶液移送速度の関係を図 5.5.5-1 に示す。

真空度が一定の場合には、圧縮空気流量の上昇に伴い送液速度が上昇していることが分かる。

また、圧縮空気流量が一定の場合には、真空度の増加に伴い送液速度が増加している。本試験では、圧縮空気流量が 500~1000NL/h の範囲で試験を実施したが、いずれの真空度においても、本試験における最大値の 1000NL/h 付近では、圧縮空気流量の上昇に伴う送液速度の増加割合が小さくなっていることが分かる。これは、送液速度には上限値が存在することを示唆しており、圧縮空気流量を 1000NL/h 以上にさらに上昇させた場合には、ある一定の上限値で安定するものと考えられる。

(2) 溶液密度の影響

各溶液密度における圧縮空気流量と溶液移送速度の関係を図 5.5.5-2 に示す。

同一の圧縮空気流量条件 (-0.035MPa) では、溶液密度が小さいほど送液速度が大きくなっていることが分かる。溶液密度の影響は顕著であり、溶液密度 1.0g/cm³ と 1.3g/cm³ では、送液速度で 2 倍程度の差が現れている。

これにより、溶液密度 1.5g/cm³ 程度の硝酸プルトニウム溶液を使用した場合には、送液速度はさらに遅くなるものと予想される。

また、各溶液密度における真空度と溶液移送速度の関係を図 5.5.5-3 に示す。

(3) 真空度の影響

真空度の上昇に伴い、送液速度が上昇していることが分かる。今回の試験条件の範囲では、真空度の影響は他のパラメータと比較して顕著であり、わずかな真空度の上昇（真空度の絶対値の増加）により、送液速度が大きく変化することが分かる。

この結果より、送液中の送液速度を一定に保つためには、真空系の真空度が安定していることが重要であると考えられる。

転換施設のエアリフトポンプの圧縮空気供給系は、施設内の他工程と共用しており、他工程での使用の有無により変動することが認められている。この影響により、転換施設のエアリフトポンプの送液速度が変動していることが考えられる。

(4) 脈動流の影響

試験結果に示すチャートには現れていないが、エアリフトセパレータに流れ込む溶液について、数秒周期の脈動が観察されている。これは、配管を上昇する気液混合流は、配管断面積のほとんどを占める砲弾形気泡及び小気泡を含む気液混合流から構成されているためである。配管内の気液混合流の様子を図 5.5.5-4、図 5.5.5-5 及び図 5.5.5-6 に示す。

最初に、下流において小気泡が合体して短い気体スラグが形成され、それらの中のあるものは先行する気体スラグと合体し、最終的に、長さ L_G の砲弾形気泡、長さ L_L の小気泡を含む気液混合流が形成される。

この長さ L_G 及び長さ L_L の値は気液流量によって決定され、統計的に分布した値であり、図 5.5.5-7 及び図 5.5.5-8 示す様な正規分布となる。

ここで、

w_G : 気相の容積速度* (m/s)

w_L : 液相の容積速度 (m/s)

とおくと、

気体スラグの速度 (w_b) は、次式で表される。

$$w_b = 1.25 (w_G + w_L) \quad \dots\dots\dots \text{(式 5.5.5-1)}$$

また、気泡による脈動周期 (T) は、

*) 容積速度 : 各相の容積流量 (m³/s) を管路断面積 (m²) で割った値

$$T = (L_G + L_L) / w_b \quad \dots\dots\dots (式 5.5.5-2)$$

で表される。

ここで、溶液密度 1.0 g/cm³、真空度-0.035MPa、圧縮空気流量 500～1000NL/h の場合の脈動周期を式 5.5.5-2 を使用して算出した。

なお、 L_G+L_L については写真及び目視観察により、ここでは 80cm として計算した。

表 5.5.5-1 に脈動周期の検討結果を示す。算出した周期は 1.5～3.5 秒の範囲にあり、エアリフトセパレータへの数秒周期の流入結果と比較して、ほぼ妥当な値であると判断される。

砲弾形気泡の容積が比較的小さいことから、この数秒周期の脈動が真空度の変動となってチャートには現れることはない。また、この脈動流は、エアリフトセパレータの容量により吸収・平滑化されるため、各槽の溶液量の変化のチャートにも現れてこない。したがって、この数秒周期の脈動が送液精度に関わる送液制御に及ぼす影響は、きわめて小さいものと考えられる。

送液中に測定したチャートを見ると、溶液密度 1.2cm³ 以上では、真空度に周期的な変動が見られている。また、この変動に伴い、各槽内の溶液量の増減にも 10～20 秒周期の周期的な変動が観察されている。

この中周期の脈動流については、試験の目的上、ここでの詳細な検討については省略するが、揚液配管内の軸方向の一断面では、送液中には、位置圧力損失、摩擦損失、速度損失及び加速損失の割合が変動することに起因していると報告されている。⁽⁹⁾

現状の施設の、真空系及び圧縮空気系の ON/OFF 操作による送液システムでは、前者の数十秒周期の変動により、送液停止のタイミングの差により最終的な送液量が変動することが予想される。また、本試験結果より、溶液密度が大きい場合に、変動が顕著であることから、溶液密度約 1.5g/cm³ の硝酸プルトニウム溶液を使用している実機設備でも観察されるものと予想され、送液挙動制御を困難にする原因の 1 つとなり得ることが考えられ

る。これにより、この数十秒周期の脈動流は、本件の目的である送液精度に大きな影響を与えるものと考えられる。

したがって、次項の送液精度評価試験では、上記の観点から停止操作後の送液挙動に関する検討を実施することが望ましいものと判断される。

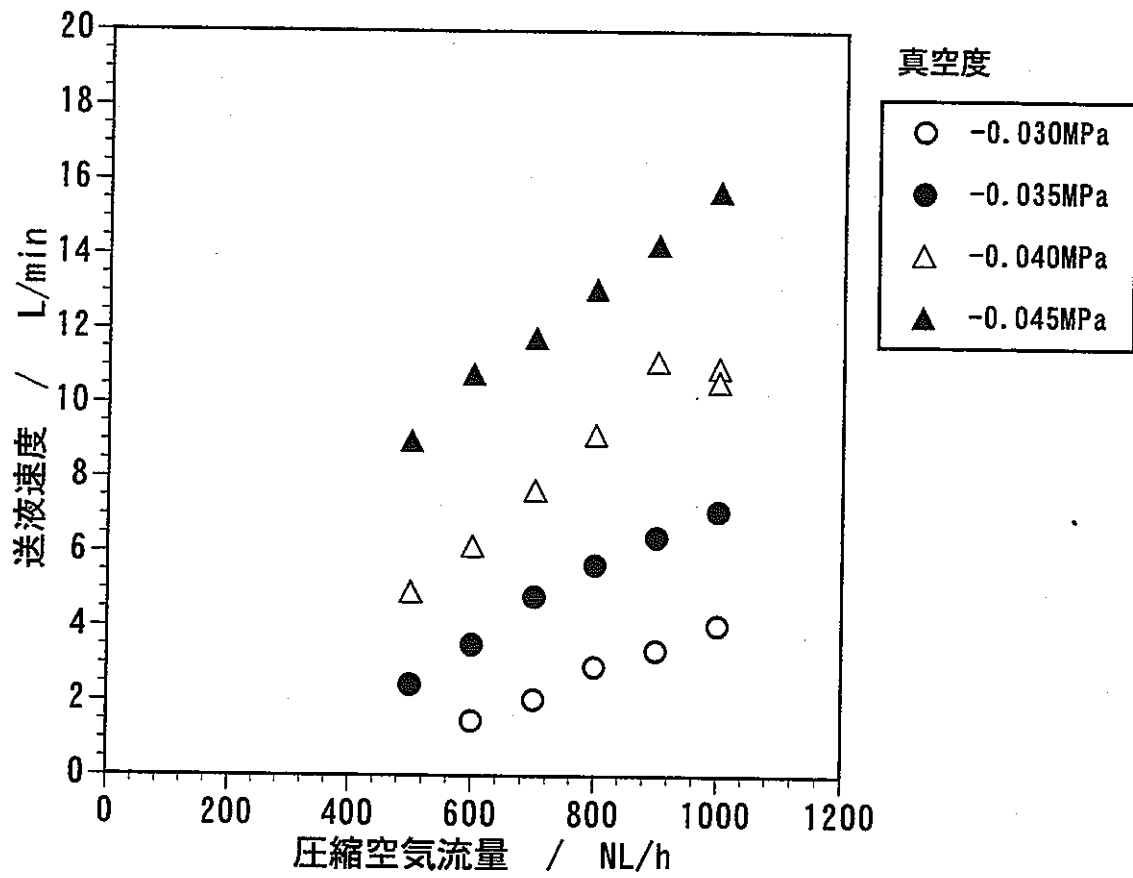


図5.5.5-1 各真空度における圧縮空気流量と溶液送液速度の関係

溶液密度 : 1.0 g/cm^3

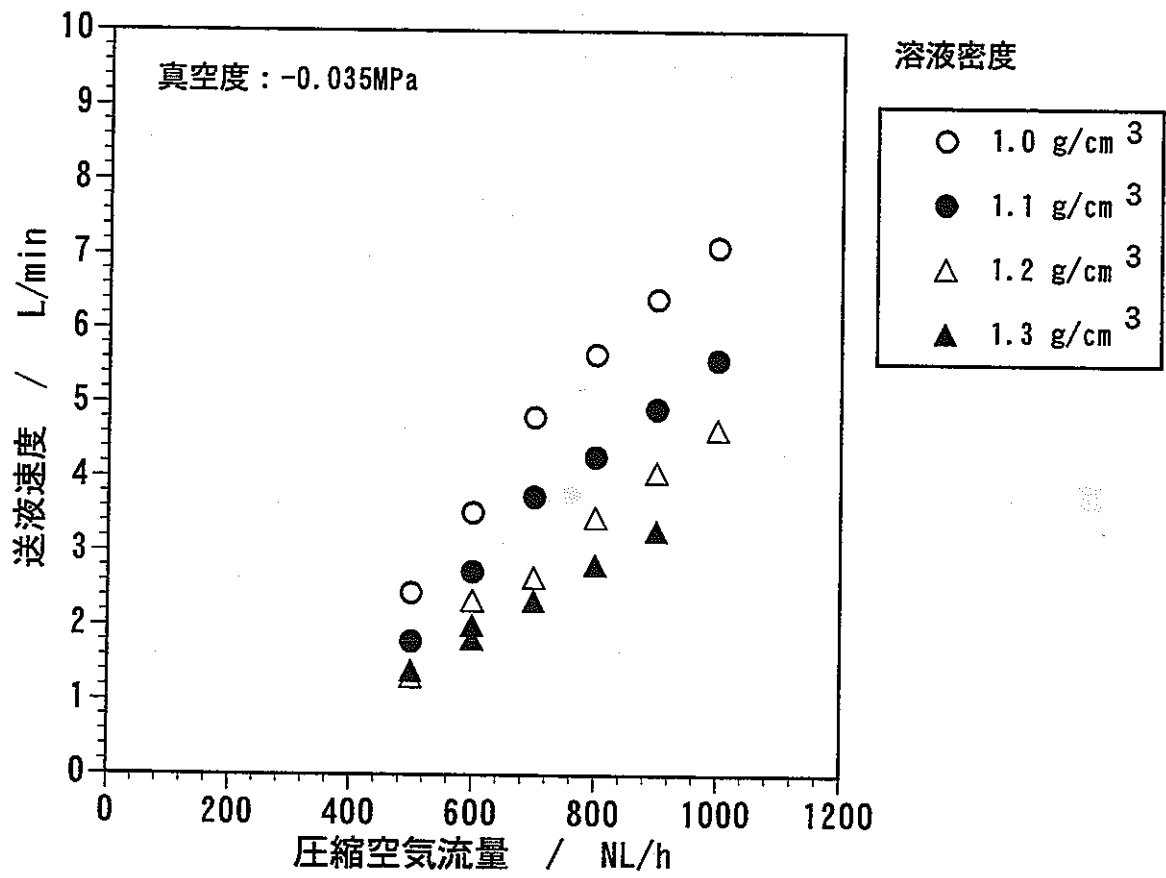


図5.5.5-2 各溶液密度における圧縮空気流量と溶液送液速度の関係

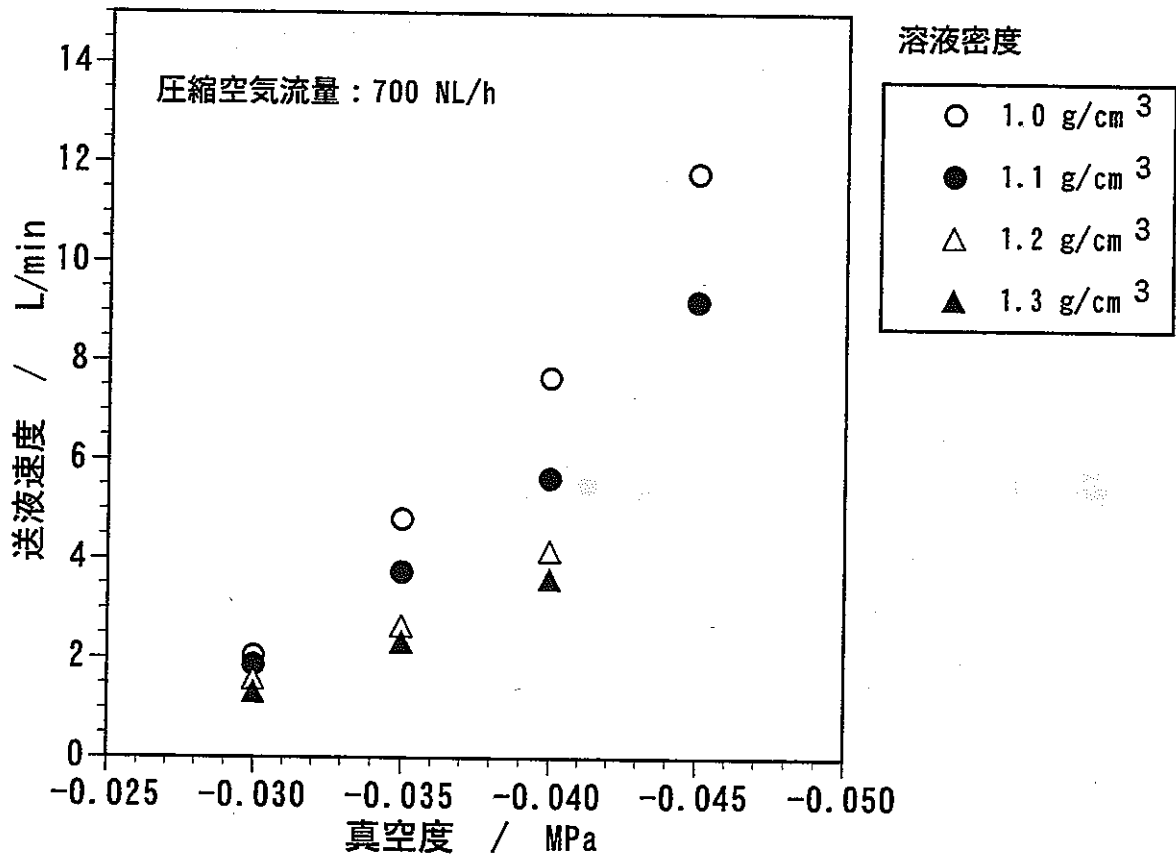


図5.5.5-3 各溶液密度における真空度と溶液送液速度の関係



図5.5.5-4 配管内の気液混合流の様子
(砲弾形気泡、溶液密度：1.0 g/cm³)
(赤インクにて着色)

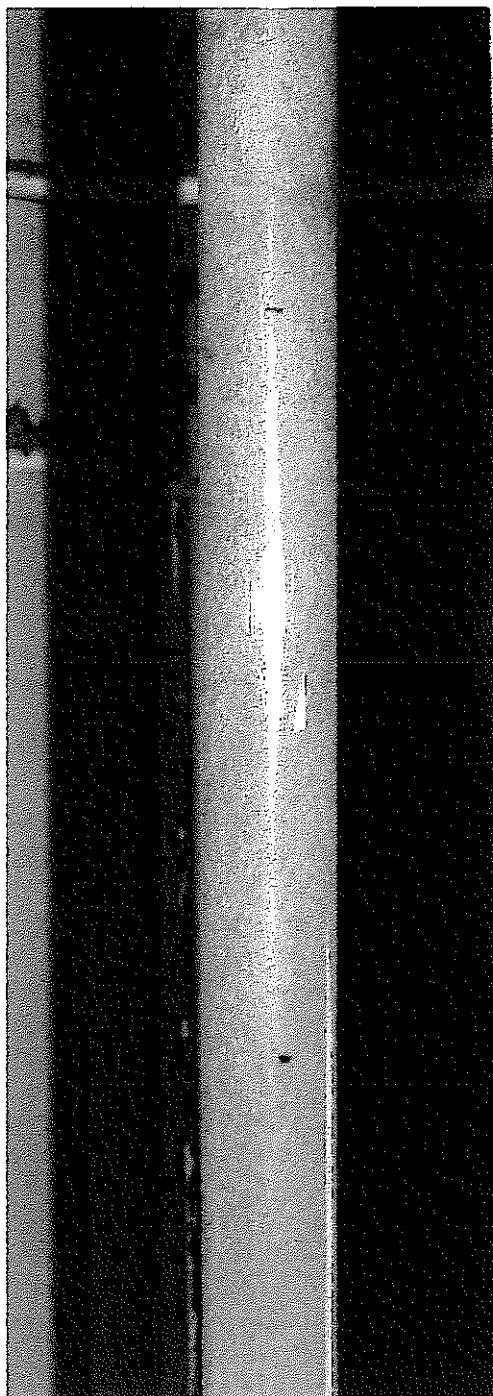


図5.5.5-5 配管内の気液混合流の様子
(小気泡を含む混合流、溶液密度：1.0 g/cm³)
(赤インクにて着色)

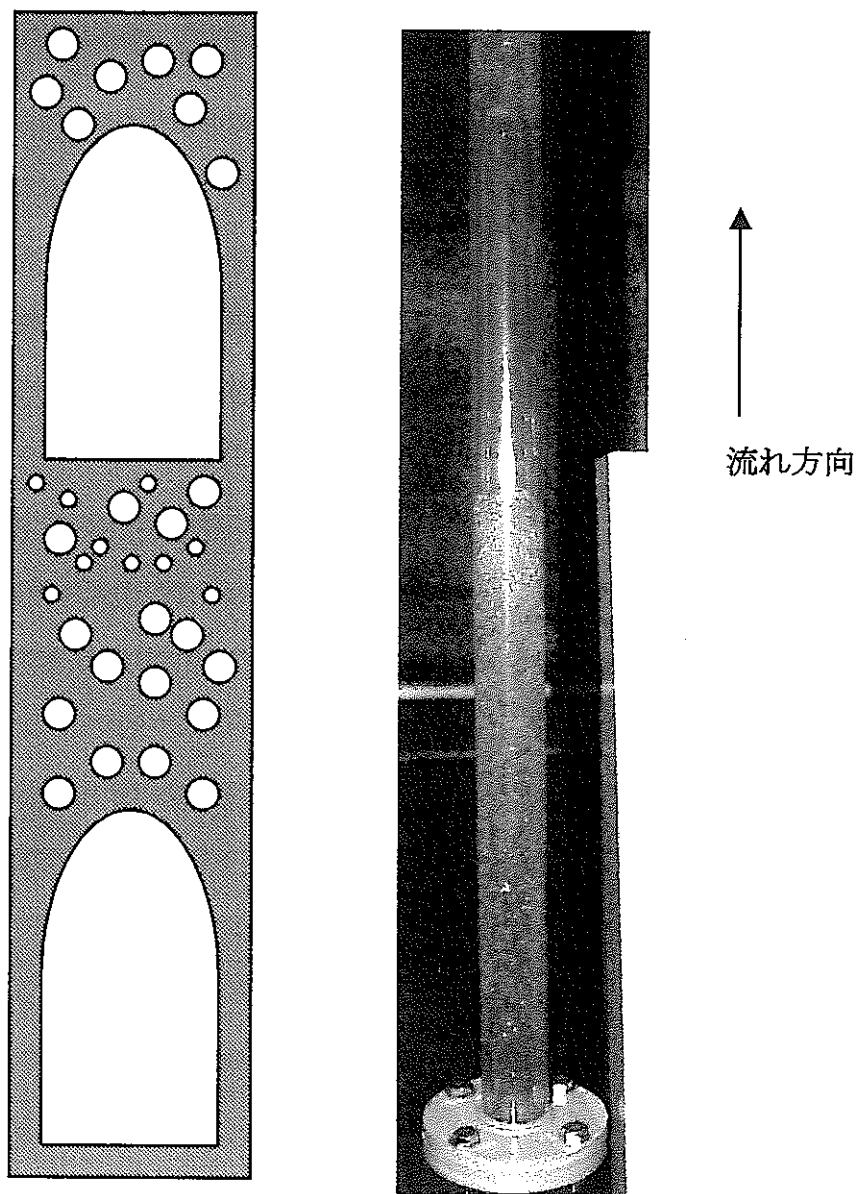


図5. 5. 5-6 送液配管内部の気液混合流の様子

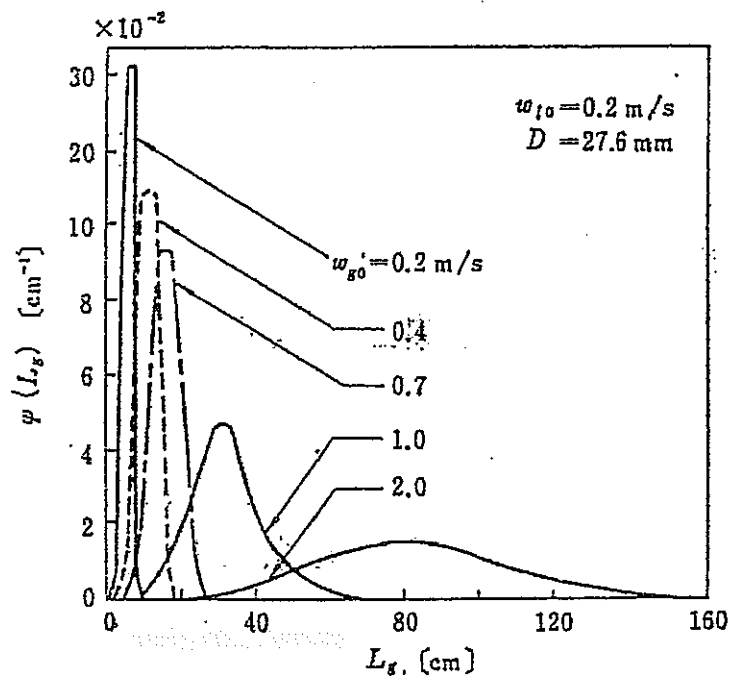


図 5.5.5-7 気体スラグ長さの分布

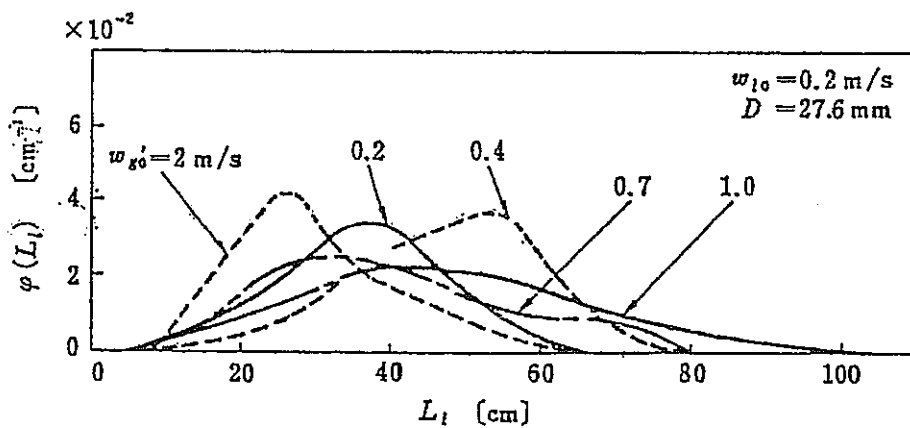


図 5.5.5-8 液体スラグ長さの分布

表5.5.5-1 脈動周期の検討結果

圧縮空気流量	溶液流量	圧縮空気流量	溶液流量	配管断面積	容積速度		気体スラッグ の速度	砲弾形気泡長 さと気液混合 流の長さの和	脈動周期
					気相	液相			
					w_G	w_L			
L/h	L/min	m^3/s	m^3/s	m^2	m/s	m/s	m/s	$L_G + L_L$	T
								m	s
500	2.44	1.389E-04	4.067E-05	9.621E-04	1.444E-01	4.227E-02	2.333E-01	0.8	3.43
600	3.52	1.667E-04	5.867E-05	9.621E-04	1.732E-01	6.098E-02	2.928E-01	0.8	2.73
700	4.81	1.944E-04	8.017E-05	9.621E-04	2.021E-01	8.333E-02	3.568E-01	0.8	2.24
800	5.66	2.222E-04	9.433E-05	9.621E-04	2.310E-01	9.805E-02	4.113E-01	0.8	1.95
900	6.41	2.500E-04	1.068E-04	9.621E-04	2.599E-01	1.110E-01	4.636E-01	0.8	1.73
1000	7.11	2.778E-04	1.185E-04	9.621E-04	2.887E-01	1.232E-01	5.149E-01	0.8	1.55

* 真空度: -0.035 MPa

* 溶液密度: 1.0 g/cm³

5.5.6 まとめ

エアリフトポンプのモックアップ装置を使用して、圧縮空気流量、真空度及び溶液密度をパラメータに送液特性把握試験を実施した。

- ① 圧縮空気流量の増加に伴い送液速度が上昇するものの、圧縮空気流量の増加につれて送液速度は飽和する傾向にある。
- ② 一定の試験条件では、溶液密度の上昇に伴い送液速度は遅くなる傾向がある。溶液密度 1.0g/cm^3 と 1.3g/cm^3 の送液速度の違いはほぼ2倍であり、実機では、送液速度はさらに遅くなることが予想される。
- ③ 真空度のわずかな違いは送液速度に比較的大きな影響を与える。
- ④ 目視にて数秒周期の脈動流が観察されたが、その脈動流が送液制御に与える影響はきわめて小さいものと考えられる。
- ⑤ 溶液密度 1.2g/cm^3 以上において、真空度に10~20秒周期の脈動が観察され、各槽内の溶液量の増減にも脈動が観察された。この変動は、送液挙動の制御を困難にする因子の1つであると考えられ、送液精度の向上のためには、この変動に対する対策が必要である。

5.6 送液精度評価試験

5.6.1 目的

送液特性把握試験では、真空度、圧縮空気流量及び溶液密度をパラメータとしてモックアップ装置を使用して送液試験を実施し、送液挙動、送液速度及び送液時の配管内滞留量等の主要な送液特性を把握した。

送液特性把握試験の実施結果により、現状のエアリフトポンプを利用した送液方法では、

- ① 送液ライン（エアリフトセパレータ及び配管等）への溶液付着量
- ② 送液停止操作後の流入量

が、送液誤差に影響を与えることが明らかになった。

上記の①については、大きく、溶液の基礎物性、装置構造、装置配置及び装置材料等に依存するため、模擬溶液及び材質の異なる模擬装置を使用したモックアップ試験で模擬・検討することは不可能であると考えられる。

また、送液特性把握試験の観察の範囲であるが、送液配管ラインへの溶液付着量の影響は比較的小さいものと考えられる。

それに対して、②については、送液特性把握試験において、送液中の真空度が脈動的に変動し、それに応じて、エアリフトセパレータ及び各槽への溶液の流入が脈動的になることが観察されている。したがって、送液停止のタイミングにより、停止後の流入量が比較的大きく変動することが予想され、本モックアップ装置を使用してさらにデータを取得する必要があるものと考えられる。

本項では、送液精度評価を目的として、上記の②に着目して送液特性把握試験と同様のパラメータ（真空度、圧縮空気流量及び溶液密度）に関して送液試験を実施し、送液精度評価に必要なデータの取得を実施した。

5.6.2 試験条件の検討

試験実施に先立ち、送液精度に直接関係の深い送液停止後の溶液流入量を評価するための試験条件の検討を行った。

(1) 溶液密度

実際の硝酸プルトニウム溶液の密度は $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であり、本モックアップ試験では水に塩化カルシウムを溶解させることによって、 $1.00\sim 1.37\text{g}/\text{cm}^3$ の範囲で溶液密度を調整することが可能である。

送液停止後の溶液流入量に対する溶液密度の影響を確認するために、送液特性把握試験と同様に、本検討においても、 1.0 、 1.1 、 1.2 及び $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ において検討を実施する。

(2) 真空度

既設工程の調査結果より、プルトニウム転換技術開発施設でエアリフトに使用されている真空系の真空度は $-0.035\text{MPa}\sim -0.040\text{MPa}$ であることが分かっている。この真空度は送液速度、送液配管への溶液の滞留量等に大きな影響を与えることが予想される。

そこで、本検討では、上記の実機の運転条件を考慮し $-0.030\text{MPa}\sim -0.045\text{MPa}$ で検討を実施することとする。

(3) 圧縮空気流量

送液特性把握試験により圧縮空気流量も送液特性に影響を与えることが分かっている。

そこで、送液停止後の溶液流入量に対する圧縮空気流量の影響を確認するために、送液特性把握試験と同様に、本検討においても、 500 、 600 、 700 、 800 、 900 及び $1000\text{NL}/\text{h}$ において検討を実施する。

(4) 送液量

本試験は送液停止後に各槽に流れ込む溶液量を測定することを目的としているため、送液特性把握試験のように比較的多量の溶液を送液する必要はない。

そこで、本試験では、送液特性把握試験における送液停止時の状況を作り出すのに十分な溶液量を確保すれば良いと考えられる。

試験条件にも依るが、送液開始後に送液が安定するまでには最低でも $5\sim 10\text{L}$ 程度の送液が必要である。

したがって、本試験では余裕を考慮し $15\sim 20\text{L}$ の送液を実施することとした。

(5) 溶液量

送液開始前の各槽の溶液量は、5.5 項の溶液特性把握試験の送液停止時の各槽の溶液量を参考に決定した。

試験条件を表 5.6.2-1 に示す。

表 5.6.2-1 試験条件 (送液精度評価試験)

		圧縮空気流量 (NL/h)					
		500	600	700	800	900	1000
真空度 (MPa)	-0.030			○			
	-0.035	○	○	○	○	○	○
	-0.040	○	○	○	○	○	○
	-0.045			○			

溶液密度 : 1.0、1.1、1.2 及び 1.3g/cm³

5.6.3 試験方法

試験実施手順を以下に示す。

- ① PC の測定用プログラムを起動し、各槽の溶液量及び真空度の測定を開始する
- ② 一定量の溶液を受け槽 (混合槽模擬) 及び送り槽 (プルトニウム貯槽模擬) に装荷する
- ③ 試験開始前の各槽の溶液量を記録する
- ④ 各槽の溶液量の指示値が一定になったことを確認し、真空ポンプのスイッチを ON にするとともに、予め設定した流量の圧縮空気を流し始める
- ⑤ 差圧伝送器により真空度の指示値を確認し、バルブの開度を調節し、真空度を設定値に合わせる
- ⑥ 受け槽側の溶液量が予め設定した値になったところで、真空ポンプのスイッチを OFF にし、同時に圧縮空気の流量をゼロにする

- ⑦ 受け槽及び送り槽の溶液量が一定になったことを確認し、各槽の溶液量を記録する。

送液特性把握試験と同様に、送液中の各槽の溶液量及び真空度はPCにて1sec毎に記録・保存した。

本試験における測定項目及び測定方法を表 5.6.3-1 に示す。

表 5.6.3-1 測定項目及び測定方法

測定項目	測定方法
溶液量 (受け槽)	ロードセルによる重量測定による
溶液量 (送り槽)	超音波式液面計による
真空度	差圧伝送器による
圧縮空気流量	流量計の指示値による
圧縮空気圧力	圧力計の指示値による
溶液温度	温度計による測定による
溶液密度	密度計による測定による

5.6.4 試験結果

表 5.6.4-1 に示す試験条件にて各5回の送液を実施し、受け槽及び送り槽への送液停止後流入量を測定した。

試験結果を表 5.6.4-1 及び図 5.6.4-1~4 に示す。

表 5.6.4-1 試験結果のまとめ (送液精度評価試験・溶液密度: 1.00 g/cm³)
(その1)

真空度 (MPa)	圧縮空気流量 (NL/h)	送液停止後流入量 (L)
-0.030	700	2.4977
		2.5414
		2.5415
		2.1862
		2.4100
-0.035	500	2.8977
		2.8977
		2.9636
		2.9636
		2.9636
	600	3.0734
		2.9855
		3.2710
		3.0734
		3.0733
	700	3.3148
		2.9855
		3.1172
		3.2270
		3.2051
	800	3.1832
		3.2270
		3.1392
		3.2270
		3.2270
	900	3.2271
		3.1831
		3.2710
		3.2271
		3.0514
	1000	3.0953
		3.4466
		3.4466
		3.3588
		3.3588

表 5.6.4-1 試験結果のまとめ (送液精度評価試験・溶液密度: 1.00 g/cm³)
(その2)

真空度 (MPa)	圧縮空気流量 (NL/h)	送液停止後流入量 (L)
-0.040	500	3.4650
		3.3115
		3.3334
		3.2897
		3.2239
	600	3.5528
		3.4431
		3.6405
		3.2677
		3.4870
	700	3.4212
		3.3992
		3.3335
		3.9256
		3.3993
	800	3.0484
		3.3334
		3.5747
		3.3993
		2.8949
900	3.0484	
	3.3334	
	3.5747	
	3.3993	
	2.8949	
1000	3.0483	
	3.3773	
	3.5966	
	2.9167	
	3.1361	
-0.045	700	3.8560
		3.6807
		4.0751
		4.4037
		4.0531

表 5.6.4-2 試験結果のまとめ (送液精度評価試験・溶液密度: 1.10 g/cm³)
(その1)

真空度 (MPa)	圧縮空気流量 (NL/h)	送液停止後流入量 (L)
-0.030	700	2.7813
		2.3840
		2.5429
		2.7217
		2.6621
-0.035	500	3.1845
		2.6868
		2.9257
		2.5874
		2.8859
	600	3.2441
		2.8461
		3.0849
		2.7665
		2.8063
	700	2.6271
		3.0252
		2.3286
		3.3834
		2.1694
	800	3.3774
		3.4965
		2.6423
		2.5430
		2.7018
900	3.1986	
	2.8013	
	2.9998	
	2.9601	
	2.9999	
1000	3.3377	
	2.8012	
	3.7747	
	2.8012	
	2.7217	

表 5.6.4-2 試験結果のまとめ (送液精度評価試験・溶液密度: 1.10 g/cm³)
(その2)

真空度 (MPa)	圧縮空気流量 (NL/h)	送液停止後流入量 (L)
-0.040	500	2.6224
		3.1588
		3.6753
		3.4568
		2.4834
	600	3.8144
		3.0794
		2.2847
		3.5959
		2.5827
	700	2.9800
		3.4767
		2.5230
		3.1191
		2.8211
	800	4.0329
		3.7747
		4.4104
		3.8939
		3.4767
900	4.0727	
	4.0330	
	4.1919	
	4.4501	
	4.0727	
1000	3.5164	
	4.1322	
	4.3310	
	4.0727	
	4.1431	
-0.045	700	4.5694
		4.6687
		4.1919
		4.3309
		4.1919

表 5.6.4-3 試験結果のまとめ (送液精度評価試験・溶液密度: 1.20 g/cm³)
(その1)

真空度 (MPa)	圧縮空気流量 (NL/h)	送液停止後流入量 (L)
-0.030	700	2.6264
		2.4452
		2.4452
		2.3546
		2.3909
-0.035	500	2.5902
		2.5539
		2.5538
		2.5177
		-
	600	2.5901
		2.6988
		2.7532
		2.5902
		2.7713
	700	2.6328
		2.6329
		2.5239
		2.4513
		2.3786
	800	2.5539
		2.9886
		2.3546
		2.3909
		2.5357
	900	3.0792
		2.7713
		2.2460
		2.6626
		2.8981
	1000	2.6988
		2.3909
		2.7713
		2.3184
		2.4271

表 5.6.4-3 試験結果のまとめ (送液精度評価試験・溶液密度: 1.20 g/cm³)
(その2)

真空度 (MPa)	圧縮空気流量 (NL/h)	送液停止後流入量 (L)
-0.040	500	2.8800
		2.8981
		2.7169
		2.5358
		2.6264
	600	3.0701
		2.3728
		2.6805
		2.6263
		2.4996
	700	2.2515
		2.2878
		2.9597
		2.5603
		2.4513
	800	2.6147
		2.9234
		2.8871
		2.7418
		2.9326
900	3.1776	
	3.0505	
	2.7894	
	3.4958	
	2.3003	
1000	3.3147	
	3.4233	
	3.2965	
	3.9123	
	3.2060	
-0.045	700	3.8218
		4.0211
		3.6407
		3.6044
		4.0935
		3.9667
		3.7131

表 5.6.4-4 試験結果のまとめ (送液精度評価試験・溶液密度: 1.30 g/cm³)
(その1)

真空度 (MPa)	圧縮空気流量 (NL/h)	送液停止後流入量 (L)
-0.030	700	1.5981
		1.5644
		1.4131
		1.4635
		1.5981
-0.035	500	2.0233
		2.1919
		2.2088
		1.8547
		2.0570
	600	1.7029
		1.8884
		1.8547
		1.7198
		1.9221
	700	1.8884
		1.8209
		1.5681
		2.0859
		1.8504
	800	1.7663
		1.8673
		2.2037
		2.0691
		2.2374
	900	1.6654
		1.7495
		1.9177
		1.8168
		2.3382
	1000	2.1868
		2.0187
		2.3383
2.4056		
1.9514		

表 5.6.4-4 試験結果のまとめ (送液精度評価試験・溶液密度: 1.30 g/cm³)
(その2)

真空度 (MPa)	圧縮空気流量 (NL/h)	送液停止後流入量 (L)
-0.040	500	2.0186
		2.4560
		2.3887
		2.1869
		2.0860
	600	2.1869
		2.2205
		2.3719
		2.0859
		2.2205
	700	2.0186
		2.4056
		2.9270
		2.8093
		2.5401
	800	2.1028
		2.5569
		3.2298
		3.0280
		2.6916
900	3.4821	
	3.5831	
	3.5494	
	3.4149	
	2.8950	
1000	3.9363	
	3.8691	
	4.0154	
	3.8185	
	3.1793	
-0.045	700	3.6335
		3.9195
		3.7345
		3.4821
		3.8354

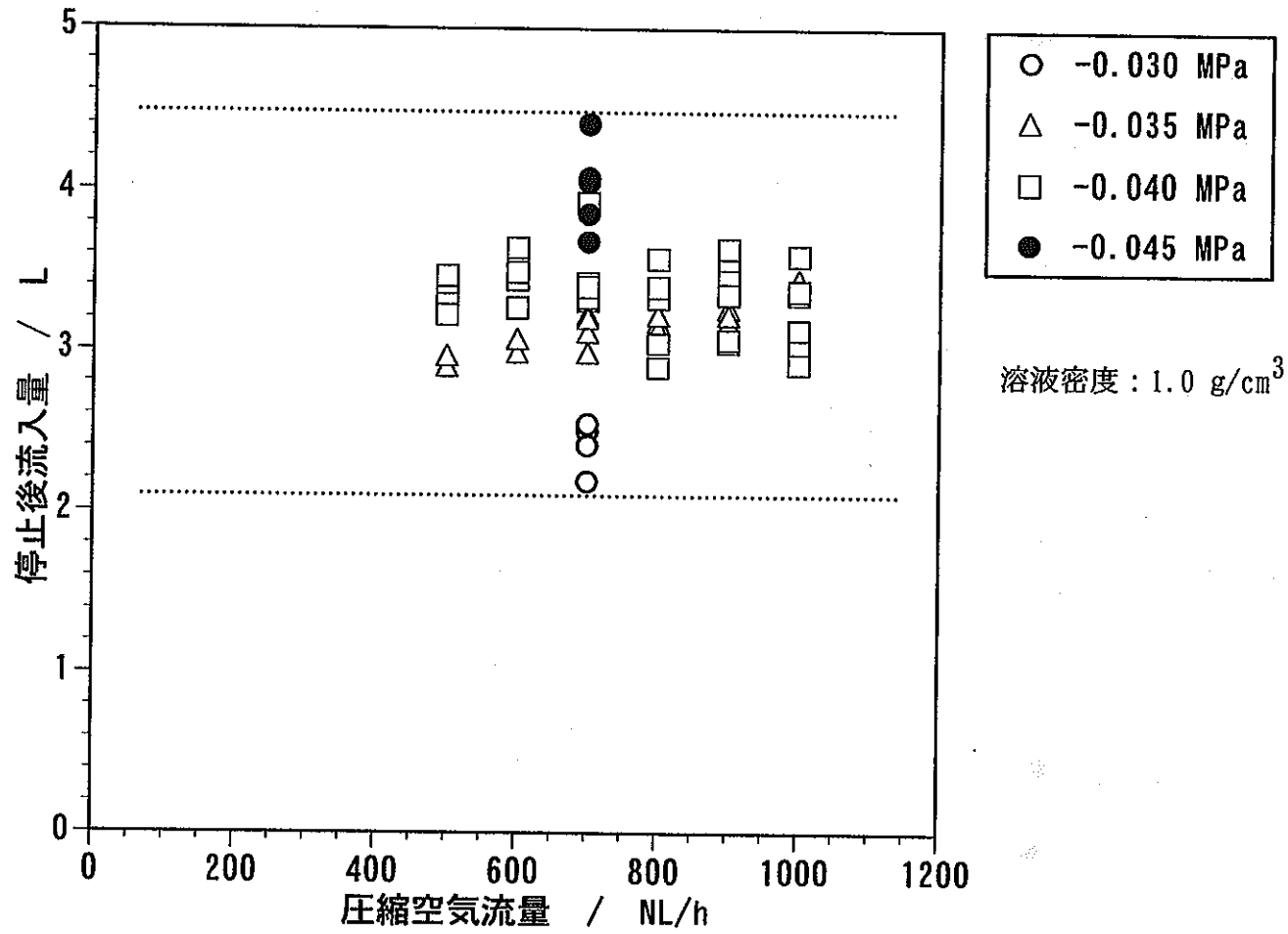


図5.6.4-1 圧縮空気流量と停止後流入量の関係 (溶液密度 : 1.0 g/cm³)

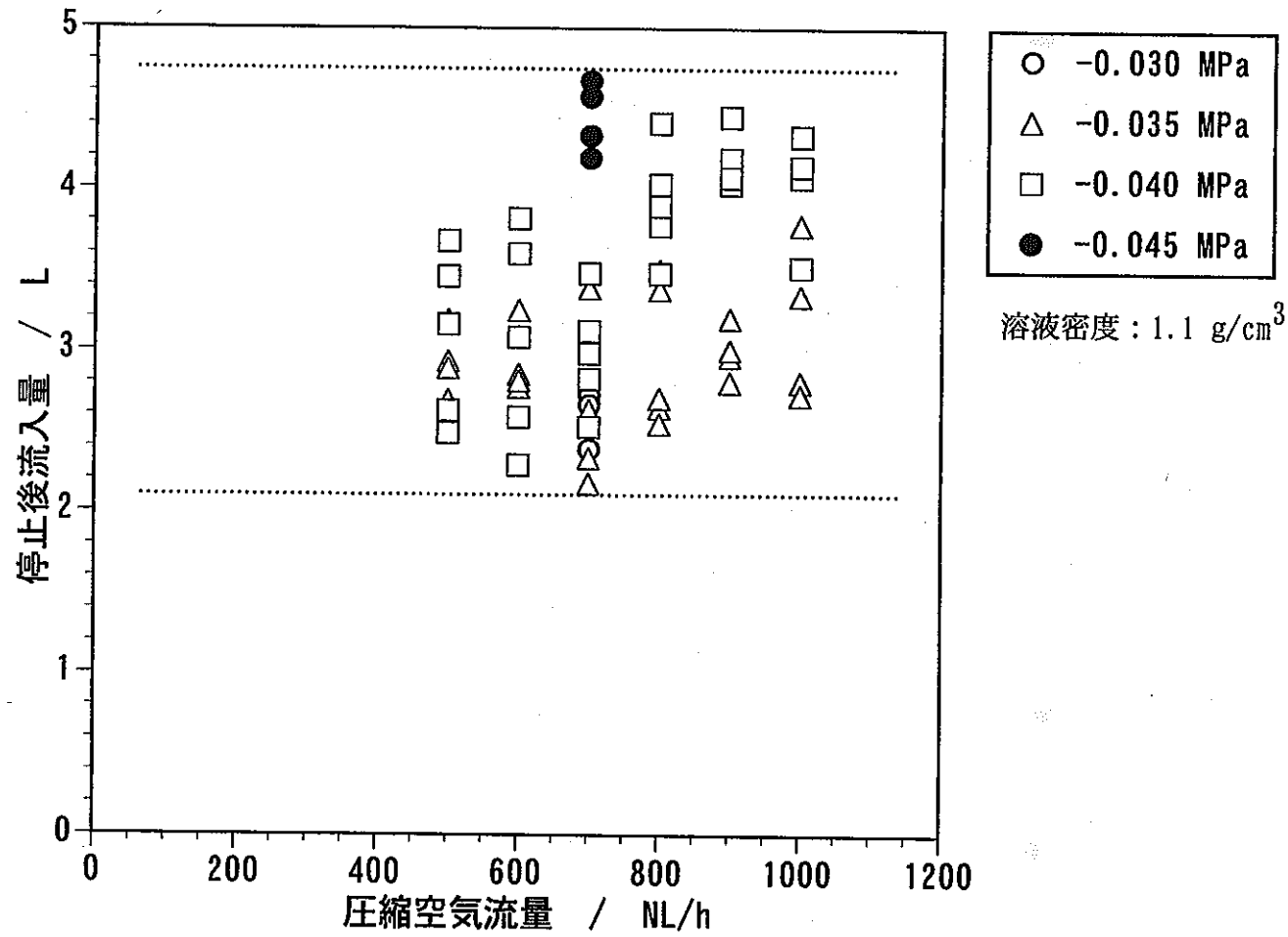


図5.6.4-2 圧縮空気流量と停止後流入量の関係 (溶液密度：1.1 g/cm³)

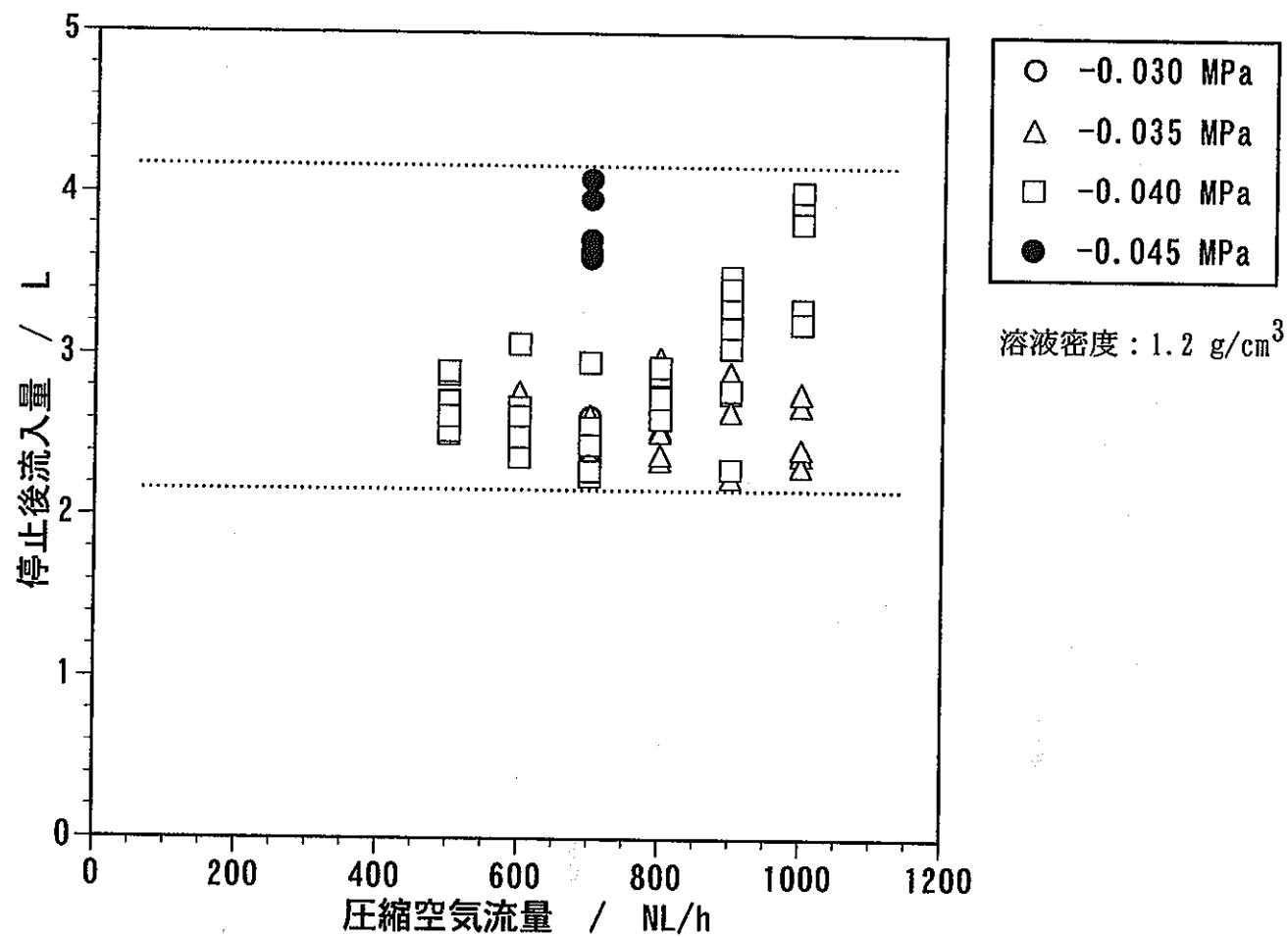


図5.6.4-3 圧縮空気流量と停止後流入量の関係 (溶液密度 : 1.2 g/cm³)

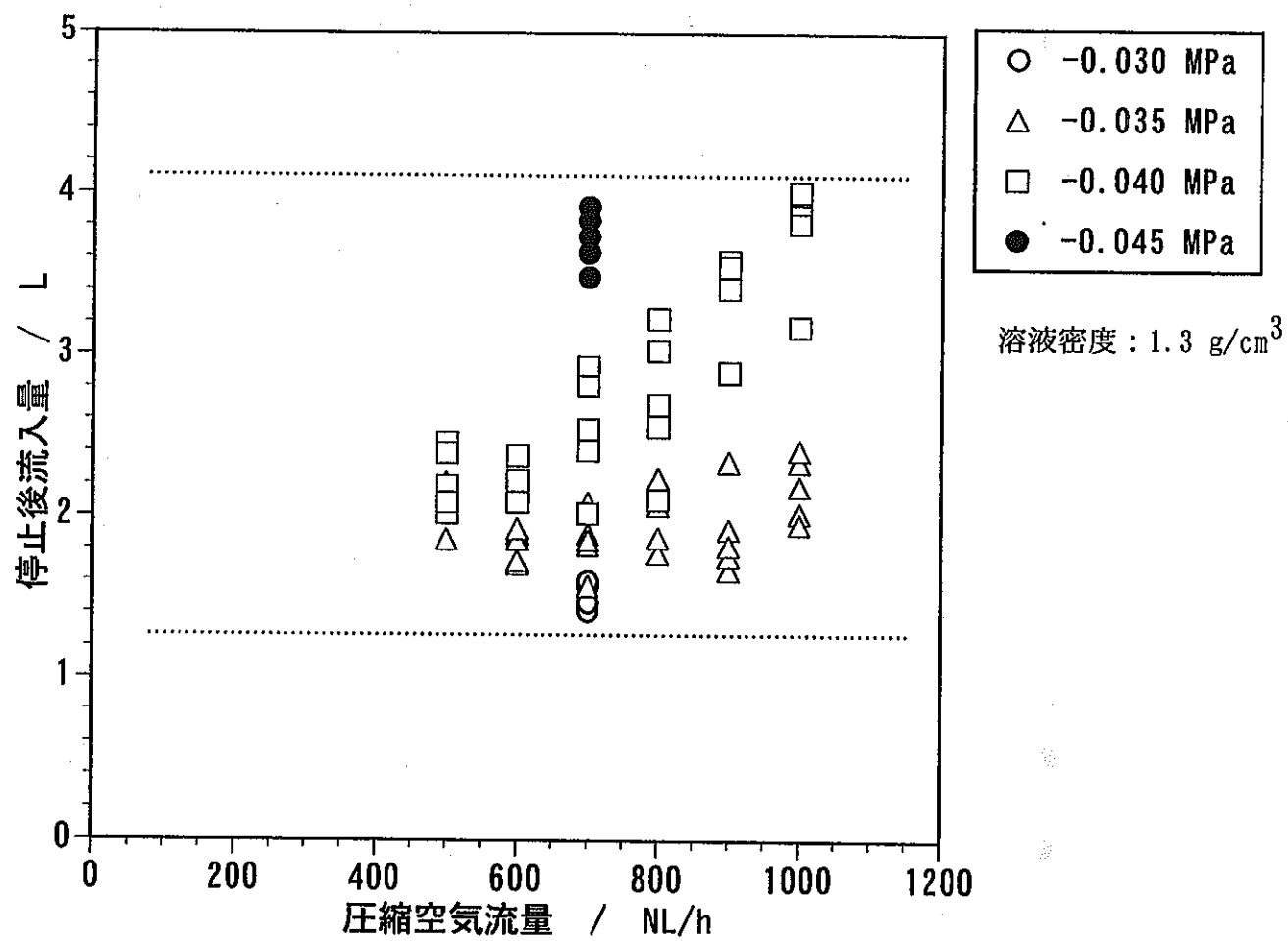


図5.6.4-4 圧縮空気流量と停止後流入量の関係 (溶液密度 : 1.3 g/cm³)

5.6.5 試験結果の検討

送液精度評価を目的として送液停止操作後の流入量の測定を実施した。

プルトニウム転換技術開発施設における定常状態のエアリフトポンプの運転条件は、圧縮空気重量 700NL/h、真空度 -0.035MPa ～ -0.040MPa （他工程での真空系の使用状況により変動する）であることから、

- ① 上記の Pu 転換施設での運転条件
- ② 本試験での運転条件

の2条件で送液停止操作後の流入量の評価を実施した。

各溶液密度における送液停止操作後の流入量の変化を表 5.6.5-1 に示す。

表 5.6.5-1 送液停止操作後の流入量の変化

		溶液密度 (g/cm ³)			
		1.0	1.1	1.2	1.3
送液停止 操作後の 流入量	条件① (Pu 転換施設での運 転条件の範囲)	3.0～4.0L	2.2～3.5L	2.2～3.0L	1.6～3.0L
	条件② (本試験での運転条 件の範囲)	2.2～4.4L	2.2～4.7L	2.2～4.1L	1.4～4.0L

流入量がゼロでなくても常に一定であれば、その流入量を見込んで送液停止操作を行うことによって精度良く予定量の送液を行うことが可能である。すなわち、各送液条件における送液停止操作後の流入量の最大値と最小値との変動幅が、送液精度に直接影響を及ぼす因子と考えられる。つまり、その幅が大きいほど送液精度が悪いということになる。

そこで、表 5.6.5-1 より最大値と最小値との変動幅 (=最大値-最小値) を算出した。その結果を表 5.6.5-2 に示す。

表 5.6.5-2 送液停止操作後の流入量の変動幅 (=最大値-最小値)

		溶液密度 (g/cm ³)			
		1.0	1.1	1.2	1.3
送液停止操作 後の流入量	条件①	1.0L	1.3L	0.8L	1.4L
	条件②	2.2L	2.5L	1.9L	2.6L

Pu 転換施設の運転条件を模擬した条件①では、その変動幅は 0.8~1.4L であり、溶液密度の依存性は得られていない。

また、今回の測定条件である条件②では、その変動幅は 1.9~2.6L であり、やはり溶液密度に関する依存性は見られていない。

条件①は条件②に含まれているので、当然ながら、その変動幅は条件②の場合の方が大きくなっている。

表 5.6.5-2 に示す送液停止操作後の流入量の変動幅を最小にすることによって、送液精度の向上が期待される。

本測定結果より、

① 送液条件（圧縮空気流量、真空度等）を一定に保つ

ことにより、流入量の変動幅を最小にすることができるが、試験結果に示すように、同一の送液条件においても 1L 前後の流入量のばらつきが観察されており、仮に、送液条件（圧縮空気流量、真空度等）を一定に保つことができても、Pu 転換施設での送液条件（条件①）からの飛躍的な送液精度向上は期待できないと考えられる。

もう一つの方法として、

② 送液停止操作後の流入量をゼロにする

ことが考えられる。

本エアリフトポンプの特性上、送液するためには溶液受け側の配管の下端は溶液中に入っていなければならない。（液封されていないとエアリフトセパレータの真空度が上がらなくなる）したがって、送液中には、溶液受け側の配管中には真空度に応じて一定量の溶液が受け槽から吸い上げられていることになり、

送液停止操作後の流入量をゼロにすることは、装置の特性上きわめて困難であると考えられる。

各送液パラメータの影響を以下に示す。

(1) 溶液密度

溶液密度 1.0g/cm^3 の場合は、圧縮空気流量を変化させても停止後流入量はほぼ一定値（約 3.4L ）を中心に一定幅（約 0.8L ）を保持しているのに対して、溶液密度 $1.1\sim 1.3\text{g/cm}^3$ の場合は、圧縮空気流量を変化に依存して停止後流入量変動しており、その変動幅も比較的大きくなっている。

(2) 圧縮空気流量

溶液密度 1.0g/cm^3 の場合は圧縮空気流量を変化させても停止後流入量はほぼ一定値（約 3.4L ）を中心に一定幅（約 0.8L ）を保持している。また、溶液密度 $1.1\sim 1.3\text{g/cm}^3$ の場合には、真空度 -0.040MPa の場合は、空気流量に依存して流入量が増加しているものの、真空度 -0.035MPa の場合は、空気流量に依存せずほぼ一定である。

(3) 真空度

一定圧縮空気流量 (700NL/h) においては、いずれの溶液密度においても、真空度が深い（真空度の値の絶対値が大きい）ほど停止後流入量が多いことが分かる。

これは、真空度が深いほど、送液中に受け槽側の配管中に吸い上げられている溶液量が多いことによるものであると考えられる。

ここで、真空度 ($-a\text{MPa}$) と真空度 ($-b\text{MPa}$) による液頭高さ相違は、 $(a>0, b>0, b>a)$ とする)

$$h(\text{cm}) = (b-a) \times 1.03416 \times 10^4$$

なので、

比重 ρ (g/cm^3) の溶液の真空度の相違による溶液吸い上げ量の相違 (ΔV)

は、配管内径が 2.8cm より、

$$\Delta V = \rho \times (2.8/2)^2 \times \pi \times (b-a) \times 1.03416 \times 10^4$$

となる。

$$a = -0.035 \text{ MPa}$$

$$b = -0.040 \text{ MPa}$$

$$\rho = 1.000 \text{ g/cm}^3$$

を代入すると、

$$\Delta V = 1.000 \times (2.8/2)^2 \times \pi \times (0.040 - 0.035) \times 1.03416 \times 10^4$$

$$\Delta V = 318.4 \text{ cm}^3 = 0.3184 \text{ L}$$

となり、試験結果（図 5.6.4-1 参照）とほぼ一致する。

5.6.6 まとめ

送液停止操作後の流入量の測定を実施し、以下のことが明らかになった。

- ① 本試験条件での、送液停止操作後の溶液の流入量は1.4~4.7Lである。
- ② 同一の試験条件においても送液停止操作後の流入量には1L前後のばらつきがあり、送液試験条件を一定に保っても、現在の送液方法・手順及び装置体系では、この変動幅よりも精度良く送液を実施することは不可能である。
- ③ 真空度の変化による停止後流入量の変化は、送液中の配管中への吸い上げ量の変化の依存性が大きい
- ④ 圧縮空気流量の影響は、溶液密度 $1.1\sim 1.3\text{g/cm}^3$ 、真空度 -0.040MPa の条件で顕著であるが、真空度 -0.035MPa の場合には圧縮空気流量の影響が顕著には現れていない。

以上の試験結果より、本装置体系及び送液方法では、同一送液条件においても、送液停止操作後の流入量にはかなりのばらつきがあるために、このばらつき範囲よりも高い精度での送液は不可能であることが明らかになった。

したがって、送液精度の向上のためには、

- ① 装置の改造
- ② 送液手順の検討

が必要不可欠であり、次項で、上記①及び②について検討していくこととする。

6. 試験装置の改造

6.1 目的

既設工程の調査およびモックアップ送液試験より、

- ① 既設工程の調査より、現状の Pu/U 溶液混合精度は、ほぼ±5.0%の誤差範囲内にあるが、ショートプロセスの目標値(±2.5%以内)をクリアしていない
- ② モックアップ装置を使用した送液試験より、エアリフトポンプを使用した溶液移送は、試験条件にも依るが溶液移送が脈動的になり、その結果、送液停止操作後の溶液の流入量にばらつきが生じる
- ③ 停止後の流入量のばらつきが、送液量の制御を困難にする原因の一つである

ことが明らかになった。

したがって、本項では、ショートプロセスの目標である「プルトニウム濃度を任意の Pu 富化度に対して±2.5%の誤差範囲内で調整できること」を達成するための案を提案し、実際にその案に沿って送液試験を行い、送液データに基づいて Pu/U 溶液混合精度を算出し、ショートプロセス目標値の達成の可否を評価・検討することを目的とする。

6.2 改造検討

6.2.1 改造案の提案

上記目的を達成するためには、送液方法の変更、エアリフトポンプの安定化及び既存設備の一部改造等の改造が必要であるものと考えられ、各々についての検討を実施し、そのうちで最も良いと思われる案について、試験を実施した。

① 送液方法の変更

エアリフトポンプの使用を止め、定量ポンプにて硝酸プルトニウム溶液を移送する。

② エアリフトポンプの安定化

モックアップ送液試験より、真空度に 10~20 秒周期の脈動が観察され、

それに伴い各槽内の溶液量の増減にも脈動が観察されている。この脈動流がエアリフトポンプの定量性に悪影響を及ぼしているものと考えられるため、何らかの方法により、この脈動を無くし、エアリフトポンプの運転を安定化させ、定量性を高める。

③ 既存設備の一部改造

硝酸プルトニウム溶液の送液ラインに定量槽の追加を提案する。

混合溶液調整時には、まず、エアリフトで送液量の制御可能な範囲で目的量よりも少ない量の Pu 溶液を供給する。次に、定量槽を使用し少量の Pu 溶液を供給することにより Pu/U 比の微調整を実施し、最終的に目的量の硝酸プルトニウム溶液を精度良く送液する。

この時の少量の硝酸プルトニウム溶液の供給が追加設置した定量槽により可能となる。

6.2.2 改造案の検討

上記 6.2.1 項で提案した改造案について、それぞれ検討を実施した。

① 送液方法の変更

原子力施設では、作業員の被ばく及び施設の保守・保全の観点から、エアリフトポンプが頻繁に使用されている。本プルトニウム転換技術開発施設においても、上記の観点から、施設の設計段階においてエアリフトポンプによる溶液移送が採用され、実際に使用されている。

定量ポンプの使用により、ショートプロセスにおける燃料仕様を満足する溶液混合が可能になる可能性は高いものの、定量ポンプによる送液はモータ一部、電磁弁等の駆動部を必要とし、その駆動部が故障する可能性も有り、また、定期的な保守が必要となるため、硝酸 Pu 溶液の送液には不適であると考えられる。

② エアリフトポンプの安定化

エアリフトポンプの脈動流については、他の試験⁽⁹⁾でも観察されており、バッファータンクを設ける等により、真空度の変動を小さくすることにより、変動の振幅を減少させることはできるとしても、エアリフトの特性上、脈動

をゼロにすることはかなり難しいものと考えられる。

③ 既存設備の一部改造

既存設備の一部改造として定量槽の追加設置が提案されている。可動部として数個のバルブが必要となるが、後に示すが比較的簡単な改造で済み、また、目標の送液精度を満足することが可能になると予想される。

上記の検討結果より、次項より、③の定量槽の追加設置についての検討を実施することにした。

6.2.3 定量槽構造の検討

本項では、6.2.2項で採用した定量槽について、その構造を検討した。追加設置する定量槽の構造として、以下の2種類を考えた。

① オーバーフロー型定量槽

定量槽本体に数本のオーバーフローラインが取り付けられており、そのオーバーフローラインのバルブの開閉により、予め設定した数種類の液量を定量的に送液できるような構造であり、構造が単純でメンテナンス箇所が少ない長所があるものの、予め設定した一定量の溶液しか追加送液することができない欠点がある。

② 液位計型定量槽

定量槽本体に液位計が取り付けられており、定量槽で任意の量の溶液が計測された後に追加送液される。任意の量の溶液を追加送液できるものの、液位計の酸及び放射線に対する信頼性に問題があり、液位計が故障した場合には定量槽としての機能が完全に失われる危険性がある。

オーバーフロー型定量槽および液位計型定量槽の概念図を図6.2.3-1に示す。また、それぞれの長所、短所を以下に示す。

本試験では、②の液位計を利用した定量槽においては、いずれのタイプの液位計を使用するとしても、液位計本体が長時間、酸や放射線に曝される環境において使用された場合に、液位計本体の信頼性を確認するための予備試験が必要となることが予想される。

したがって、本件では、上記案の中から①のオーバーフロー型定量槽を採用することとし、定量槽の製作、モックアップ装置への追加設置、その性能の確認を実施することにした。

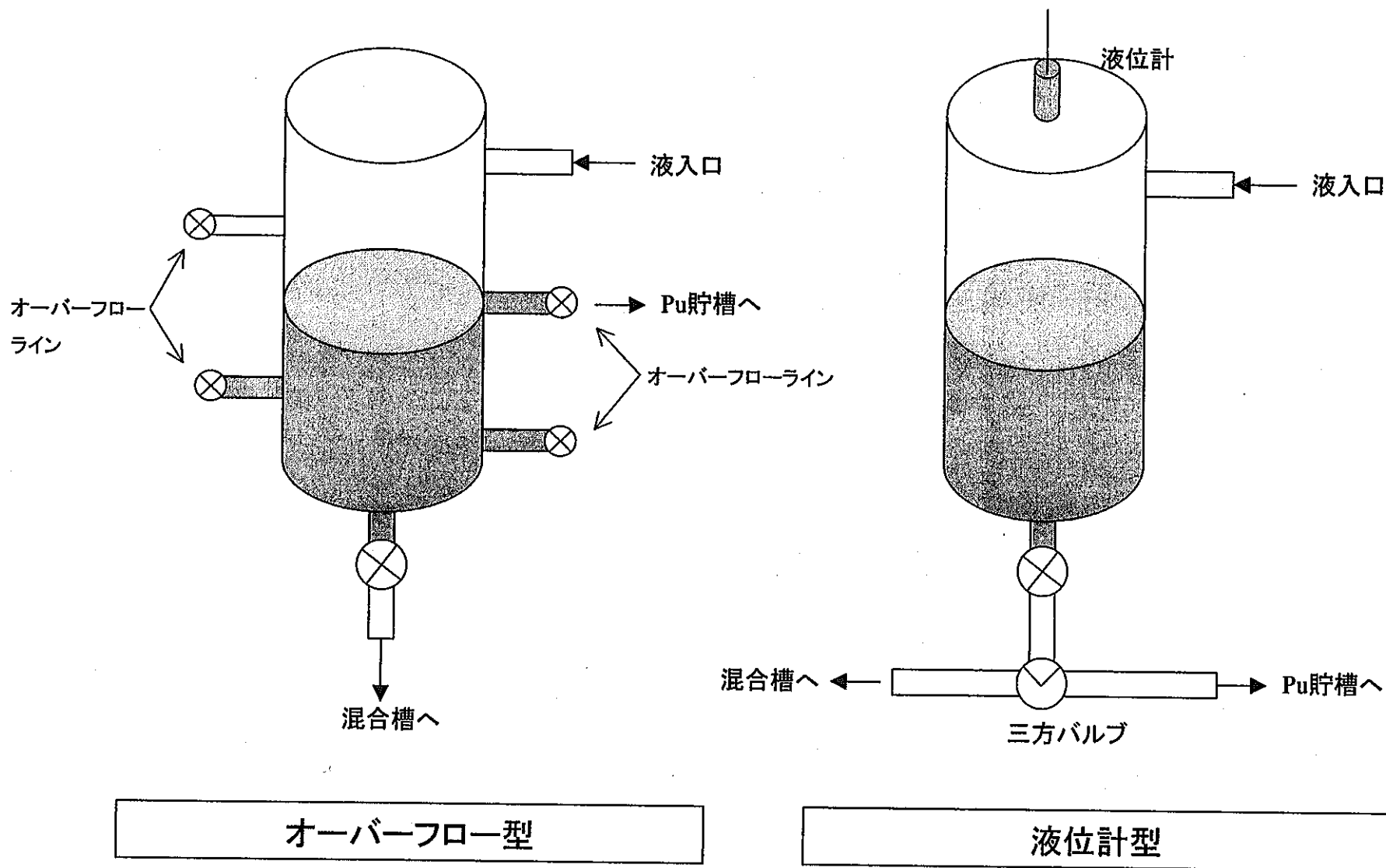


図6.2.3-1 定量槽の概念図

6.3 試験装置および方法

6.3.1 試験の概要

6.2 項で検討した定量槽を製作・設置し、設置後の溶液移送精度を評価・検討するために、装置改造後に以下に示す 2 項目の試験を実施した。

① 定量槽の性能確認

オーバーフローライン型定量槽を使用して、少量(1, 2, 4 および 8L)の送液を実施し、定量槽で実際に送液可能な液量を確認する。また、本試験によりバルブ操作等の送液手順の確認や本定量槽を使用した少量の送液に関する問題点を摘出する。

② 定量槽設置後の送液挙動確認試験

定量槽を追加したことにより、配管内容積が変化し、停止後の流入量等の送液挙動が変わる可能性がある。よって、定量槽の追加がエアリフトの送液挙動に及ぼす影響を確認するため、実機の基本運転条件(真空度 -0.035MPa 、圧空流量 700NL/h)で送液を実施し、送液挙動データを取得し、改造前の送液挙動データと比較する。

6.3.2 試験装置

(1) 定量槽

オーバーフロー型定量槽の図面を図 6.3.2-1 に、オーバーフロー型定量槽の写真を図 6.3.2-2 及び図 6.3.2-3 に示す。本定量槽は、送液中の様子が目視観察できるようにアクリル製とした。

また、この製作した定量槽には 1L、2L、4L および 8L の溶液を定量的に送液できるようなオーバーフローラインを設置した。

定量槽の仕様を以下に示す。

[仕様]

形状： $140\text{mm}^{\text{OD}} \times 130\text{mm}^{\text{ID}} \times 910\text{mm} / 970\text{mm}$

材質：アクリル製

ボールバルブ(600UTK15A) × 4

ボールバルブ(600UTK20A) × 1

本定量槽設置後の試験装置の全体図を図 6.3.2-4 に示す。

本定量槽は、送液ライン中のエアリフトセパレーターの下流側に設置される。定量槽から水平に伸びる各オーバーフローラインにはボールバルブが取り付けられ、それらの各バルブの開閉により、目的量 (1L、2L、4L 及び 8L) の送液を定量的に行うことができる。また、オーバーフローした溶液は、模擬 Pu 貯槽 (送り側の槽) に戻る構造となっている。

(2) 秤量器

定量槽から定量的に供給される溶液量については、溶液重量及び溶液密度を測定することにより実施した。

性能確認に使用した秤量器の仕様を以下に示す。

[仕様]

名称：METTLER TOLEDO 社製 上皿電子天秤

型式：SG16001

性能：秤量 16100 (g)、最小表示 0.1g

6.3.3 試験方法

(1) 定量槽の性能確認

定量槽をエアリフト本体に設置後、定量槽で送液可能な液量を測定する。試験手順を以下に示す。

- ① 実機の基本運転条件 (真空度 -0.035MPa 、圧空流量 700NL/h) で送液を実施し、定常的にオーバーフローラインから模擬 Pu 貯槽へ溶液が戻ることを確認する。
- ② 送液停止。
- ③ オーバーフローラインからの溶液流出が停止したことを確認する。
- ④ 定量槽下部バルブを開け、定量槽内の溶液を容器で受け、その重量を秤量器を用いて測定し、あらかじめ測定してある溶液密度より、溶液量

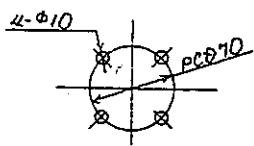
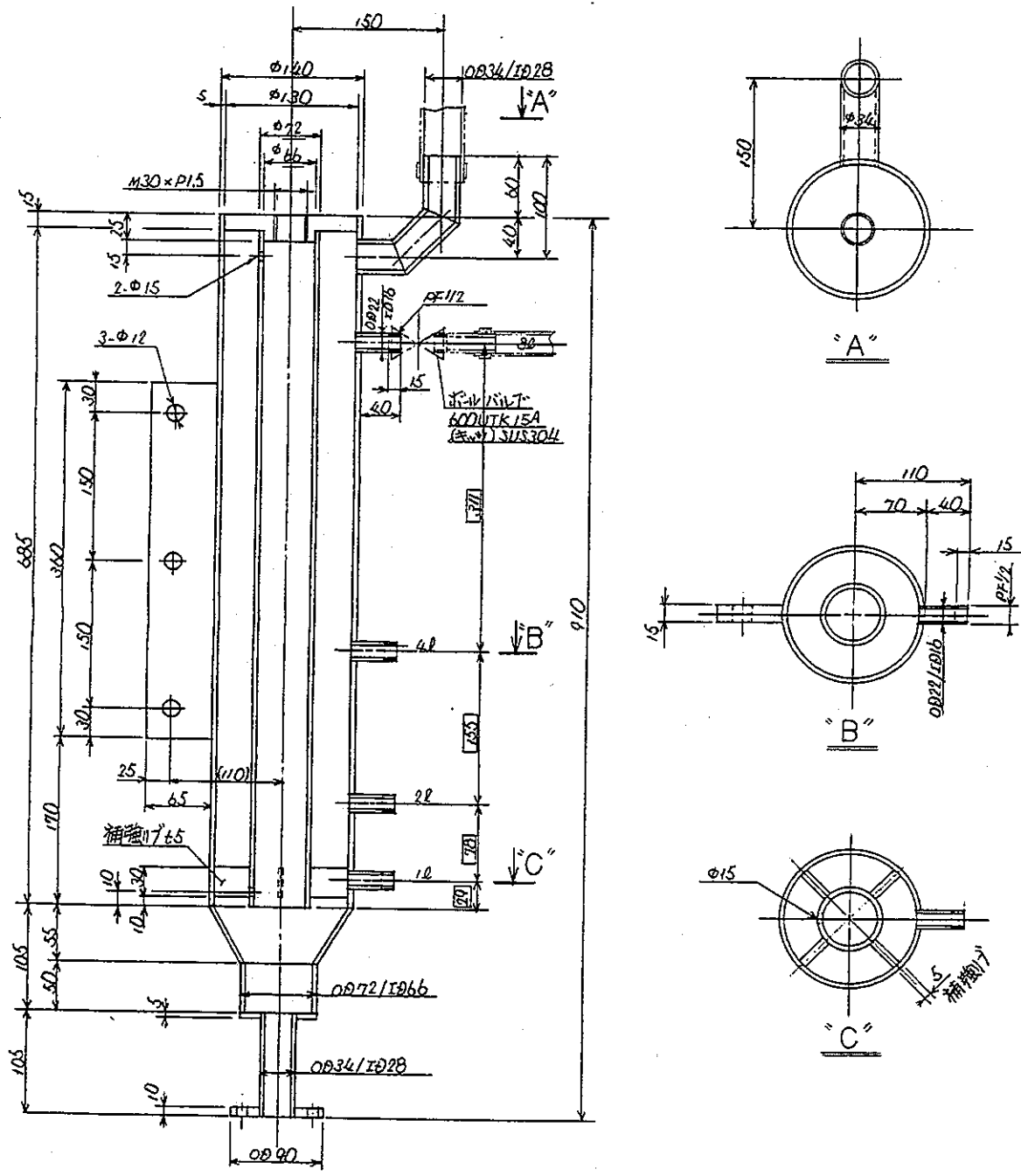
を算出する。

- ⑤ ①～④の操作を 1L、2L、4L および 8L の 4 本のオーバーフローライン
に対して、それぞれ 5 回ずつ実施する。

(2) 定量槽設置後の送液挙動確認試験

定量槽の追加がエアリフトの送液挙動に及ぼす影響を確認するため、実機
の基本運転条件(真空度 -0.035MPa 、圧空流量 700NL/h)で送液を実施する。

試験内容及び手順等は、5.5 項の送液特性把握試験と同様である。



注意
 □ 内寸法は参考寸法を示す
 1/2 取付時は実容積音測の上決定の上。

① 定量槽本体詳細

图6.3.2-1 定量槽本体图面

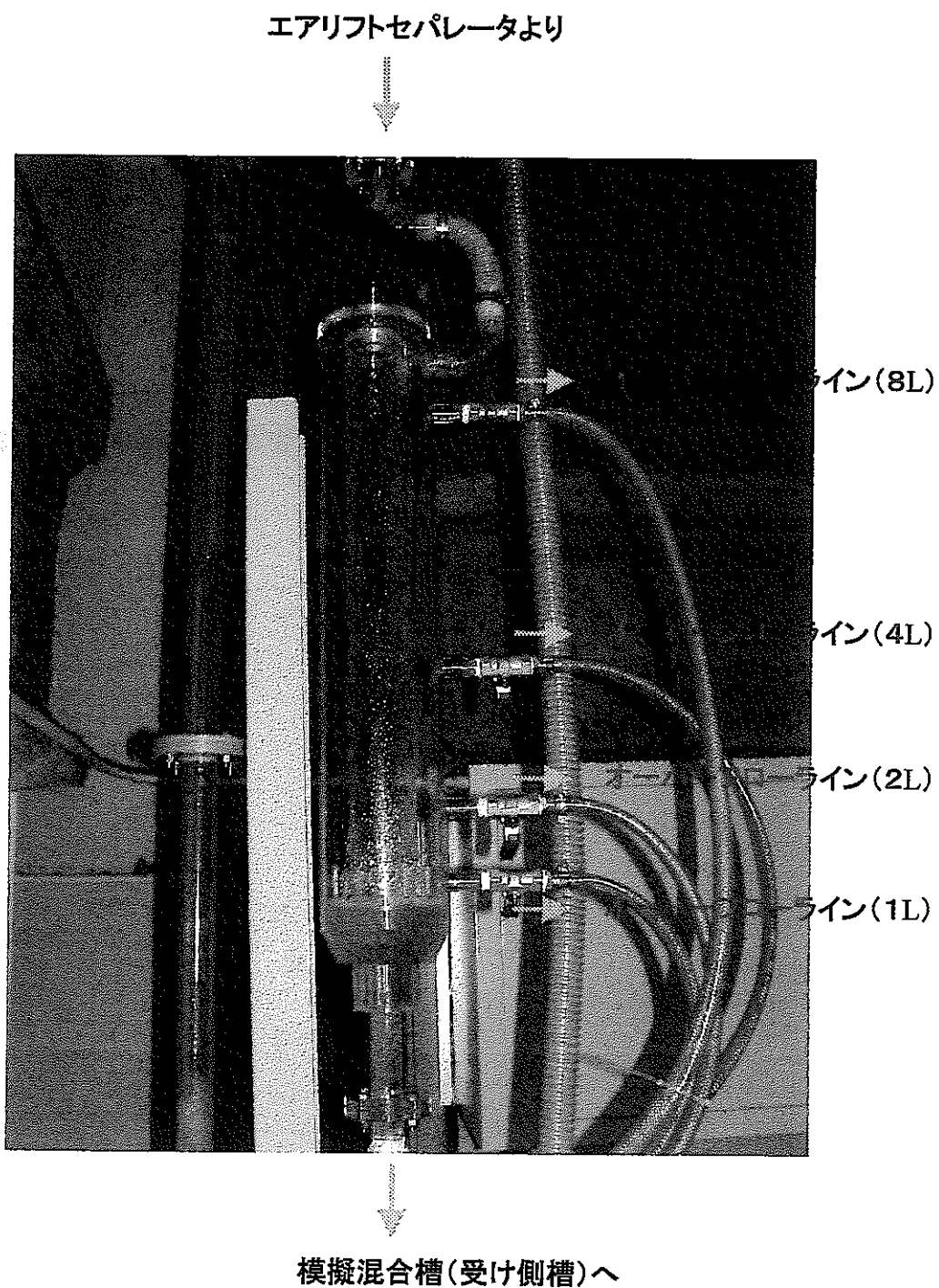
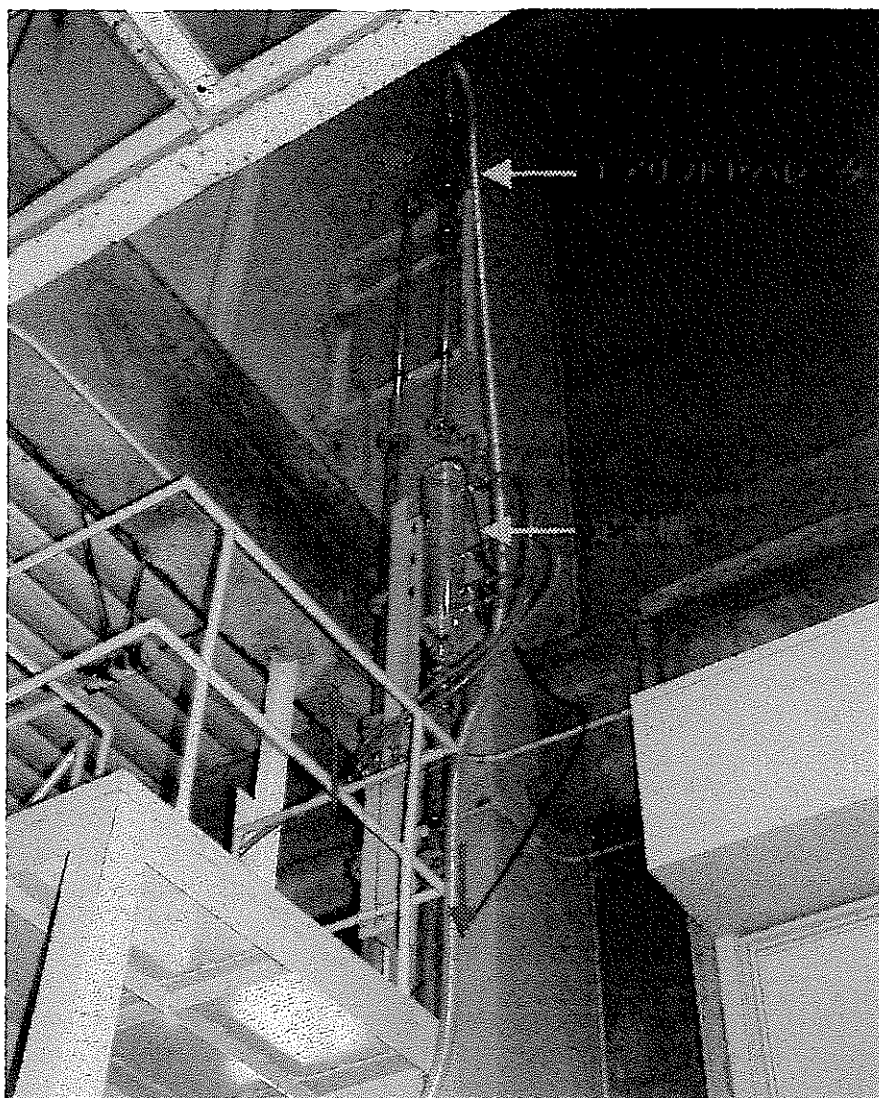


図6.3.2-2 定量槽の外観写真



→ : 溶液の流れ方向

図6. 3. 2-3 定量槽の設置状況の写真

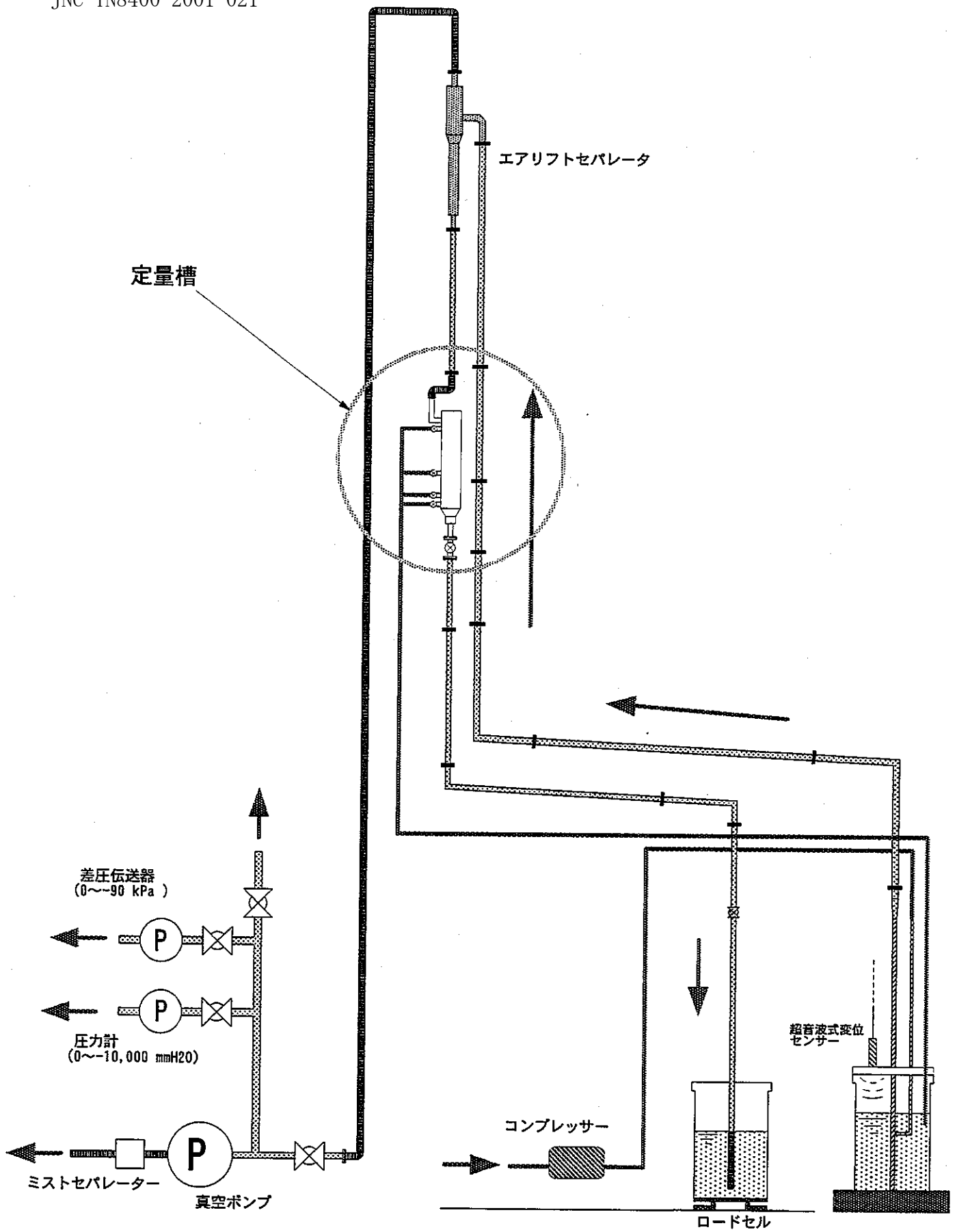


図6.3.2-4 試験装置全体の構成図 (改造後)

6.4 試験結果

6.4.1 定量槽の性能確認

定量槽を使用した溶液移送の定量性を確認するために、定量槽下部のバルブを閉め、定量槽の各オーバーフローラインに取り付けられたバルブを開放し、溶液を完全にオーバーフローさせた後に、定量槽下部のバルブを開放し、受け側の槽に流れ込む溶液量を測定した。また、測定は再現性を確認するために、各溶液量に対して測定を5回ずつ実施した。

性能確認試験結果を表 6.4.1-1 に示す。この結果より、いずれの目標送液量に対しても、送液量の平均値からのばらつきは、数mL 程度である。また、表 6.4.1-1 に示すように、平均値からの偏差は $\pm 0.005\text{L}$ 以内にあることが分かる。

表 6.4.1-1 定量槽の性能確認試験結果

目標送液量	送液量 (L)	平均値 (L)	平均値からの偏差
1 L	1.009 L	1.008 L	0.001 L
	1.006 L		-0.002 L
	1.010 L		0.002 L
	1.008 L		0
	1.008 L		0
2 L	2.051 L	2.055 L	-0.004 L
	2.060 L		0.005 L
	2.055 L		0
	2.055 L		0
	2.055 L		0
4 L	4.064 L	4.066 L	-0.002 L
	4.069 L		0.003 L
	4.065 L		-0.001 L
	4.065 L		-0.001 L
	4.065 L		-0.001 L
8 L	8.041 L	8.038 L	0.003 L
	8.037 L		-0.001 L
	8.034 L		-0.004 L
	8.037 L		-0.001 L
	8.039 L		0.001 L

6.4.2 定量槽設置後の送液挙動確認試験

定量槽追加前後の送液挙動データを図 6.4.2-1 にそれぞれ示す。溶液密度、真空度及び圧縮空気流量等の試験条件は、定量槽追加前後で同じである。

この結果より、改造後は送液速度が若干遅くなっていることを除き、その他のデータはほぼ同様であり、定量槽追加による送液挙動の変化は見られないことが明らかである。

ここで、送液速度が若干遅くなっている理由は、送り側の溶液槽中の溶液量の変動（気液界面の変動）に伴い、送液中の真空度が若干変動していること、また、変動した真空度の調整が手動によるバルブ開度の調整によるものであると考えられる。

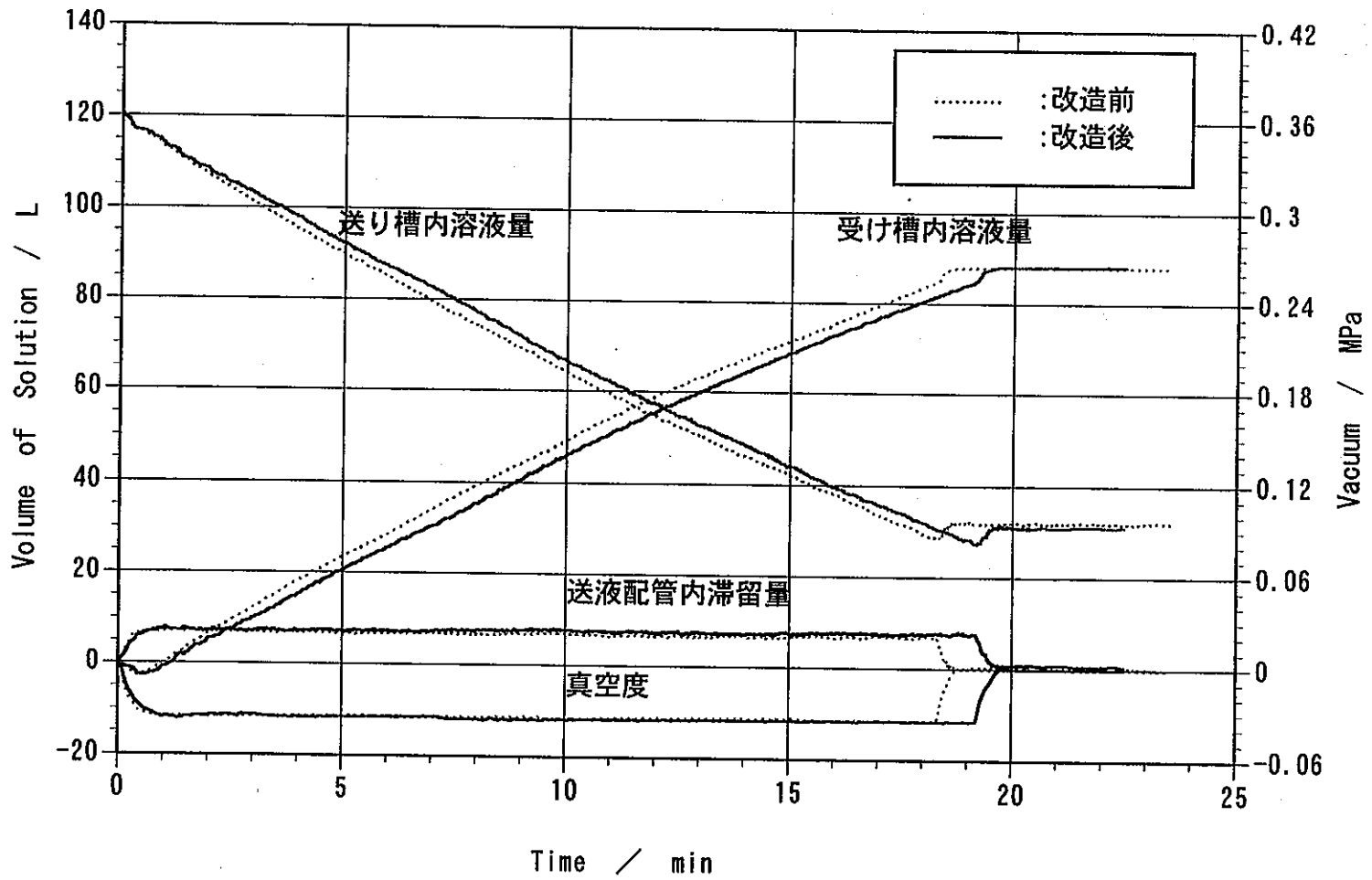


図6.4.2-1 送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化

(溶液密度 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 、真空度 -0.035MPa 、圧空流量 $700\text{NL}/\text{h}$)

6.5 試験結果の検討

定量槽追加後の送液試験結果より、エアリフトポンプ及び定量槽を使用した送液で溶液量の微調整が可能となることが明らかになった。

そこで、本項では、エアリフトポンプ及び定量槽を使用した送液について、送液量の精度評価を実施した。

エアリフトポンプ及び定量槽を使用する場合の、混合溶液の調整手順（案）は以下の通りであり、始めに、硝酸ウラニル溶液が供給された後に、必要量より若干少ない量の硝酸プルトニウム溶液が供給され、最終的に定量槽を使用して、微量の硝酸プルトニウム溶液が追加供給される。

Pu/U 混合溶液調整手順を以下に示す。

- ① 硝酸ウラニル溶液の濃度を測定する。
- ② ポンプを使用して硝酸ウラニル溶液を送液する。
- ③ 送液した硝酸ウラニル量を測定する。
- ④ 硝酸プルトニウム溶液濃度を測定する。
- ⑤ ①及び③の測定結果より、硝酸プルトニウム溶液の必要量を算出する。
- ⑥ エアリフトポンプにて硝酸プルトニウム溶液を送液する。

（ここでは、⑤で算出した目標値よりも若干少ない量の溶液を供給する）

- ⑦ 送液された硝酸プルトニウム溶液の量を測定する
- ⑧ ⑤の目標値及び⑦の溶液量の測定結果より、硝酸プルトニウム溶液の不足量を算出する。
- ⑨ 不足量に見合う量を定量槽で供給する。
- ⑩ 最終的な混合溶液の量を測定する。

上記の調整手順を基に Pu/U 溶液混合を実施した場合の送液精度を、以下の仮定の基に検討した。

- ① 硝酸プルトニウムの送液目標量は 85.1L^(注) とする。
- ② エアリフトポンプでは、目標量から 10L 差し引いた量である 75.1L～目標量 (85.1L) の範囲での送液は実施可能である。
- ③ 定量槽による送液誤差は、送液量 (1L, 2L, 4L 及び 8L) に依らず 1 回の定量送液に当たり 0.005L とする。(6.4.1 項参照)

- ④ 槽内の溶液量の計測誤差は0.19%とする。(3.4.1項参照)
- ⑤ 定量槽による追加供給は、最終的な溶液供給量が目標量に最も近くなるように実施する。(したがって、最終的な供給量が目標量を上回ることもある)
- ⑥ 定量槽による追加供給は、供給回数が最小になるように実施する。

上記の仮定の基で検討した結果を表6.5-1に示す。

表6.5-1には、エアリフトポンプを使用した初期供給量、目標値との差、各々の定量槽による追加供給回数、最終溶液量及び最終溶液量と目標値との差を示してある。

初期の溶液量にも依るが、最大3回までの定量槽による追加供給を実施することで、送液量を±0.5Lの範囲で目標値に近づけることが可能であることが分かる。

定量槽供給による誤差は、上記仮定の③より±0.005Lであるので、最大3回の定量槽による追加供給を実施した場合には、誤差は $0.0087\text{L} (= \{3 \times (0.005)^2\}^{1/2})$ となる。

したがって、定量槽使用による溶液供給の誤差は、送液目標値(85.1L)に対して、最大±0.5087L ($0.5087/85.1 \times 100 = 0.60\%$)であることが分かる。

ここで、追加供給量はエアリフトポンプによる初期送液量を基に決定されるが、この初期送液量の測定には0.19%の測定誤差(80Lに対して0.152L)が含まれていることになる。しかしながら、定量槽による追加供給が1L刻みであり、溶液量の測定誤差が追加供給量の刻みと比較して小さいことから、ここでの測定誤差の影響は無視することとする。

注) 硝酸プルトニウム溶液濃度：208.3gPu/L

硝酸ウラニル溶液濃度：360gU/L

Pu/U = 3/7

混合溶液の量：200L

とおくと、

$$x + y = 200$$

$$(208.3 \times x) / (360 \times y) = 3:7 \text{ より}$$

$$x = \underline{85.1 \text{ L}} \text{ となる。}$$

表6.5-1 オーバーフロー式定量槽を使用した溶液調整検討結果 (その1)

エアリフトポンプ による 初期送液量 (L)	目標値との差 (目標値:85.1L) (L)	定量槽による追加供給 供給回数				最終溶液量 (L)	目標値との差 (L)
		1L (回)	2L (回)	4L (回)	8L (回)		
75.1	10.0		1		1	85.1	0.0
75.2	9.9		1		1	85.2	0.1
75.3	9.8		1		1	85.3	0.2
75.4	9.7		1		1	85.4	0.3
75.5	9.6		1		1	85.5	0.4
75.6	9.5	1			1	84.6	-0.5
75.7	9.4	1			1	84.7	-0.4
75.8	9.3	1			1	84.8	-0.3
75.9	9.2	1			1	84.9	-0.2
76.0	9.1	1			1	85.0	-0.1
76.1	9.0	1			1	85.1	0.0
76.2	8.9	1			1	85.2	0.1
76.3	8.8	1			1	85.3	0.2
76.4	8.7	1			1	85.4	0.3
76.5	8.6	1			1	85.5	0.4
76.6	8.5				1	84.6	-0.5
76.7	8.4				1	84.7	-0.4
76.8	8.3				1	84.8	-0.3
76.9	8.2				1	84.9	-0.2
77.0	8.1				1	85.0	-0.1
77.1	8.0				1	85.1	0.0
77.2	7.9				1	85.2	0.1
77.3	7.8				1	85.3	0.2
77.4	7.7				1	85.4	0.3
77.5	7.6				1	85.5	0.4
77.6	7.5	1	1	1		84.6	-0.5
77.7	7.4	1	1	1		84.7	-0.4
77.8	7.3	1	1	1		84.8	-0.3
77.9	7.2	1	1	1		84.9	-0.2
78.0	7.1	1	1	1		85.0	-0.1
78.1	7.0	1	1	1		85.1	0.0
78.2	6.9	1	1	1		85.2	0.1
78.3	6.8	1	1	1		85.3	0.2
78.4	6.7	1	1	1		85.4	0.3
78.5	6.6	1	1	1		85.5	0.4
78.6	6.5		1	1		84.6	-0.5
78.7	6.4		1	1		84.7	-0.4
78.8	6.3		1	1		84.8	-0.3
78.9	6.2		1	1		84.9	-0.2
79.0	6.1		1	1		85.0	-0.1
79.1	6.0		1	1		85.1	0.0
79.2	5.9		1	1		85.2	0.1
79.3	5.8		1	1		85.3	0.2
79.4	5.7		1	1		85.4	0.3
79.5	5.6		1	1		85.5	0.4
79.6	5.5	1		1		84.6	-0.5
79.7	5.4	1		1		84.7	-0.4
79.8	5.3	1		1		84.8	-0.3
79.9	5.2	1		1		84.9	-0.2

表6.5-1 オーバーフロー式定量槽を使用した溶液調整検討結果 (その2)

エアリフトポンプ による 初期送液量 (L)	目標値との差 (目標値:85.1L) (L)	定量槽による追加供給 供給回数				最終溶液量 (L)	目標値との差 (L)
		1L (回)	2L (回)	4L (回)	8L (回)		
80.0	5.1	1		1		85.0	-0.1
80.1	5.0	1		1		85.1	0.0
80.2	4.9	1		1		85.2	0.1
80.3	4.8	1		1		85.3	0.2
80.4	4.7	1		1		85.4	0.3
80.5	4.6	1		1		85.5	0.4
80.6	4.5			1		84.6	-0.5
80.7	4.4			1		84.7	-0.4
80.8	4.3			1		84.8	-0.3
80.9	4.2			1		84.9	-0.2
81.0	4.1			1		85.0	-0.1
81.1	4.0			1		85.1	0.0
81.2	3.9			1		85.2	0.1
81.3	3.8			1		85.3	0.2
81.4	3.7			1		85.4	0.3
81.5	3.6			1		85.5	0.4
81.6	3.5	1	1			84.6	-0.5
81.7	3.4	1	1			84.7	-0.4
81.8	3.3	1	1			84.8	-0.3
81.9	3.2	1	1			84.9	-0.2
82.0	3.1	1	1			85.0	-0.1
82.1	3.0	1	1			85.1	0.0
82.2	2.9	1	1			85.2	0.1
82.3	2.8	1	1			85.3	0.2
82.4	2.7	1	1			85.4	0.3
82.5	2.6	1	1			85.5	0.4
82.6	2.5		1			84.6	-0.5
82.7	2.4		1			84.7	-0.4
82.8	2.3		1			84.8	-0.3
82.9	2.2		1			84.9	-0.2
83.0	2.1		1			85.0	-0.1
83.1	2.0		1			85.1	0.0
83.2	1.9		1			85.2	0.1
83.3	1.8		1			85.3	0.2
83.4	1.7		1			85.4	0.3
83.5	1.6		1			85.5	0.4
83.6	1.5	1				84.6	-0.5
83.7	1.4	1				84.7	-0.4
83.8	1.3	1				84.8	-0.3
83.9	1.2	1				84.9	-0.2
84.0	1.1	1				85.0	-0.1
84.1	1.0	1				85.1	0.0
84.2	0.9	1				85.2	0.1
84.3	0.8	1				85.3	0.2
84.4	0.7	1				85.4	0.3
84.5	0.6	1				85.5	0.4
84.6	0.5					84.6	-0.5
84.7	0.4					84.7	-0.4
84.8	0.3					84.8	-0.3
84.9	0.2					84.9	-0.2
85.0	0.1					85.0	-0.1
85.1	0.0					85.1	0.0

6.6 試験結果のまとめ

試験結果のまとめを以下に示す。

- ① 提案したオーバーフロー型定量槽を実際に送液ラインに設置し、定量槽の機能を確認した。
- ② 定量槽による送液により、0.005mL/回の誤差範囲内で定量的に送液できることが明らかになった。
- ③ 本定量槽を既存エアリフトラインに追加し、追加設置前後で送液挙動を比較したが、送液挙動はほぼ同じであり、定量槽追加設置による悪影響は認められなかった。
- ④ 定量槽の追加により微量の Pu 溶液の追加送液が可能となり、エアリフトポンプとの組み合わせにより、溶液量に関して最大 0.60%の誤差範囲で送液できることが確認された。

6.7 Pu/U 溶液混合精度の評価

6.5 項までの検討により、既存設備にオーバーフロー型定量槽を追加設置することにより、1L 刻みであるが数 mL の誤差範囲で任意の量の溶液を追加供給できることが明らかになった。

そこで本項では、定量槽を利用した溶液移送 (Pu 富化度調整) 精度について、溶液量計量誤差、溶液濃度分析誤差及び定量槽使用による溶液計量誤差を考慮して評価・検討を実施する。

また、Pu 富化度及び溶液濃度をパラメータとして上記と同様の精度評価を実施し、Pu 富化度及び溶液濃度が Pu/U 混合精度に及ぼす影響について検討する。

6.7.1 前提条件

(1) Pu 富化度について

本件は Pu 富化度調整を目的として実施しており、厳密には ^{239}Pu の同位体 (^{238}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Pu 及び ^{242}Pu) 及び ^{241}Am などのフィッサイルを等価フィッサイル法⁽¹⁰⁾等を使用して考慮する必要があるが、簡単の為、ここでは、これらのフィッサイルの影響については考慮しないこととし、単純に混合溶液中の Pu/U 比についてのみ言及する。

(2) Pu 富化度について

ショートプロセスの目標は、任意の Pu 富化度に対し、 $\pm 2.5\%$ の誤差範囲内で調整できることである。そこで、本検討では、まず、Pu/Pu+U=0.3 (Pu 富化度 30%) の場合について(3)に示す基本溶液条件で検討を行い、その後、Pu 富化度、硝酸ウラニル溶液濃度及び硝酸プルトニウム溶液濃度が変化した場合の影響についても検討することにする。

(3) 基本溶液条件

硝酸プルトニウム溶液及び硝酸ウラニル溶液を使用して、混合溶液を調整するに当たって、それぞれの溶液の物性等は次の値を採用した。(溶液の濃度等は、設計条件を採用)

- ① 硝酸プルトニウム溶液
Pu 濃度：208.3g-Pu/L
硝酸濃度：6.8mol/L

- ② 硝酸U溶液
U 濃度：360g-U/L
硝酸濃度：0.84mol/L

- ③ 混合溶液条件
混合液量：200L/バッチ
Pu/U 比：3/7

(4) Pu/U 混合溶液調整方法

Pu/U 混合溶液調整手順は 6.5 節においても示したが、改めてここでも以下に記載する。

- ① 硝酸ウラニル溶液の濃度を測定する。
- ② ポンプを使用して硝酸ウラニル溶液を送液する。
- ③ 送液した硝酸ウラニル量を測定する。
- ④ 硝酸プルトニウム溶液濃度を測定する。
- ⑤ ①及び③の測定結果より、硝酸プルトニウム溶液の必要量を算出する。
- ⑥ エアリフトポンプにて硝酸プルトニウム溶液を送液する。
(ここでは、⑤で算出した目標値よりも若干少ない量の溶液を供給する)
- ⑦ 送液された硝酸プルトニウム溶液の量を測定する
- ⑧ ⑤の目標値及び⑦の溶液量の測定結果より、硝酸プルトニウム溶液の不足量を算出する。
- ⑨ 不足量に見合う量を定量槽で供給する。
- ⑩ 最終的な混合溶液の量を測定する。

(5) 分析誤差

3.4.2 節に示すように、硝酸プルトニウム溶液及び硝酸ウラニル溶液の濃度分析は、同位体希釈質量分析法により実施することとする。ランダム誤差

を含む誤差は、いずれの溶液に対しても 0.2%とする。

(6) 溶液量の測定誤差

3.4.1 節に示すように、槽内の硝酸プルトニウム溶液及び硝酸ウラニル溶液量の分析は、エレクトロマンメータを使用することとする。

その測定誤差は 0.19%とする。

(7) 硝酸プルトニウム溶液量の送液誤差

前項までの検討により、エアリフトポンプと定量槽を組み合わせた送液を実施することとする。85.1L の溶液移送量に対する誤差範囲は 0.60%である。

硝酸プルトニウム溶液・硝酸ウラニル溶液混合フローを図 6.7.1-1 に示す。

6.7.2 誤差の検討

Pu/U 混合溶液の Pu/U 比に関する誤差の検討は図 6.7.1-1 に示すフロー図に基づいて実施した。

(1) 硝酸ウラニル溶液

硝酸ウラニル溶液に関する誤差は、

① 硝酸ウラニル溶液の濃度分析誤差

② 硝酸ウラニル溶液量の測定誤差

である。

溶液中のウラン量は濃度と溶液量の積なので、ウラン量に関する誤差は、誤差率 (=誤差/測定値) の二乗平均である。

したがって、

$$(0.20^2 + 0.19^2)^{1/2} = 0.276 \% \dots\dots\dots (式 6.7.2-1)$$

となる。

(2) 硝酸プルトニウム溶液

図 6.7.1-1 に示す様に、硝酸プルトニウム溶液量は、予め送液された硝酸ウラニル溶液中のウラン量及び与えられた Pu 富化度（ここでは Pu/U 比）を基に算出される。

上記の通り、ウラン量には 0.276% の誤差を含んでおり、硝酸プルトニウム溶液の Pu 濃度測定の誤差は 0.20% なので、硝酸プルトニウム溶液の濃度に関する誤差は、

$$(0.276^2 + 0.20^2)^{1/2} = 0.341 \% \dots\dots\dots \text{(式 6.7.2-2)}$$

である。

また、6.5 節での検討により、エアリフトポンプとオーバーフロー式定量槽を併用した場合の送液量の誤差は最大±0.5087L であり、最終的な硝酸プルトニウム溶液の送液量の測定誤差は 0.19%（85.1L の送液に対して）であるので、硝酸プルトニウム溶液中の Pu 量に関する誤差は、

$$\begin{aligned} & [0.341^2 + \{[0.5087^2 + (85.1 \times 0.19/100)^2]^{1/2} / 85.1 \times 100\}^2]^{1/2} \\ & = 0.714 \% \dots\dots\dots \text{(式 6.7.2-3)} \end{aligned}$$

となる。

(3) Pu/U 混合溶液

上記の(1)及び(2)により、それぞれの溶液のウラン量及びプルトニウム量に関する誤差範囲が明らかになったので、それを基に混合溶液中の Pu/(Pu+U) 比に関する誤差を算出する。

Pu+U に関する誤差は、式 6.7.2-1 及び式 6.7.2-3 より、

$$\begin{aligned} & [\{0.276/100 \times 114.9 \times 360\}^2 + \{0.714/100 \times 85.1 \times 208.3\}^2]^{1/2} \\ & / (114.9 \times 360 + 85.1 \times 208.3) = 0.288 \% \dots\dots\dots (式 6.7.2-4) \end{aligned}$$

であるので、Pu/(Pu+U)比に関する誤差は、式 6.7.2-3 及び式 6.7.2-4 より、

$$(0.288^2 + 0.714^2)^{1/2} = 0.770 \% \dots\dots\dots (式 6.7.2-5)$$

となる。

式 6.7.2-5 に示す値は、3.3.1 項「ショートプロセスにおける Pu 富化度調整精度の目標（任意の Pu 富化度に対して 2.5%）」（Pu 富化度 30%ならば、 $2.5 \times 30/100 = 0.75\%$ ）を満足しておらず、再検討が必要である。

上記の検討により、定量槽からの供給による調整量の幅（上記検討例では 1L）に起因する誤差が大部分を占めることが明らかである。

そこで、オーバーフロー式定量槽のオーバーフローラインにさらに 0.5L のラインを追加したこととして（調整幅：0.5L）、上記の検討を再度実施した。

式 6.7.2-3 に対応する硝酸プルトニウム溶液中の Pu 量に関する誤差は、0.496%となり、式 6.7.2-4 に示す Pu+U に関する誤差は 0.244%となるため、最終的な誤差は、

$$(0.244^2 + 0.496^2)^{1/2} = 0.552 \% \dots\dots\dots (式 6.7.2-6)$$

となり、3.3.1 項「ショートプロセスにおける Pu 富化度調整精度の目標（任意の Pu 富化度に対して 2.5%）」（Pu 富化度 30%ならば、 $2.5 \times 30/100 = 0.75\%$ ）を満足する。

6.7.3 Pu 富化度および溶液濃度の影響

(1) Pu 富化度の影響

溶液濃度及び混合溶液の量を 6.7.1 項に示す基本条件に保ちながら、Pu 富化度が 0%~100%まで変化させた場合の Pu/U 比の調整精度を、6.7.2 項と同様のフローで検討した。

なお、オーバーフローラインが 1L、2L、4L 及び 8L の場合、及び 6.7.2 項と同様送液精度向上のために 0.5L のオーバーフローラインを追加した場合をそれぞれ検討した。

検討結果を表 6.7.3-1、表 6.7.3-2 および図 6.7.3-1 に示す。

図 6.7.3-1 より、Pu 富化度が 30%以下の場合、Pu 富化度の増加に従って Pu 富化度の調整精度は向上していることが分かる。これは、Pu 富化度が大きくなると硝酸プルトニウム溶液の送液量は増加するものの、硝酸プルトニウム溶液の供給量に関する誤差の幅は変化しないためである。

Pu 富化度が 50~70%で誤差は最小となり、それ以上の Pu 富化度では誤差はわずかに上昇している。

表 6.7.3-1 より、追加供給用の定量槽の刻み幅を小さくすることにより、Pu 富化度に関する誤差が小さくなっていることが分かる。

(2) 硝酸ウラニル溶液濃度の影響

硝酸プルトニウム溶液濃度、Pu 富化度及び混合溶液の量を 6.7.1 項に示す基本条件に保ちながら、硝酸ウラニル溶液濃度を 0~500g-U/L まで変化させた場合の Pu/U 比の調整精度を、6.7.2 項と同様のフローで検討した。

なお、オーバーフローラインが 1L、2L、4L 及び 8L の場合及び送液精度向上のために 0.5L のオーバーフローラインを追加した場合をそれぞれ検討した。

検討結果を表 6.7.3-3、表 6.7.3-4 および図 6.7.3-2 に示す。

図 6.7.4-2 より、硝酸ウラニル溶液濃度の増加に従って Pu/U 比の調整精度は上昇していることが分かる。これは硝酸ウラニル溶液濃度が増加すると、必要となる硝酸プルトニウム溶液の送液量は増加するものの、硝酸プルトニ

ウム溶液の供給量に関する送液誤差の幅が変化しないためである。

また、定量槽の刻み幅を小さくすることにより、Pu 富化度に関する誤差は、硝酸ウラニル濃度 150g-U/L 以上の範囲で、目標値を満足していることが分かる。

(3) 硝酸プルトニウム溶液濃度の影響

硝酸ウラニル溶液濃度、Pu 富化度及び混合溶液の量を 6.7.1 項に示す基本条件に保ちながら、硝酸プルトニウム溶液濃度を 0~500g-Pu/L まで、変化させた場合の Pu/U 比の調整精度を 6.7.2 項と同様のフローで検討した。

なお、オーバーフローラインが 1L、2L、4L 及び 8L の場合及び送液精度向上のために 0.5L のオーバーフローラインを追加した場合をそれぞれ検討した。

検討結果を表 6.7.3-5、表 6.7.3-6 および図 6.7.3-3 に示す。

図 6.7.3-3 より、硝酸プルトニウム溶液濃度の増加に従って Pu/U 比の調整精度は低下していることが分かる。これは、硝酸プルトニウム溶液濃度が増加すると、必要となる硝酸プルトニウム溶液の送液量は減少するものの、硝酸プルトニウム溶液の供給量に関する誤差の幅は変化しないためである。

図 6.7.3-3 より、定量槽に 0.5L のオーバーフローラインを追加していない場合には、硝酸プルトニウム溶液濃度が 190g-Pu/L 以下の場合に目標値を満足していることが分かる。また、定量槽に 0.5L のオーバーフローラインを追加した場合には、硝酸プルトニウム溶液濃度が検討対象の 0~500g-Pu/L の範囲で本件の目標値を満たしていることが分かる。

6.7.4 まとめ

これまでの検討より、エアリフトポンプとオーバーフローライン型定量槽を併用する装置では、Pu 供給量の微調整が可能となり、また、定量槽に 0.5L のオーバーフローラインを追加することにより、Pu 富化度が極端に低い場合及び硝酸ウラニル溶液濃度が比較的小さい場合 (<150g-U/L) を除き、Pu 富化度の調整精度について、ショートプロセスの目標値を満足することが明らかになった。

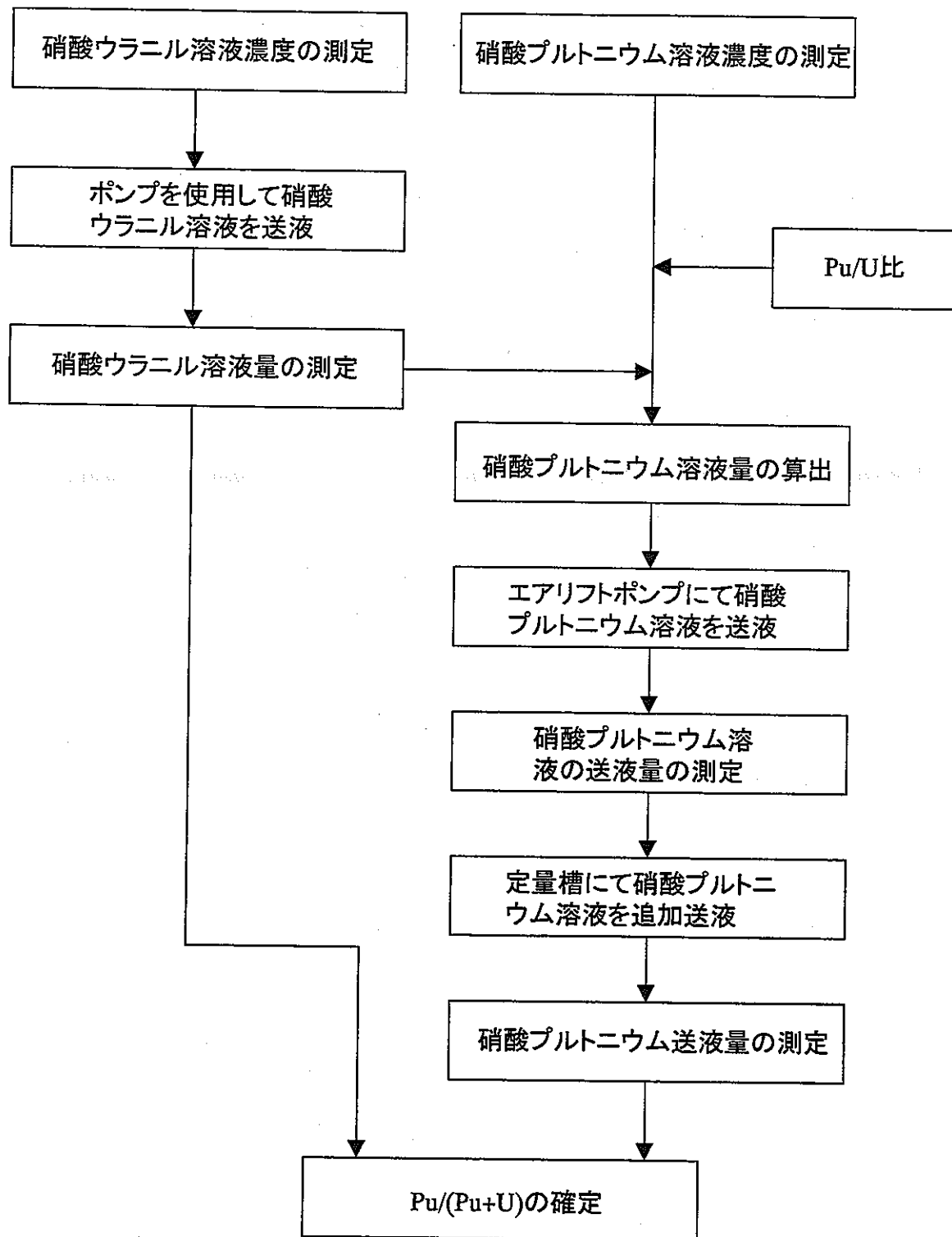


図6.7.1-1 硝酸プルトニウム溶液・硝酸ウラニル溶液混合フロー

表6.7.3-1 Pu富化度とPu富化度に関する誤差の関係

溶液濃度		混合液 液量	Pu/U ratio		溶液量		Pu富化度 Pu/(Pu+U)誤差 %
硝酸Pu溶液 g-Pu/L	硝酸U溶液 g-U/L		Pu/(Pu+U)	U/(Pu+U)	硝酸Pu溶液 L	硝酸U溶液 L	
208.3	360	200	0	100	0.0	200.0	-
208.3	360	200	2	98	6.8	193.2	7.482
208.3	360	200	4	96	13.4	186.6	3.818
208.3	360	200	6	94	19.9	180.1	2.607
208.3	360	200	8	92	26.1	173.9	2.008
208.3	360	200	10	90	32.2	167.8	1.653
208.3	360	200	12	88	38.1	161.9	1.420
208.3	360	200	14	86	43.9	156.1	1.257
208.3	360	200	16	84	49.5	150.5	1.136
208.3	360	200	18	82	55.0	145.0	1.045
208.3	360	200	20	80	60.3	139.7	0.973
208.3	360	200	22	78	65.5	134.5	0.915
208.3	360	200	24	76	70.6	129.4	0.868
208.3	360	200	26	74	75.6	124.4	0.829
208.3	360	200	28	72	80.4	119.6	0.797
208.3	360	200	30	70	85.1	114.9	0.770
208.3	360	200	32	68	89.7	110.3	0.747
208.3	360	200	34	66	94.2	105.8	0.727
208.3	360	200	36	64	98.6	101.4	0.710
208.3	360	200	38	62	102.9	97.1	0.695
208.3	360	200	40	60	107.1	92.9	0.682
208.3	360	200	42	58	111.2	88.8	0.672
208.3	360	200	44	56	115.2	84.8	0.662
208.3	360	200	46	54	119.1	80.9	0.654
208.3	360	200	48	52	122.9	77.1	0.647
208.3	360	200	50	50	126.7	73.3	0.641
208.3	360	200	52	48	130.4	69.6	0.636
208.3	360	200	54	46	134.0	66.0	0.632
208.3	360	200	56	44	137.5	62.5	0.628
208.3	360	200	58	42	140.9	59.1	0.625
208.3	360	200	60	40	144.3	55.7	0.623
208.3	360	200	62	38	147.6	52.4	0.621
208.3	360	200	64	36	150.9	49.1	0.620
208.3	360	200	66	34	154.1	45.9	0.619
208.3	360	200	68	32	157.2	42.8	0.619
208.3	360	200	70	30	160.3	39.7	0.619
208.3	360	200	72	28	163.3	36.7	0.620
208.3	360	200	74	26	166.2	33.8	0.621
208.3	360	200	76	24	169.1	30.9	0.622
208.3	360	200	78	22	171.9	28.1	0.624
208.3	360	200	80	20	174.7	25.3	0.626
208.3	360	200	82	18	177.5	22.5	0.628
208.3	360	200	84	16	180.1	19.9	0.630
208.3	360	200	86	14	182.8	17.2	0.633
208.3	360	200	88	12	185.4	14.6	0.636
208.3	360	200	90	10	187.9	12.1	0.639
208.3	360	200	92	8	190.4	9.6	0.643
208.3	360	200	94	6	192.9	7.1	0.646
208.3	360	200	96	4	195.3	4.7	0.650
208.3	360	200	98	2	197.7	2.3	0.654
208.3	360	200	100	0	200.0	0.0	0.659

表6.7.3-2 Pu富化度とPu富化度に関する誤差の関係
(定量槽に0.5Lオーバーフローライン追加)

溶液濃度		混合液 液量 L	Pu/U ratio		溶液量		Pu富化度 Pu/(Pu+U)誤差 %
硝酸Pu溶液 g-Pu/L	硝酸U溶液 g-U/L		Pu/(Pu+U)	U/(Pu+U)	硝酸Pu溶液 L	硝酸U溶液 L	
208.3	360	200	0	100	0.0	200.0	-
208.3	360	200	2	98	6.8	193.2	3.846
208.3	360	200	4	96	13.4	186.6	1.993
208.3	360	200	6	94	19.9	180.1	1.392
208.3	360	200	8	92	26.1	173.9	1.102
208.3	360	200	10	90	32.2	167.8	0.934
208.3	360	200	12	88	38.1	161.9	0.827
208.3	360	200	14	86	43.9	156.1	0.754
208.3	360	200	16	84	49.5	150.5	0.702
208.3	360	200	18	82	55.0	145.0	0.663
208.3	360	200	20	80	60.3	139.7	0.633
208.3	360	200	22	78	65.5	134.5	0.609
208.3	360	200	24	76	70.6	129.4	0.590
208.3	360	200	26	74	75.6	124.4	0.575
208.3	360	200	28	72	80.4	119.6	0.562
208.3	360	200	30	70	85.1	114.9	0.552
208.3	360	200	32	68	89.7	110.3	0.544
208.3	360	200	34	66	94.2	105.8	0.537
208.3	360	200	36	64	98.6	101.4	0.531
208.3	360	200	38	62	102.9	97.1	0.526
208.3	360	200	40	60	107.1	92.9	0.522
208.3	360	200	42	58	111.2	88.8	0.519
208.3	360	200	44	56	115.2	84.8	0.516
208.3	360	200	46	54	119.1	80.9	0.514
208.3	360	200	48	52	122.9	77.1	0.513
208.3	360	200	50	50	126.7	73.3	0.512
208.3	360	200	52	48	130.4	69.6	0.511
208.3	360	200	54	46	134.0	66.0	0.511
208.3	360	200	56	44	137.5	62.5	0.512
208.3	360	200	58	42	140.9	59.1	0.512
208.3	360	200	60	40	144.3	55.7	0.513
208.3	360	200	62	38	147.6	52.4	0.514
208.3	360	200	64	36	150.9	49.1	0.516
208.3	360	200	66	34	154.1	45.9	0.518
208.3	360	200	68	32	157.2	42.8	0.520
208.3	360	200	70	30	160.3	39.7	0.522
208.3	360	200	72	28	163.3	36.7	0.525
208.3	360	200	74	26	166.2	33.8	0.528
208.3	360	200	76	24	169.1	30.9	0.531
208.3	360	200	78	22	171.9	28.1	0.534
208.3	360	200	80	20	174.7	25.3	0.538
208.3	360	200	82	18	177.5	22.5	0.541
208.3	360	200	84	16	180.1	19.9	0.545
208.3	360	200	86	14	182.8	17.2	0.549
208.3	360	200	88	12	185.4	14.6	0.553
208.3	360	200	90	10	187.9	12.1	0.558
208.3	360	200	92	8	190.4	9.6	0.562
208.3	360	200	94	6	192.9	7.1	0.567
208.3	360	200	96	4	195.3	4.7	0.572
208.3	360	200	98	2	197.7	2.3	0.576
208.3	360	200	100	0	200.0	0.0	0.582

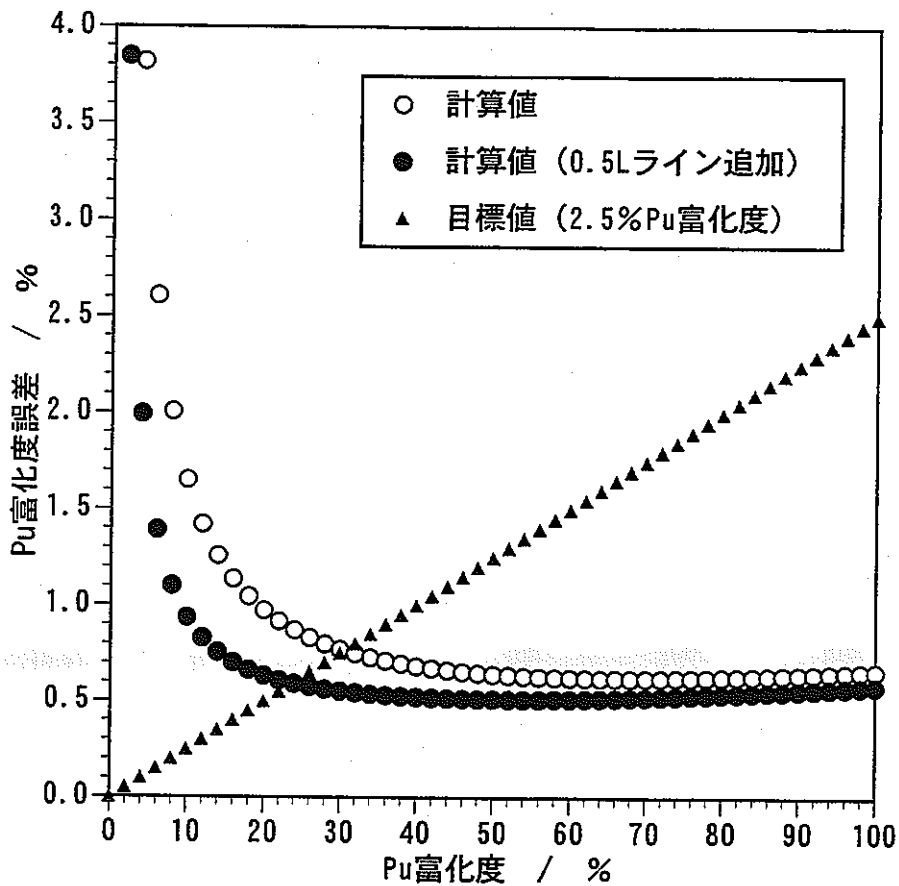


図6.7.3-1 Pu富化度とPu富化度誤差の関係

条件

硝酸Pu溶液濃度：208.3 g-Pu/L

硝酸U溶液濃度：360 g-U/L

混合溶液量：200 L

Pu富化度：0～100 %

表6.7.3-3 硝酸ウラニル溶液濃度とPu富化度に関する誤差の関係

溶液濃度		混合液 液量	Pu/U ratio		溶液量		Pu富化度 Pu/(Pu+U)誤差 %
硝酸Pu溶液 g-Pu/L	硝酸U溶液 g-U/L		Pu/(Pu+U)	U/(Pu+U)	硝酸Pu溶液 L	硝酸U溶液 L	
208.3	0	200	30	70	0.0	200.0	-
208.3	10	200	30	70	4.0	196.0	13.179
208.3	20	200	30	70	7.9	192.1	6.733
208.3	30	200	30	70	11.6	188.4	4.590
208.3	40	200	30	70	15.2	184.8	3.521
208.3	50	200	30	70	18.7	181.3	2.882
208.3	60	200	30	70	22.0	178.0	2.458
208.3	70	200	30	70	25.2	174.8	2.157
208.3	80	200	30	70	28.3	171.7	1.932
208.3	90	200	30	70	31.2	168.8	1.758
208.3	100	200	30	70	34.1	165.9	1.620
208.3	110	200	30	70	36.9	163.1	1.508
208.3	120	200	30	70	39.6	160.4	1.415
208.3	130	200	30	70	42.2	157.8	1.337
208.3	140	200	30	70	44.7	155.3	1.270
208.3	150	200	30	70	47.2	152.8	1.213
208.3	160	200	30	70	49.5	150.5	1.163
208.3	170	200	30	70	51.8	148.2	1.119
208.3	180	200	30	70	54.1	145.9	1.081
208.3	190	200	30	70	56.2	143.8	1.047
208.3	200	200	30	70	58.3	141.7	1.016
208.3	210	200	30	70	60.3	139.7	0.989
208.3	220	200	30	70	62.3	137.7	0.964
208.3	230	200	30	70	64.2	135.8	0.942
208.3	240	200	30	70	66.1	133.9	0.921
208.3	250	200	30	70	67.9	132.1	0.902
208.3	260	200	30	70	69.7	130.3	0.885
208.3	270	200	30	70	71.4	128.6	0.869
208.3	280	200	30	70	73.1	126.9	0.855
208.3	290	200	30	70	74.7	125.3	0.841
208.3	300	200	30	70	76.3	123.7	0.829
208.3	310	200	30	70	77.9	122.1	0.817
208.3	320	200	30	70	79.4	120.6	0.807
208.3	330	200	30	70	80.9	119.1	0.796
208.3	340	200	30	70	82.3	117.7	0.787
208.3	350	200	30	70	83.7	116.3	0.778
208.3	360	200	30	70	85.1	114.9	0.770
208.3	370	200	30	70	86.4	113.6	0.762
208.3	380	200	30	70	87.8	112.2	0.755
208.3	390	200	30	70	89.0	111.0	0.748
208.3	400	200	30	70	90.3	109.7	0.741
208.3	410	200	30	70	91.5	108.5	0.735
208.3	420	200	30	70	92.7	107.3	0.729
208.3	430	200	30	70	93.9	106.1	0.723
208.3	440	200	30	70	95.0	105.0	0.718
208.3	450	200	30	70	96.2	103.8	0.713
208.3	460	200	30	70	97.2	102.8	0.708
208.3	470	200	30	70	98.3	101.7	0.703
208.3	480	200	30	70	99.4	100.6	0.699
208.3	490	200	30	70	100.4	99.6	0.695
208.3	500	200	30	70	101.4	98.6	0.691

表6.7.3-4 硝酸ウラニル溶液濃度とPu富化度に関する誤差の関係
(定量槽に0.5Lオーバフローライン追加)

溶液濃度		混合液 液量	Pu/U ratio		溶液量		Pu富化度 Pu/(Pu+U)誤差 %
硝酸Pu溶液 g-Pu/L	硝酸U溶液 g-U/L		Pu/(Pu+U)	U/(Pu+U)	硝酸Pu溶液 L	硝酸U溶液 L	
208.3	0	200	30	70	0.0	200.0	-
208.3	10	200	30	70	4.0	196.0	6.747
208.3	20	200	30	70	7.9	192.1	3.464
208.3	30	200	30	70	11.6	188.4	2.378
208.3	40	200	30	70	15.2	184.8	1.841
208.3	50	200	30	70	18.7	181.3	1.523
208.3	60	200	30	70	22.0	178.0	1.315
208.3	70	200	30	70	25.2	174.8	1.169
208.3	80	200	30	70	28.3	171.7	1.061
208.3	90	200	30	70	31.2	168.8	0.979
208.3	100	200	30	70	34.1	165.9	0.914
208.3	110	200	30	70	36.9	163.1	0.863
208.3	120	200	30	70	39.6	160.4	0.820
208.3	130	200	30	70	42.2	157.8	0.785
208.3	140	200	30	70	44.7	155.3	0.756
208.3	150	200	30	70	47.2	152.8	0.731
208.3	160	200	30	70	49.5	150.5	0.710
208.3	170	200	30	70	51.8	148.2	0.691
208.3	180	200	30	70	54.1	145.9	0.675
208.3	190	200	30	70	56.2	143.8	0.661
208.3	200	200	30	70	58.3	141.7	0.648
208.3	210	200	30	70	60.3	139.7	0.637
208.3	220	200	30	70	62.3	137.7	0.627
208.3	230	200	30	70	64.2	135.8	0.618
208.3	240	200	30	70	66.1	133.9	0.610
208.3	250	200	30	70	67.9	132.1	0.602
208.3	260	200	30	70	69.7	130.3	0.596
208.3	270	200	30	70	71.4	128.6	0.590
208.3	280	200	30	70	73.1	126.9	0.584
208.3	290	200	30	70	74.7	125.3	0.579
208.3	300	200	30	70	76.3	123.7	0.574
208.3	310	200	30	70	77.9	122.1	0.570
208.3	320	200	30	70	79.4	120.6	0.566
208.3	330	200	30	70	80.9	119.1	0.562
208.3	340	200	30	70	82.3	117.7	0.558
208.3	350	200	30	70	83.7	116.3	0.555
208.3	360	200	30	70	85.1	114.9	0.552
208.3	370	200	30	70	86.4	113.6	0.549
208.3	380	200	30	70	87.8	112.2	0.547
208.3	390	200	30	70	89.0	111.0	0.544
208.3	400	200	30	70	90.3	109.7	0.542
208.3	410	200	30	70	91.5	108.5	0.540
208.3	420	200	30	70	92.7	107.3	0.538
208.3	430	200	30	70	93.9	106.1	0.536
208.3	440	200	30	70	95.0	105.0	0.534
208.3	450	200	30	70	96.2	103.8	0.532
208.3	460	200	30	70	97.2	102.8	0.530
208.3	470	200	30	70	98.3	101.7	0.529
208.3	480	200	30	70	99.4	100.6	0.527
208.3	490	200	30	70	100.4	99.6	0.526
208.3	500	200	30	70	101.4	98.6	0.524

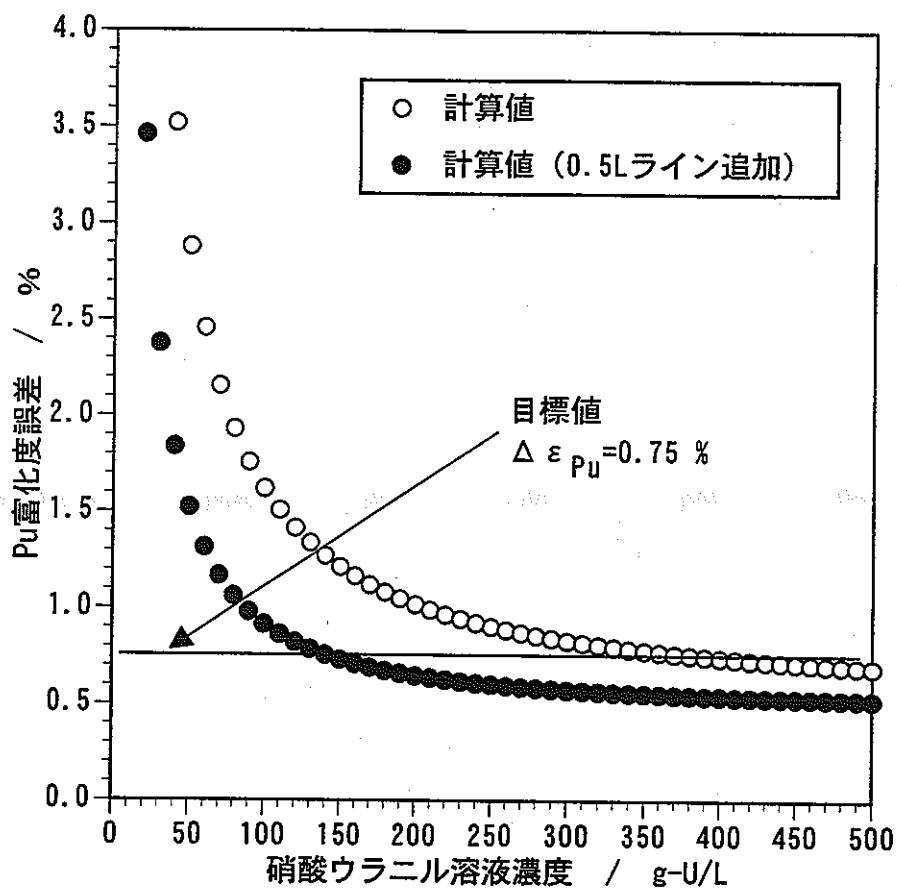


図6.7.3-2 硝酸ウラニル溶液濃度とPu富化度誤差の関係

条件

硝酸Pu溶液濃度：208.3 g-Pu/L

硝酸U溶液濃度：0~500 g-U/L

混合溶液量：200 L

Pu富化度：30 %

表6.7.3-5 硝酸プルトニウム溶液濃度とPu富化度に関する誤差の関係

溶液濃度		混合液 液量	Pu/U ratio		溶液量		Pu富化度 Pu/(Pu+U)誤差 %
硝酸Pu溶液 g-Pu/L	硝酸U溶液 g-U/L		Pu/(Pu+U)	U/(Pu+U)	硝酸Pu溶液 L	硝酸U溶液 L	
0	360	200	30	70	0.0	200.0	-
10	360	200	30	70	187.8	12.2	0.532
20	360	200	30	70	177.0	23.0	0.541
30	360	200	30	70	167.4	32.6	0.551
40	360	200	30	70	158.8	41.2	0.561
50	360	200	30	70	151.0	49.0	0.572
60	360	200	30	70	144.0	56.0	0.582
70	360	200	30	70	137.6	62.4	0.593
80	360	200	30	70	131.7	68.3	0.605
90	360	200	30	70	126.3	73.7	0.616
100	360	200	30	70	121.3	78.7	0.628
110	360	200	30	70	116.8	83.2	0.640
120	360	200	30	70	112.5	87.5	0.653
130	360	200	30	70	108.5	91.5	0.665
140	360	200	30	70	104.9	95.1	0.678
150	360	200	30	70	101.4	98.6	0.691
160	360	200	30	70	98.2	101.8	0.704
170	360	200	30	70	95.2	104.8	0.717
180	360	200	30	70	92.3	107.7	0.731
190	360	200	30	70	89.6	110.4	0.744
200	360	200	30	70	87.1	112.9	0.758
210	360	200	30	70	84.7	115.3	0.772
220	360	200	30	70	82.4	117.6	0.786
230	360	200	30	70	80.3	119.7	0.800
240	360	200	30	70	78.3	121.7	0.815
250	360	200	30	70	76.3	123.7	0.829
260	360	200	30	70	74.5	125.5	0.844
270	360	200	30	70	72.7	127.3	0.858
280	360	200	30	70	71.1	128.9	0.873
290	360	200	30	70	69.5	130.5	0.888
300	360	200	30	70	67.9	132.1	0.902
310	360	200	30	70	66.5	133.5	0.917
320	360	200	30	70	65.1	134.9	0.932
330	360	200	30	70	63.7	136.3	0.948
340	360	200	30	70	62.4	137.6	0.963
350	360	200	30	70	61.2	138.8	0.978
360	360	200	30	70	60.0	140.0	0.993
370	360	200	30	70	58.9	141.1	1.009
380	360	200	30	70	57.8	142.2	1.024
390	360	200	30	70	56.7	143.3	1.040
400	360	200	30	70	55.7	144.3	1.055
410	360	200	30	70	54.7	145.3	1.071
420	360	200	30	70	53.7	146.3	1.086
430	360	200	30	70	52.8	147.2	1.102
440	360	200	30	70	51.9	148.1	1.118
450	360	200	30	70	51.1	148.9	1.133
460	360	200	30	70	50.2	149.8	1.149
470	360	200	30	70	49.4	150.6	1.165
480	360	200	30	70	48.6	151.4	1.181
490	360	200	30	70	47.9	152.1	1.197
500	360	200	30	70	47.2	152.8	1.213

表6.7.3-6 硝酸プルトニウム溶液濃度とPu富化度に関する誤差の関係
(定量槽に0.5Lオーバフローライン追加)

溶液濃度		混合液 液量 L	Pu/U ratio		溶液量		Pu富化度 Pu/(Pu+U)誤差 %
硝酸Pu溶液 g-Pu/L	硝酸U溶液 g-U/L		Pu/(Pu+U)	U/(Pu+U)	硝酸Pu溶液 L	硝酸U溶液 L	
0	360	200	30	70	0.0	200.0	-
10	360	200	30	70	187.8	12.2	0.473
20	360	200	30	70	177.0	23.0	0.476
30	360	200	30	70	167.4	32.6	0.479
40	360	200	30	70	158.8	41.2	0.482
50	360	200	30	70	151.0	49.0	0.485
60	360	200	30	70	144.0	56.0	0.489
70	360	200	30	70	137.6	62.4	0.492
80	360	200	30	70	131.7	68.3	0.496
90	360	200	30	70	126.3	73.7	0.499
100	360	200	30	70	121.3	78.7	0.503
110	360	200	30	70	116.8	83.2	0.507
120	360	200	30	70	112.5	87.5	0.511
130	360	200	30	70	108.5	91.5	0.515
140	360	200	30	70	104.9	95.1	0.520
150	360	200	30	70	101.4	98.6	0.524
160	360	200	30	70	98.2	101.8	0.529
170	360	200	30	70	95.2	104.8	0.533
180	360	200	30	70	92.3	107.7	0.538
190	360	200	30	70	89.6	110.4	0.543
200	360	200	30	70	87.1	112.9	0.548
210	360	200	30	70	84.7	115.3	0.553
220	360	200	30	70	82.4	117.6	0.558
230	360	200	30	70	80.3	119.7	0.563
240	360	200	30	70	78.3	121.7	0.569
250	360	200	30	70	76.3	123.7	0.574
260	360	200	30	70	74.5	125.5	0.580
270	360	200	30	70	72.7	127.3	0.585
280	360	200	30	70	71.1	128.9	0.591
290	360	200	30	70	69.5	130.5	0.597
300	360	200	30	70	67.9	132.1	0.602
310	360	200	30	70	66.5	133.5	0.608
320	360	200	30	70	65.1	134.9	0.614
330	360	200	30	70	63.7	136.3	0.620
340	360	200	30	70	62.4	137.6	0.626
350	360	200	30	70	61.2	138.8	0.632
360	360	200	30	70	60.0	140.0	0.639
370	360	200	30	70	58.9	141.1	0.645
380	360	200	30	70	57.8	142.2	0.651
390	360	200	30	70	56.7	143.3	0.658
400	360	200	30	70	55.7	144.3	0.664
410	360	200	30	70	54.7	145.3	0.671
420	360	200	30	70	53.7	146.3	0.677
430	360	200	30	70	52.8	147.2	0.684
440	360	200	30	70	51.9	148.1	0.690
450	360	200	30	70	51.1	148.9	0.697
460	360	200	30	70	50.2	149.8	0.704
470	360	200	30	70	49.4	150.6	0.710
480	360	200	30	70	48.6	151.4	0.717
490	360	200	30	70	47.9	152.1	0.724
500	360	200	30	70	47.2	152.8	0.731

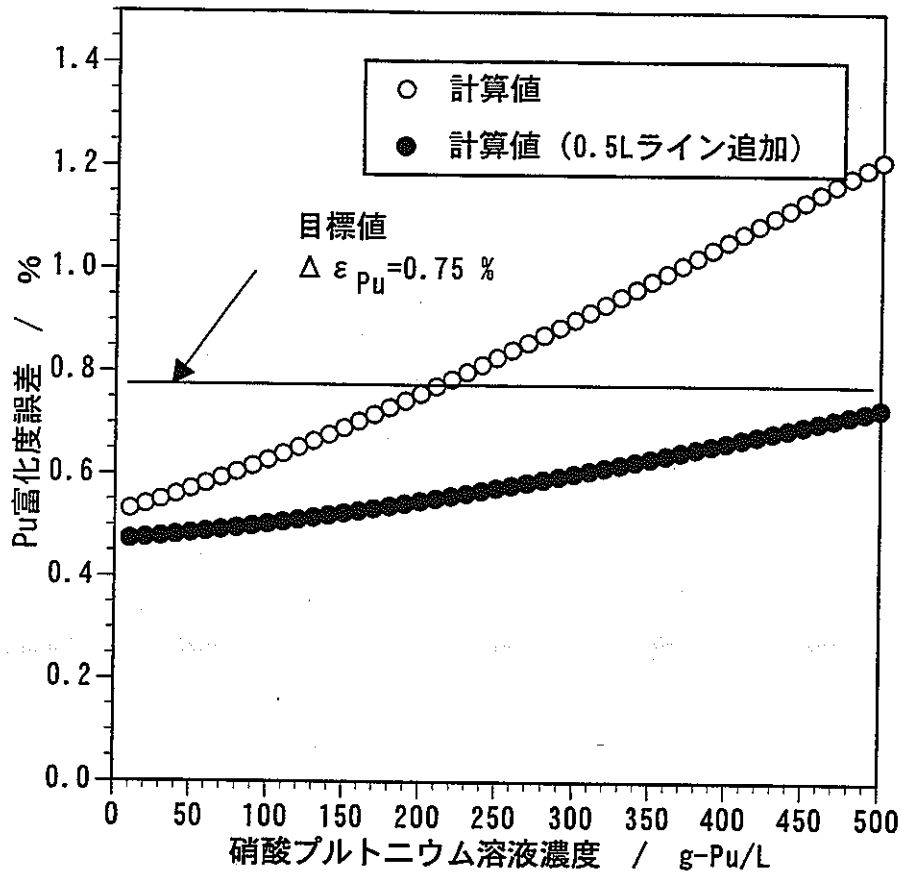


図6.7.3-3 硝酸プルトニウム溶液濃度とPu富化度誤差の関係

条件

硝酸Pu溶液濃度：0～500 g-Pu/L

硝酸U溶液濃度：360 g-U/L

混合溶液量：200 L

Pu富化度：30 %

7. 結言

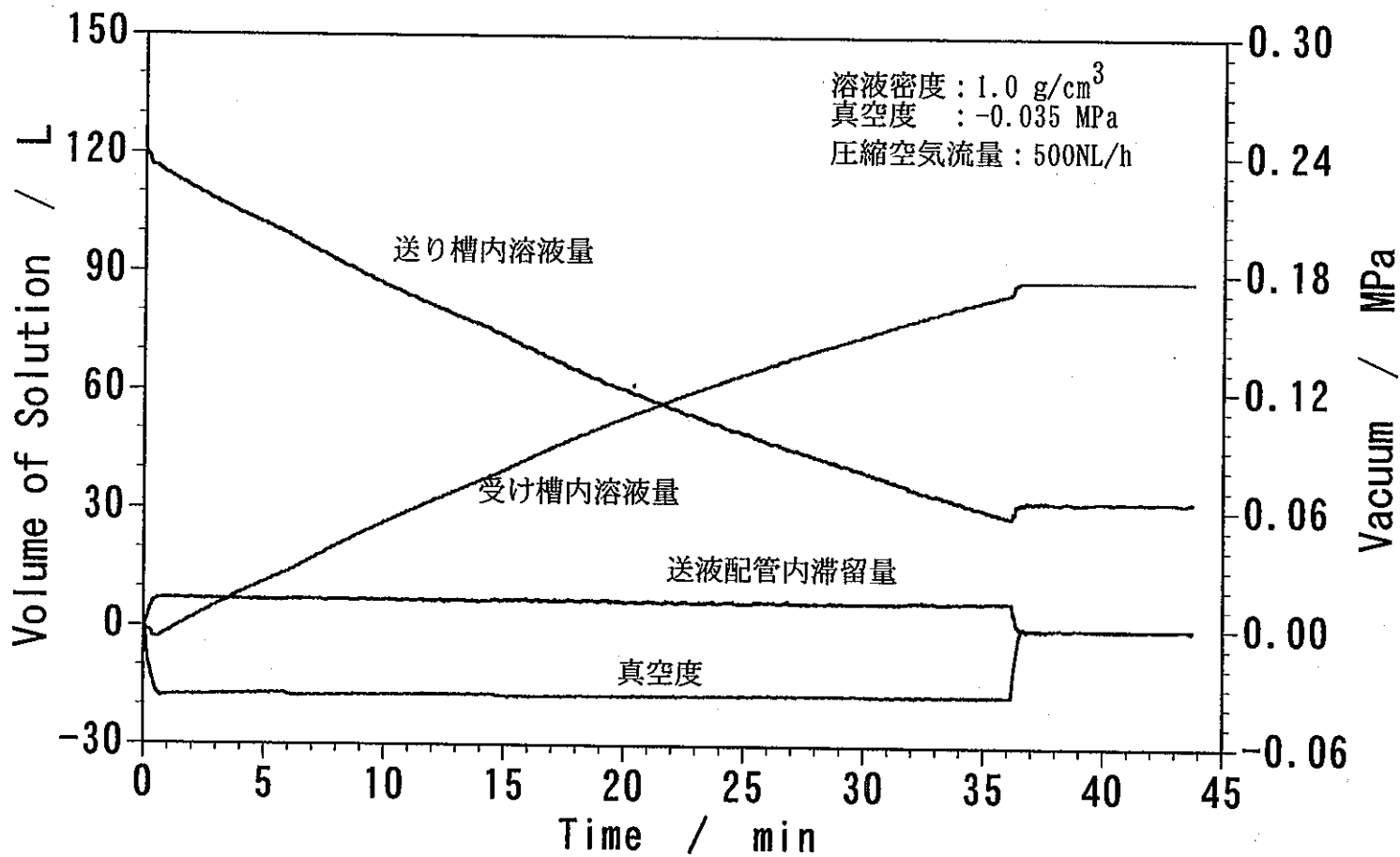
本件のまとめを以下に示す。

- ① プルトニウム転換技術開発施設の既設溶液混合工程の調査及び既存エアリフトポンプのモックアップ装置を使用した送液試験を実施し、既存の溶液混合工程の溶液混合精度の評価を実施し、既存の設備では、溶液調整のみでショートプロセス燃料仕様を満足する Pu 富化度調整を実施することが困難であることを確認した。
- ② 既存エアリフトポンプのモックアップ装置を使用し、エア流量、真空度及び溶液密度等をパラメータとして送液試験を実施し、エアリフトポンプによる送液特性（送液速度及び配管内滞留量等）に関する知見を得た。
- ③ 既存エアリフトポンプのモックアップ装置を使用し、エア流量、真空度及び溶液密度等をパラメータとして送液試験を実施し、送液停止操作（圧縮空気停止及び真空系停止）後の槽内への溶液流入量の違いが、送液量の制御を困難にする一因であることが明らかになった。
- ④ 本エアリフトポンプを使用した送液では、数秒程度周期及び数十秒周期の脈動流が観察された。送液量の制御という観点から考えると、数秒周期の脈動流は問題とならないが、数十秒周期の脈動流は送液停止操作後の槽内への溶液流入量（送液量の制御）に大きな影響を与えることが明らかになった。
- ⑤ ショートプロセス燃料仕様を満足する Pu 富化度調整の実施を目標として、溶液混合精度向上の検討を行い、エアリフトポンプによる送液系の一部改造および送液手順の変更を提案した。
- ⑥ 提案した改造案（送液ラインへの定量槽を追加）を、その性能について、実際のモックアップ装置を使用して確認した。また、定量供給量の刻み幅を 1L から 0.5L にすることにより、送液量の更なる微調整が可能となり、溶液混合のみでショートプロセスにおける燃料仕様を満足する Pu 富化度調整が可能であることが明らかになった。

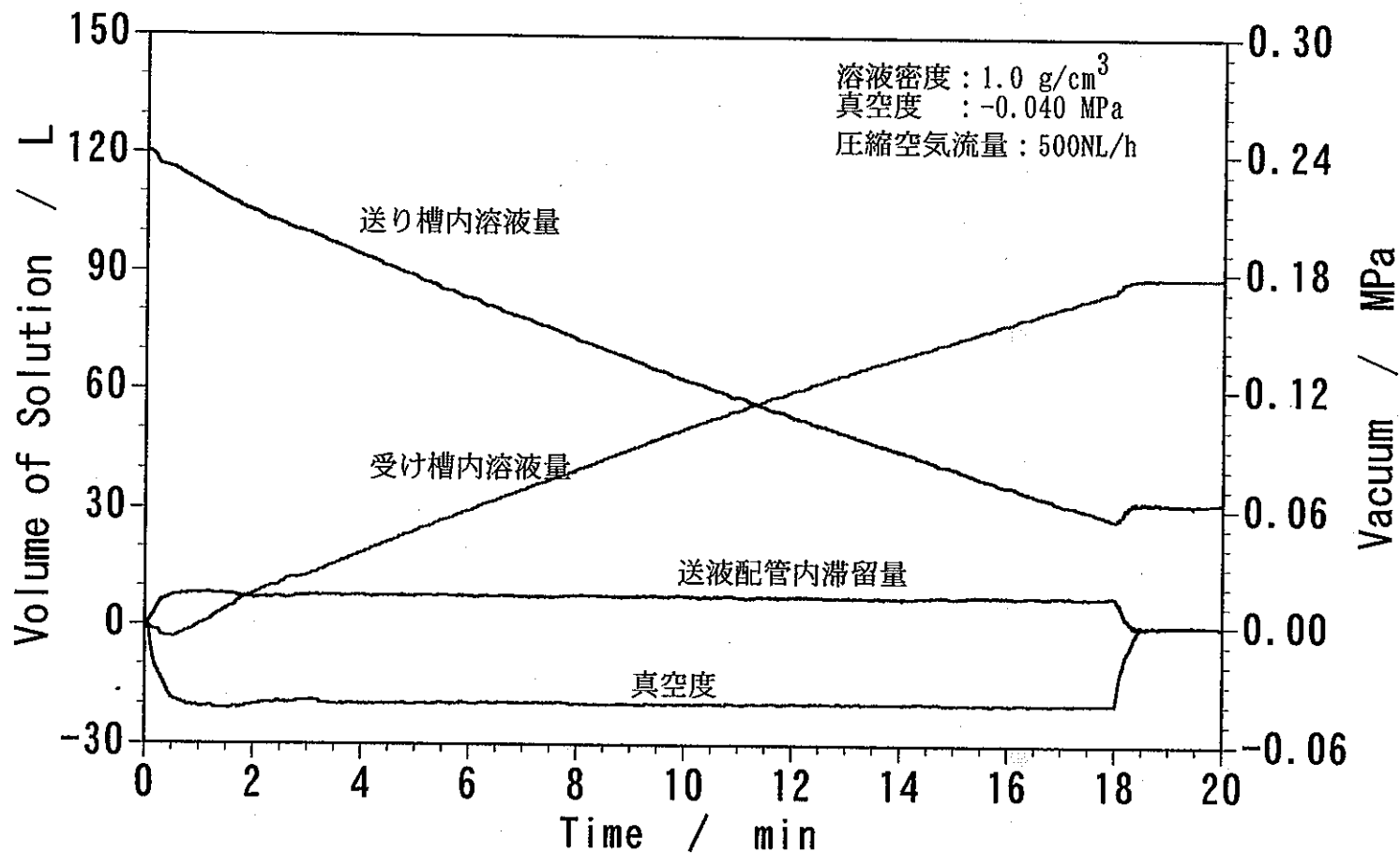
8. 参考文献

- (1) 小林 英男 他、動力炉・核燃料開発事業団報告書、PNC ZN8440 90-011、
「プルトニウム転換技術開発施設における槽の液量測定と再校正」 (1990
年5月)
- (2) *Purex Technical Manual*, HW-31000, Hanford Atomic Products Operation
(1955)
- (3) “臨界安全ハンドブック”、科学技術庁原子力安全局核燃料規制課編
(1988)
- (4) 桜井 聡、JAERI-M 83-047 (1983)
- (5) J. O. Maare, R. L. Walser, J. J. Fritch (Edited by), *Purex Technical
Manual*, RHO-MA-116, Rockwell Hanford Operation Energy System Group
(1980)
- (6) 桜井 聡、JAERI-M 91-117 (1991)
- (7) S. M. Stoller, R. B. Richard (Edited by), “Reactor Handbook Vol.
II Fuel Reprocessing, Second Edition” (1961)
- (8) 桜井 聡、JAERI-M 88-127 (1988)
- (9) 太田 秀敏 他、動力炉・核燃料開発事業団委託研究報告書、PNC ZJ 107
81-01、「エアリフト定量供給試験 (II)」 (住友金属鉱山 (株))
(昭和56年2月)
- (10) 中江 延男、伊藤 正徳、三島 毅、椎名 章、動燃技報、No. 70、
77 (1989.6)
- (11) Deron S, Kuhn E, Pietri C, et al, *JNMM*, 22 (2), 19 (1994)

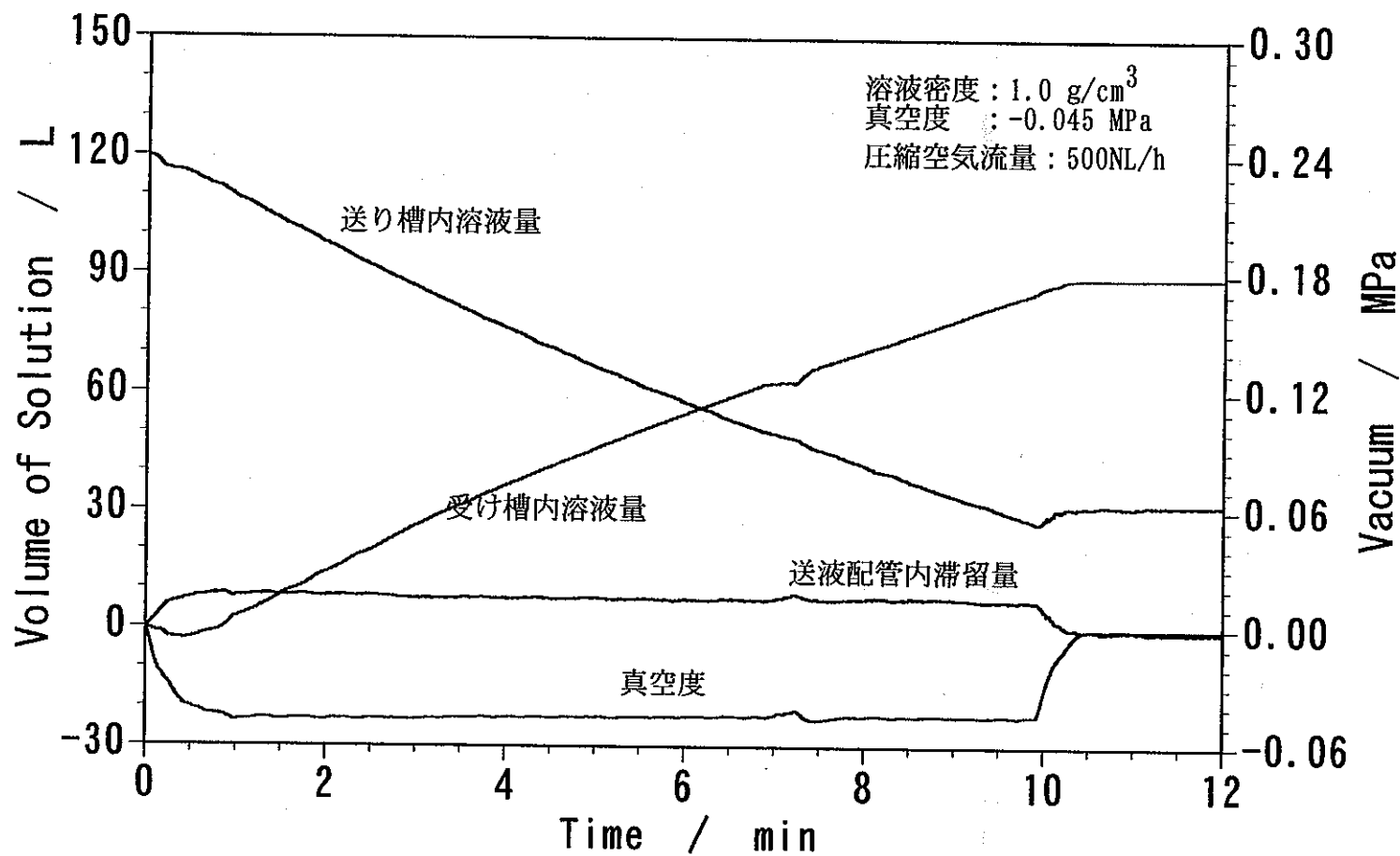
添付資料



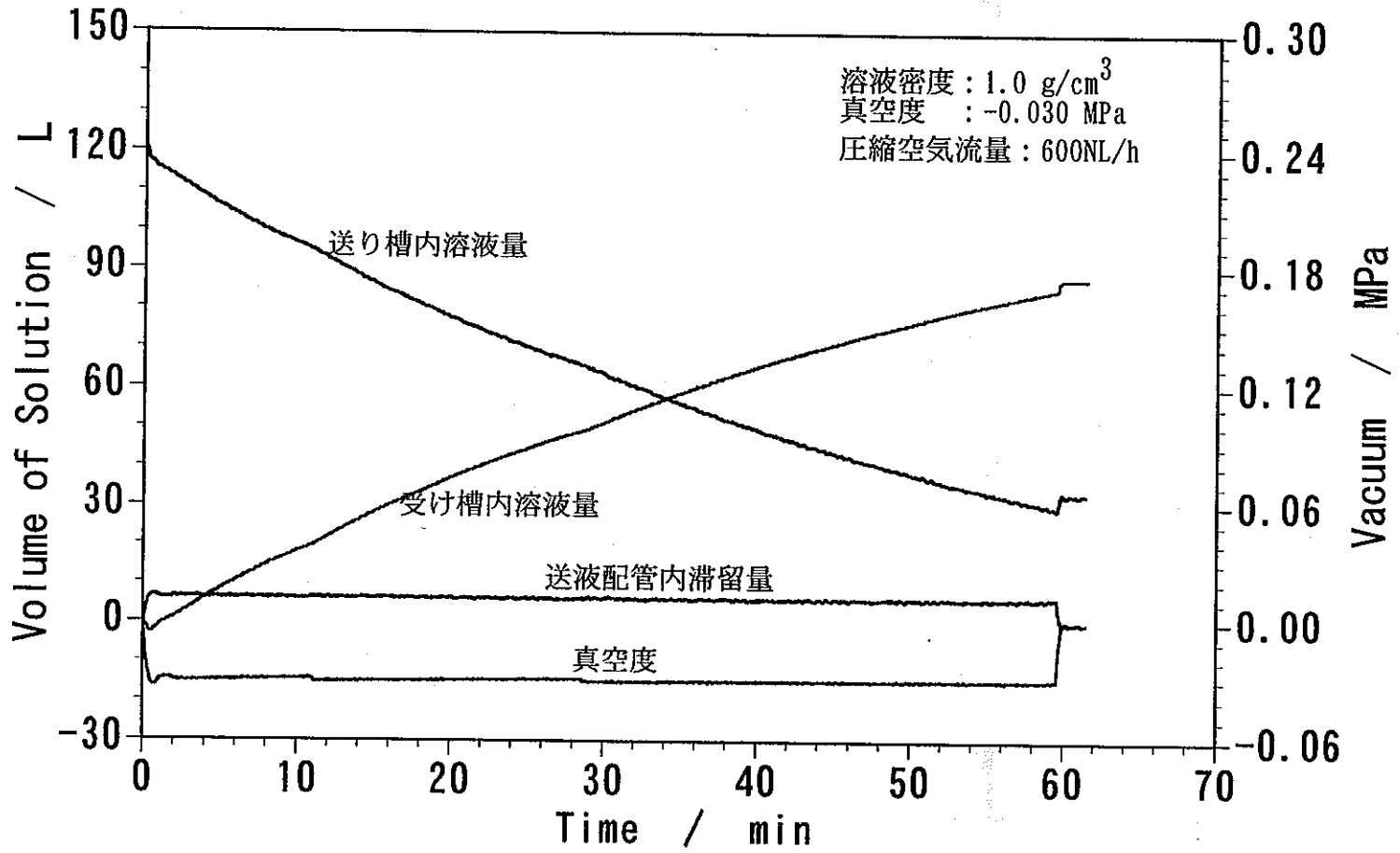
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



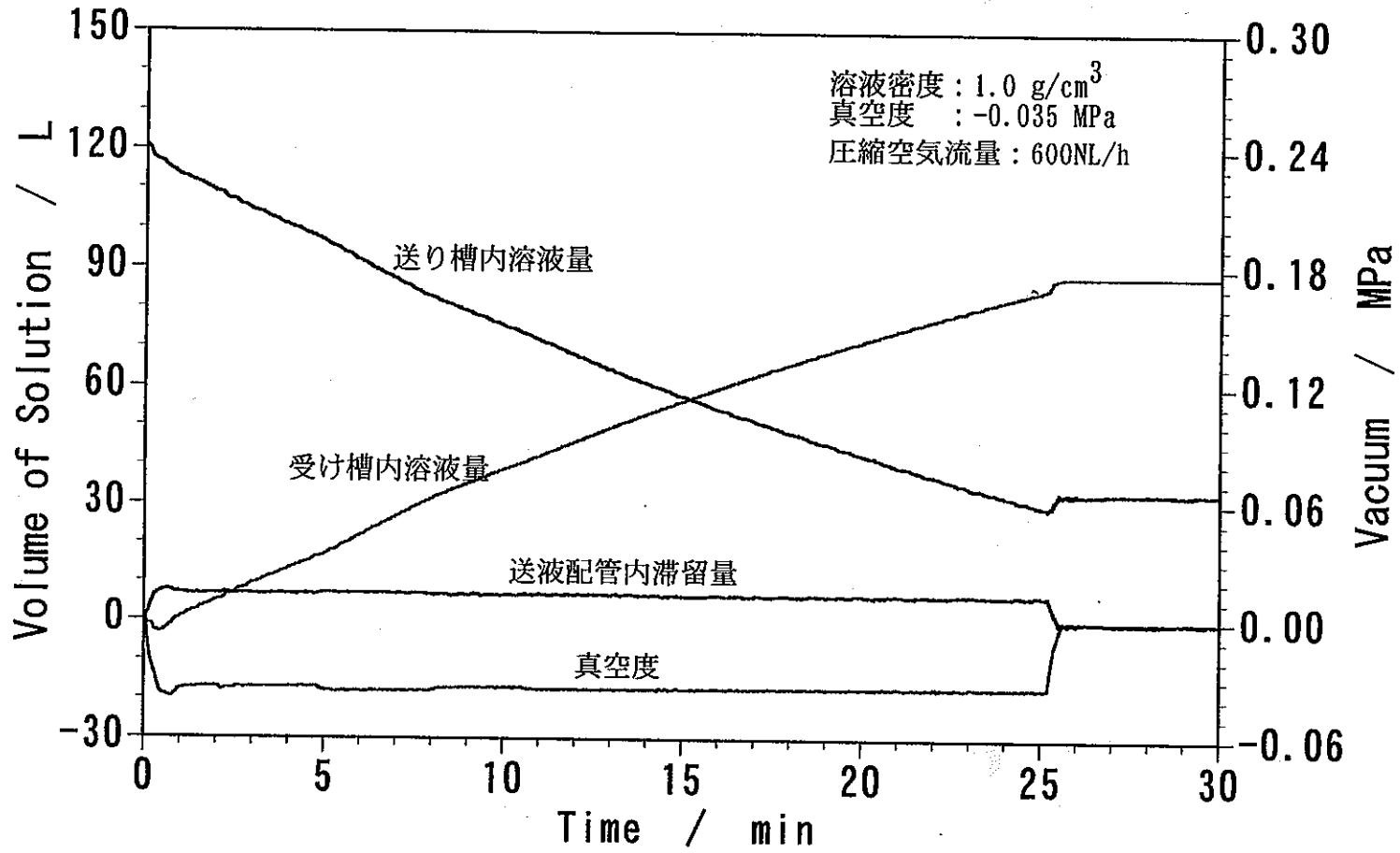
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



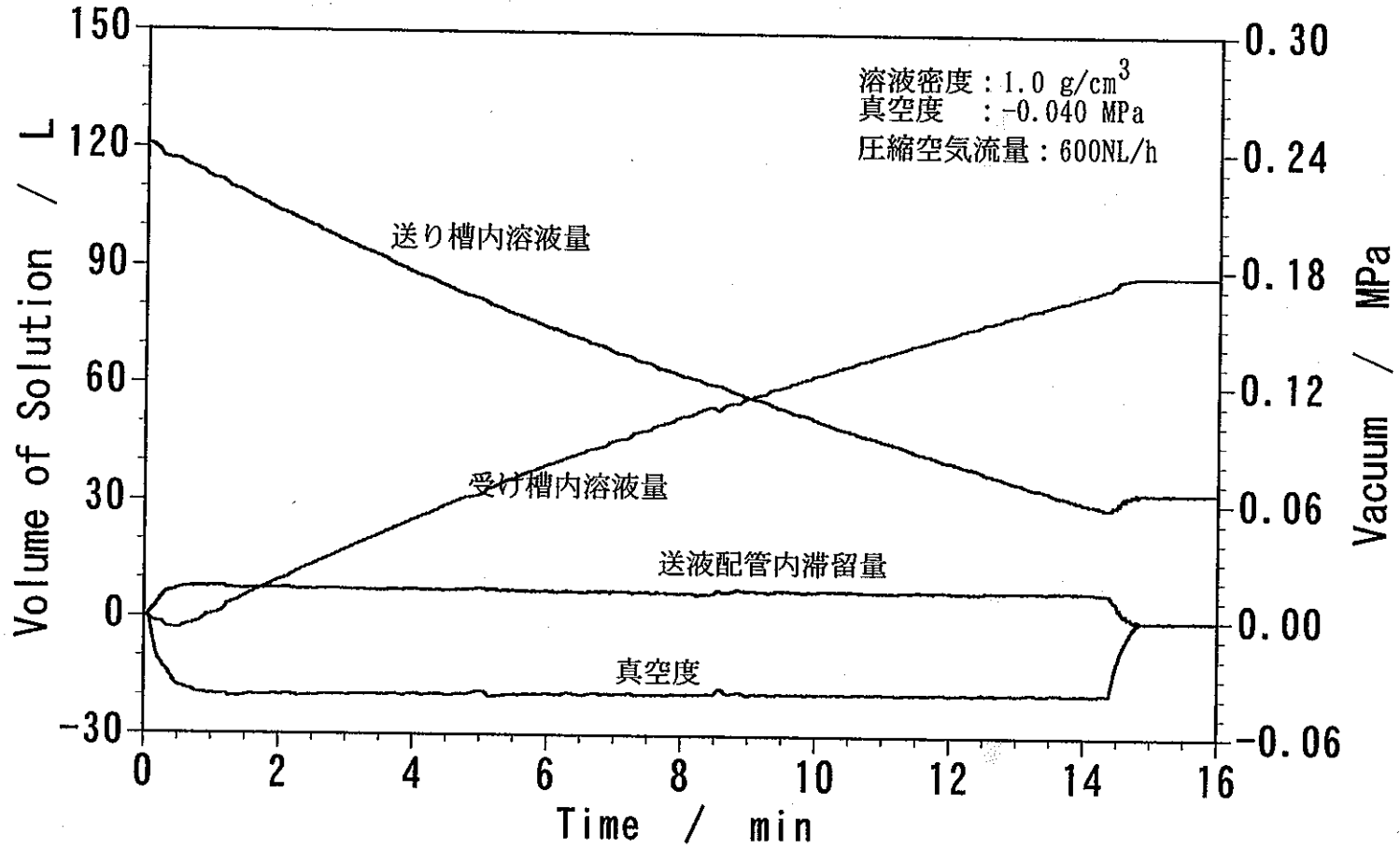
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



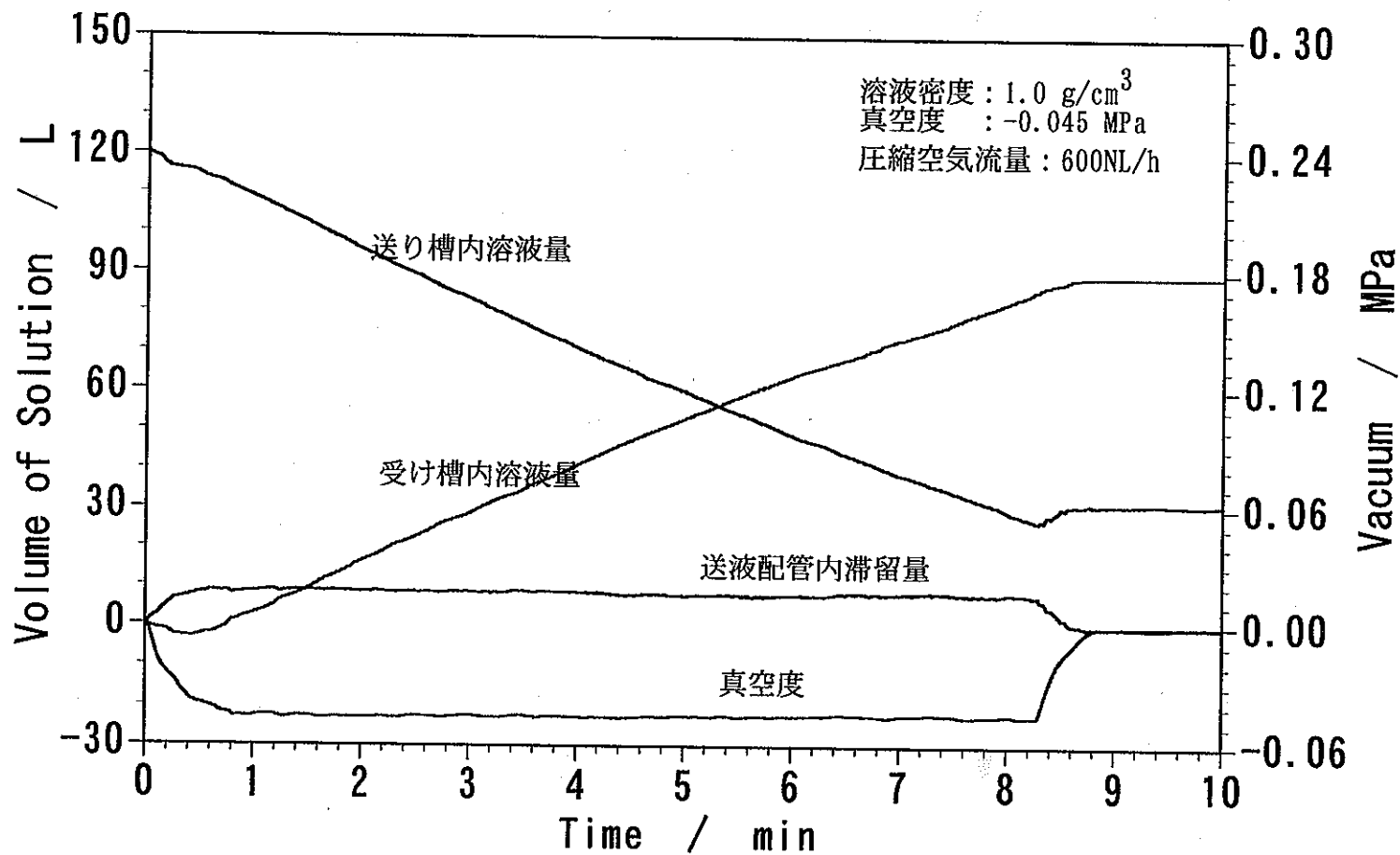
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



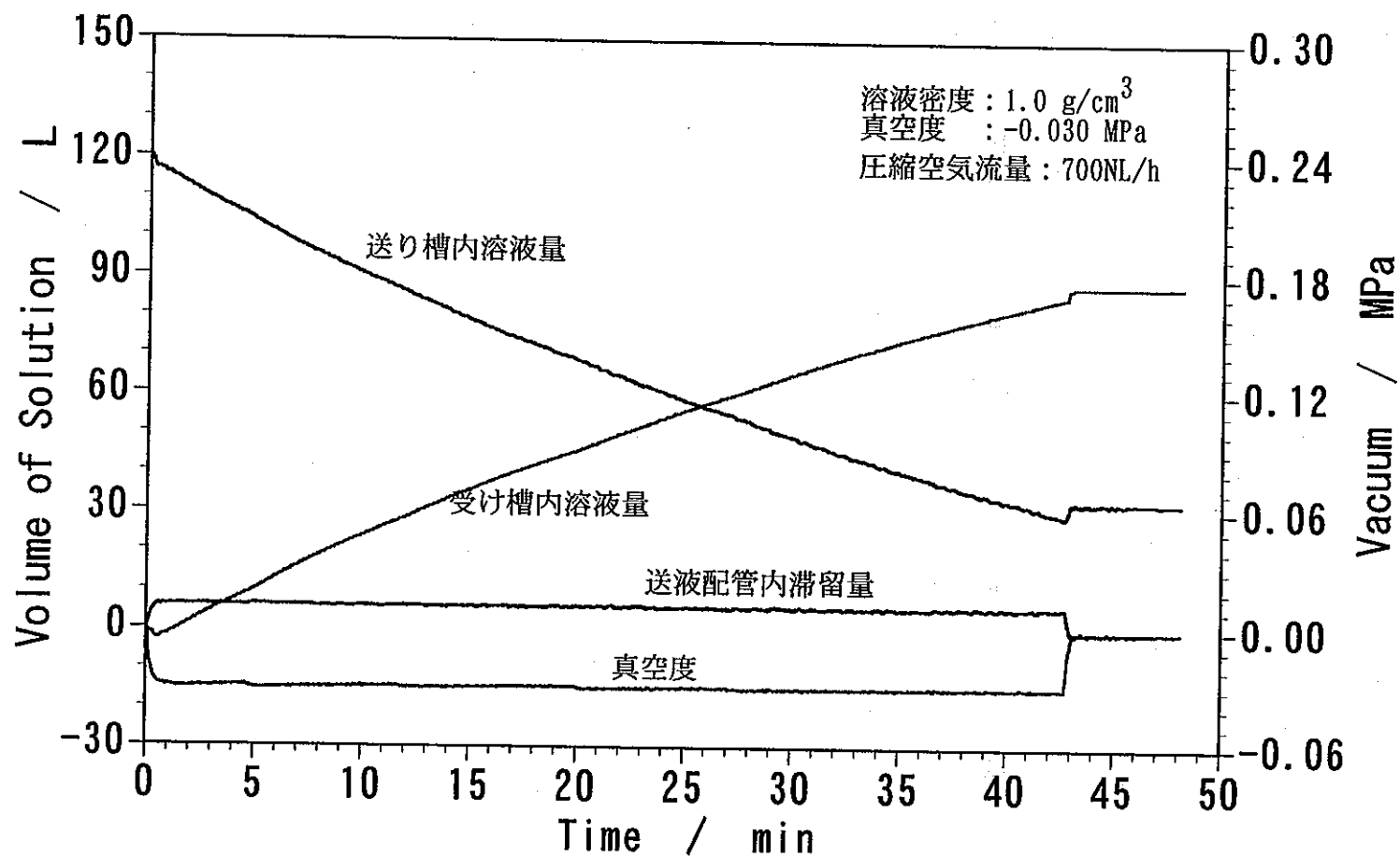
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



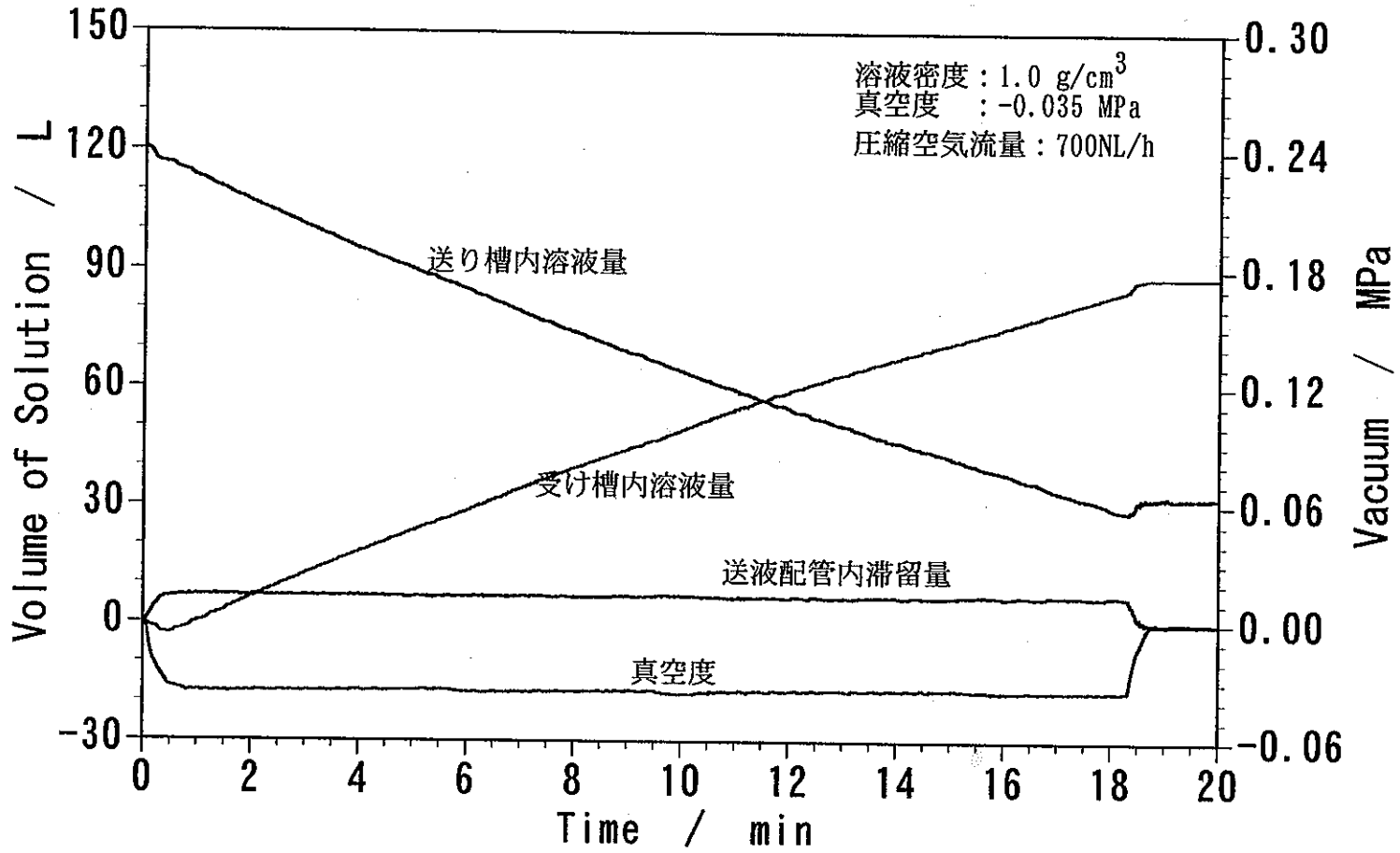
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



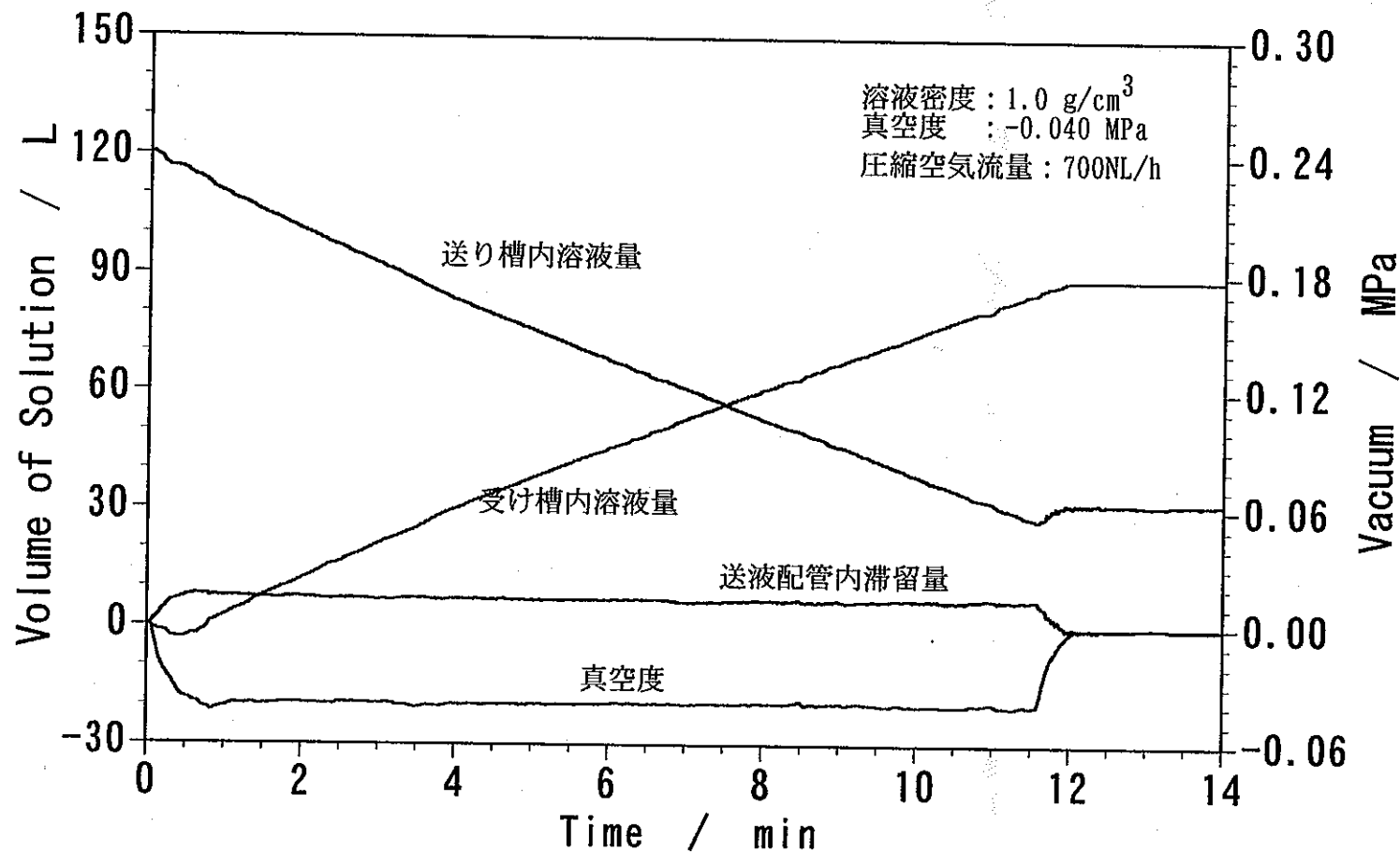
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



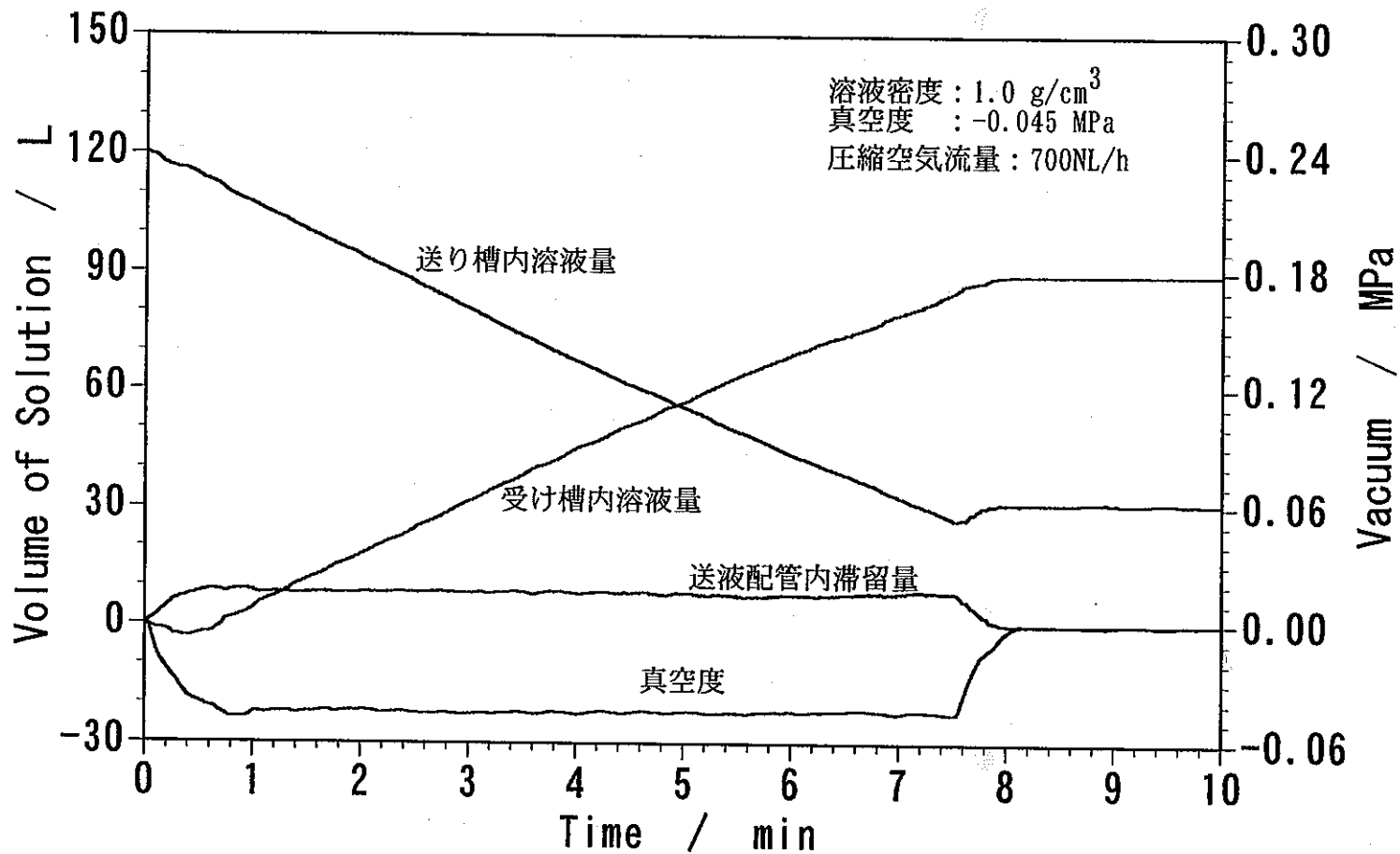
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



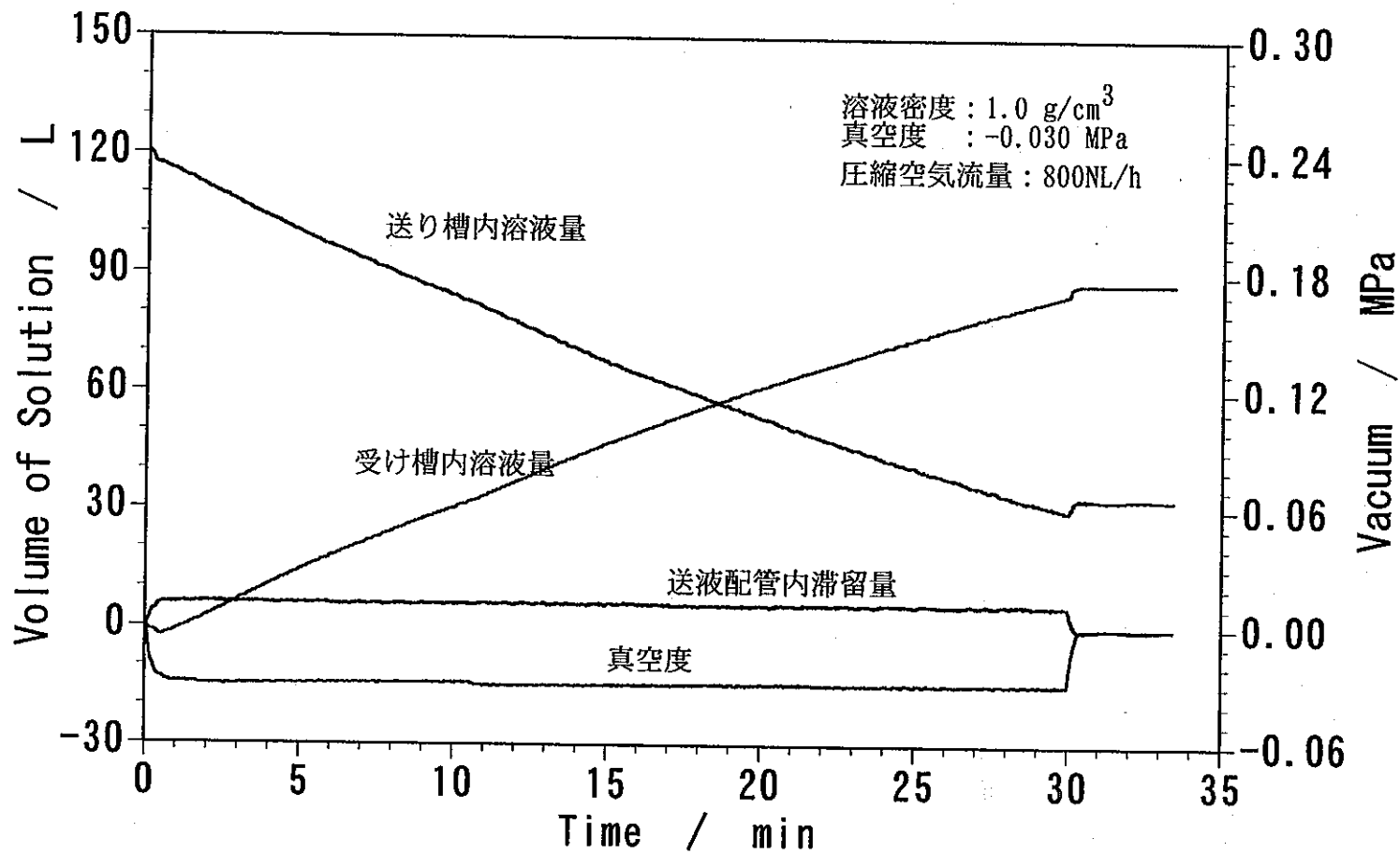
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



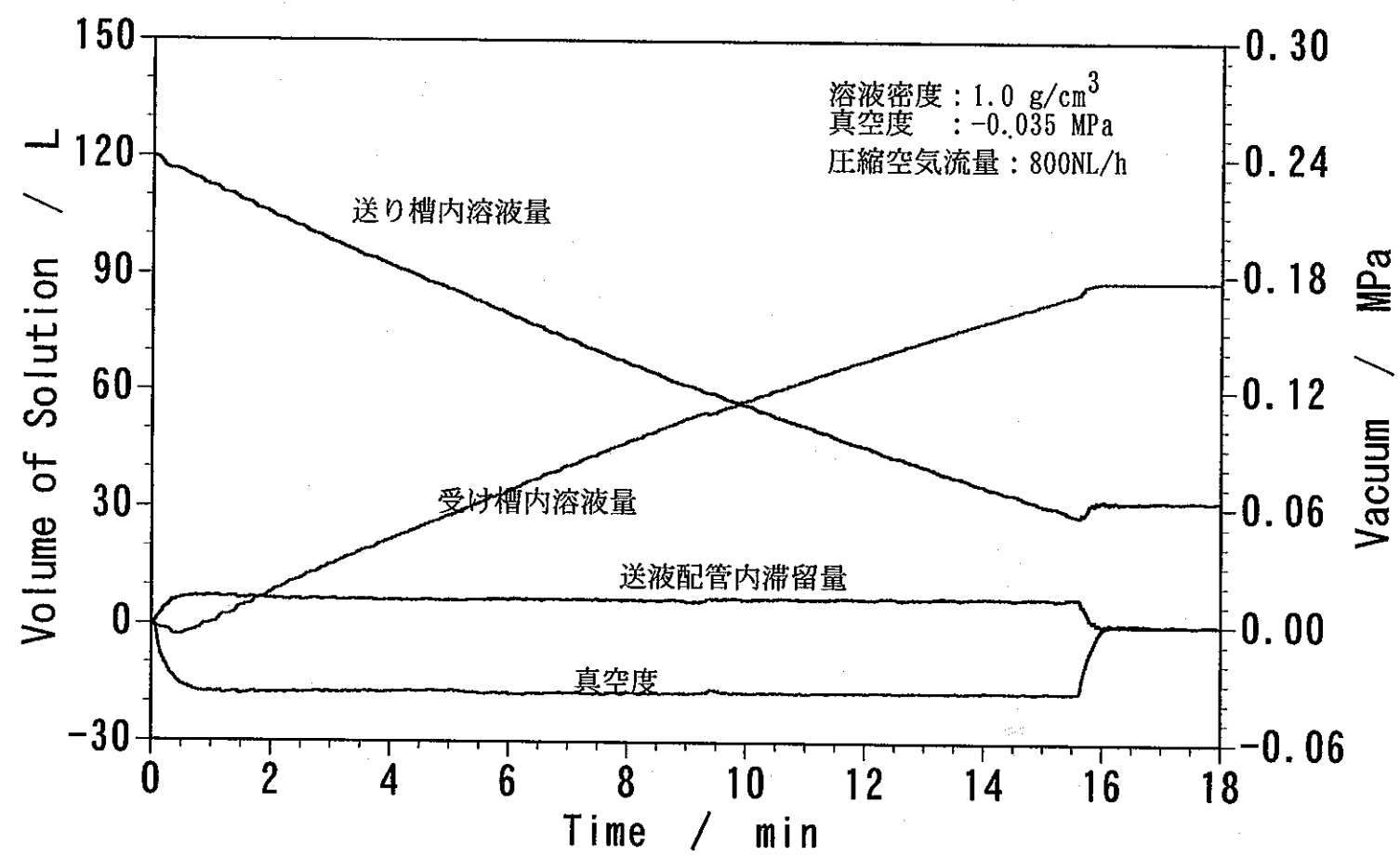
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



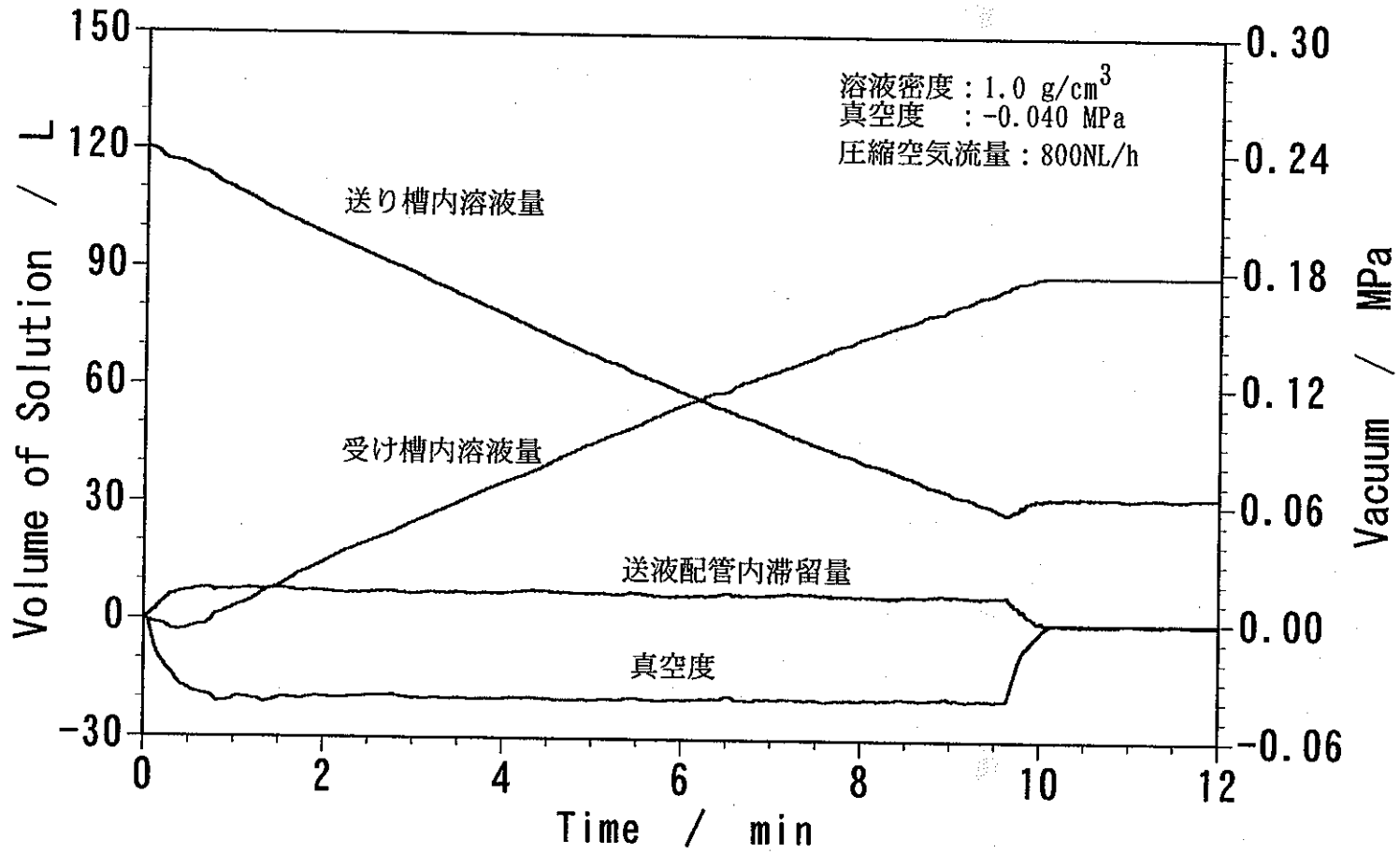
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



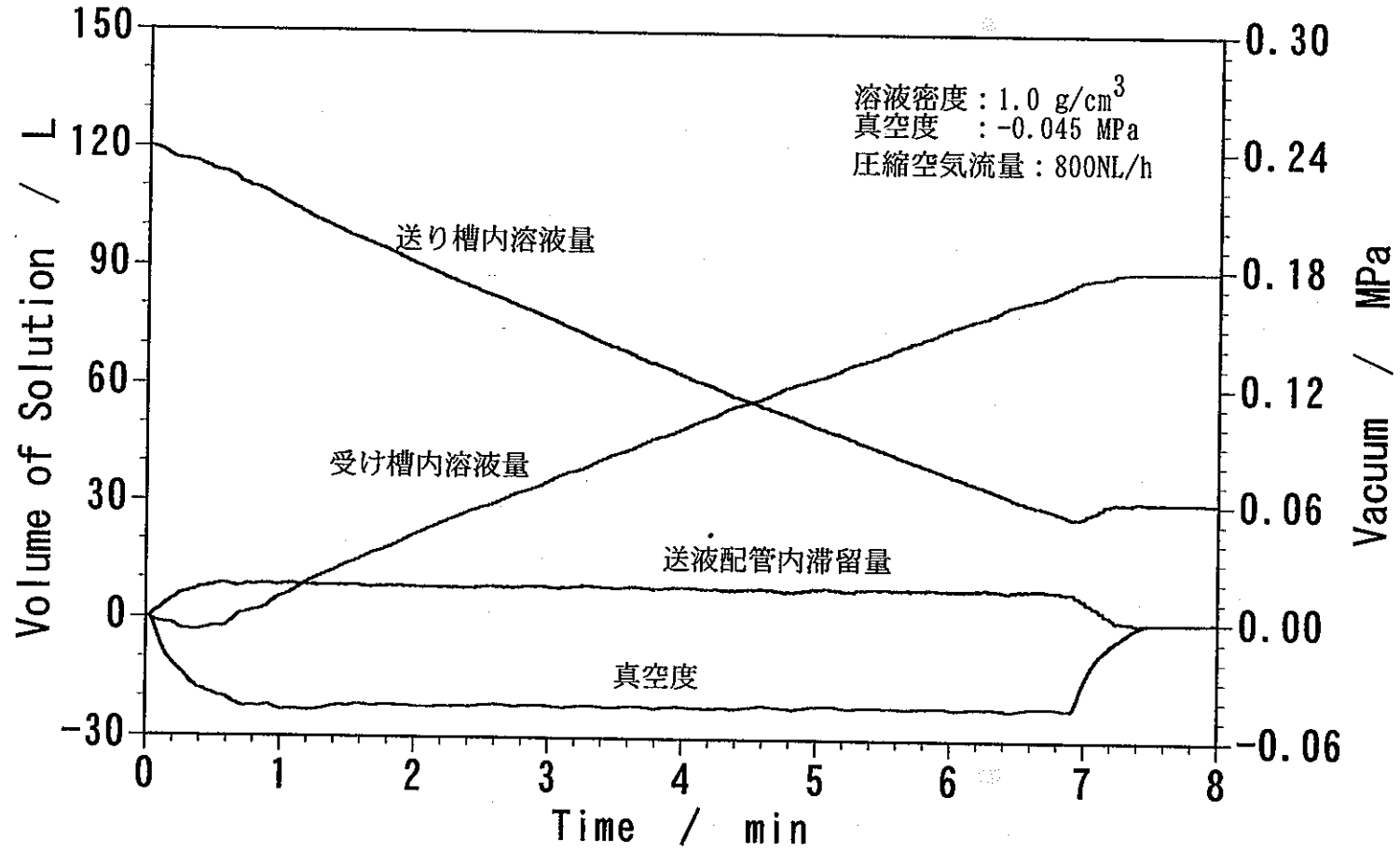
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



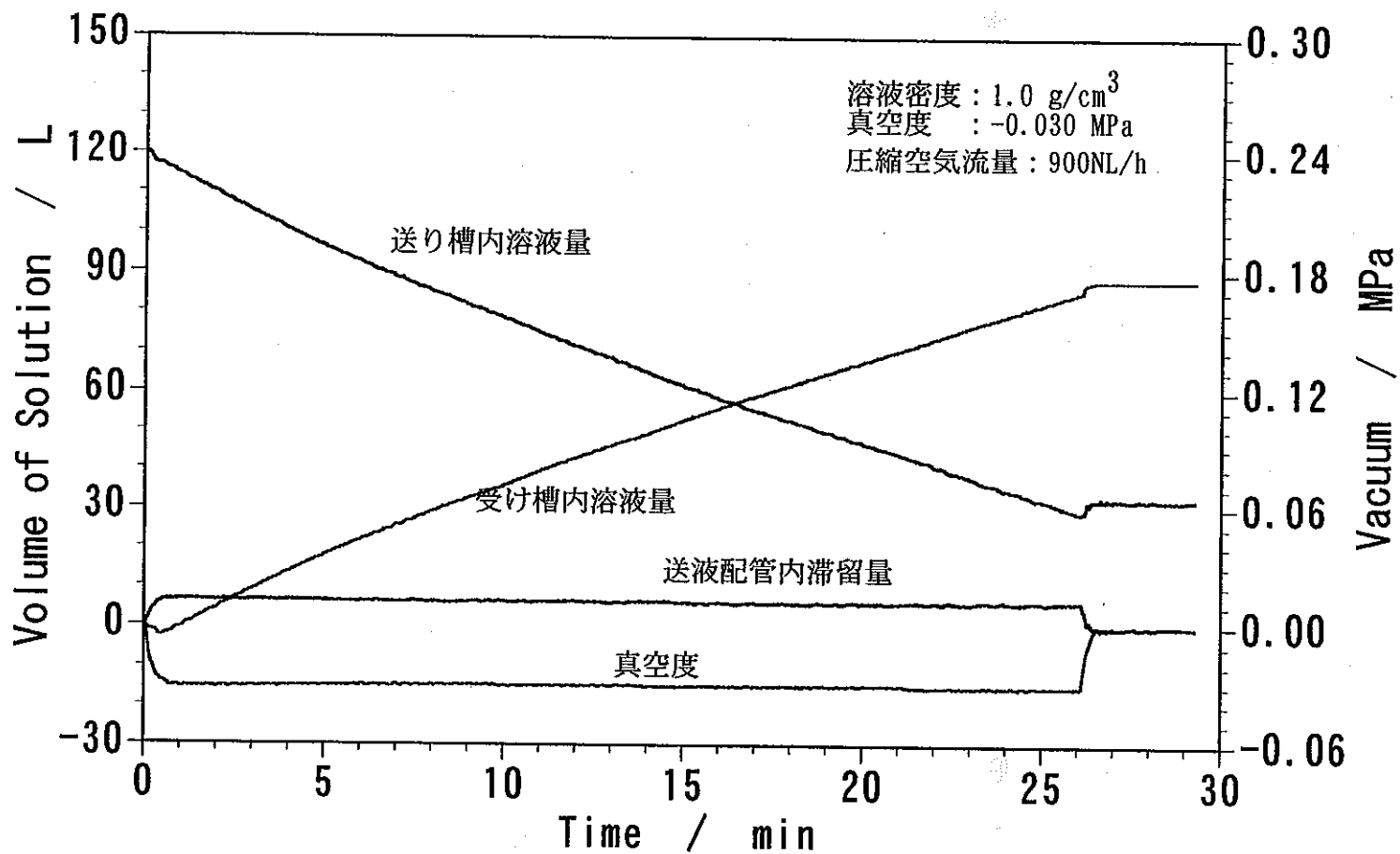
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



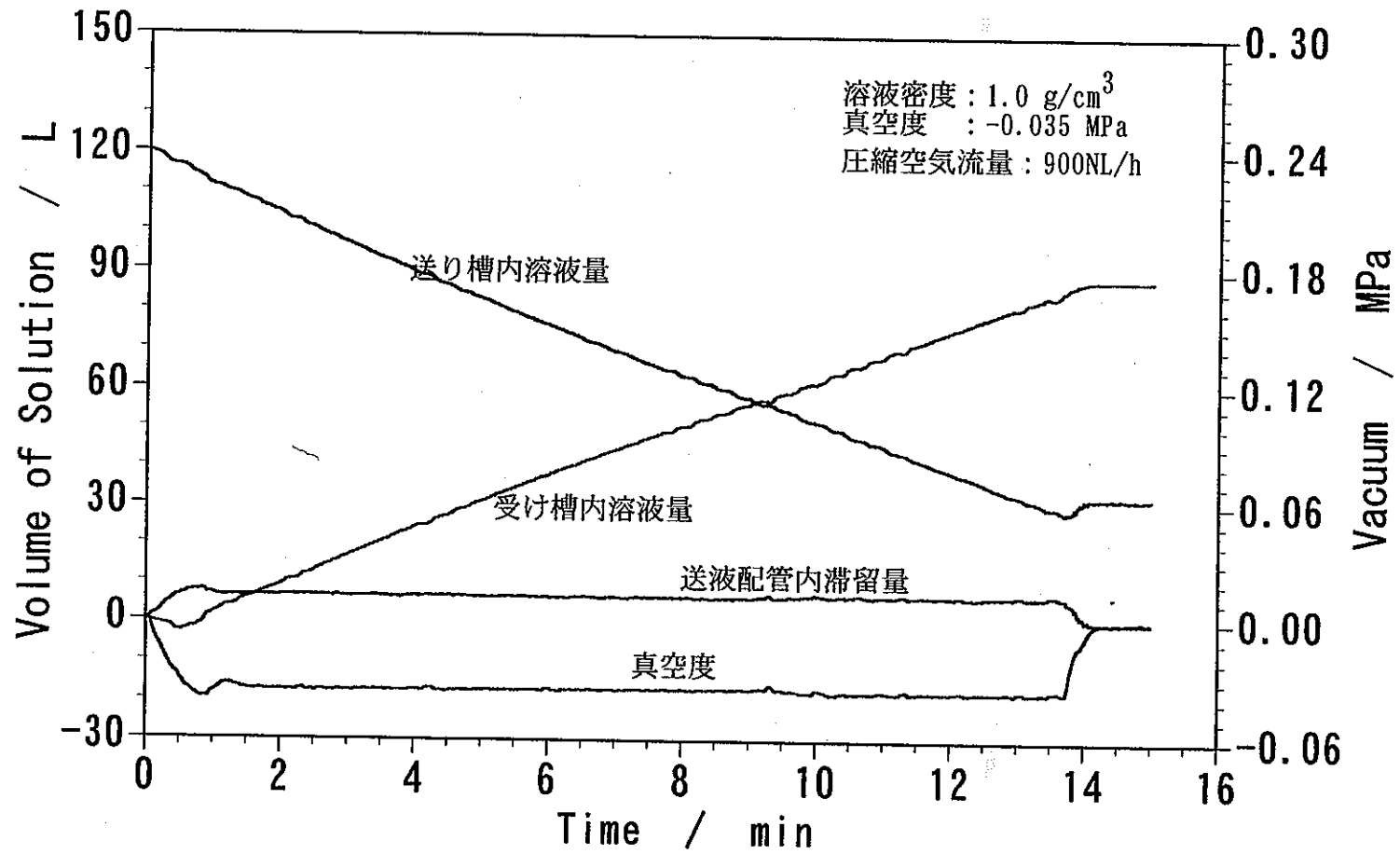
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



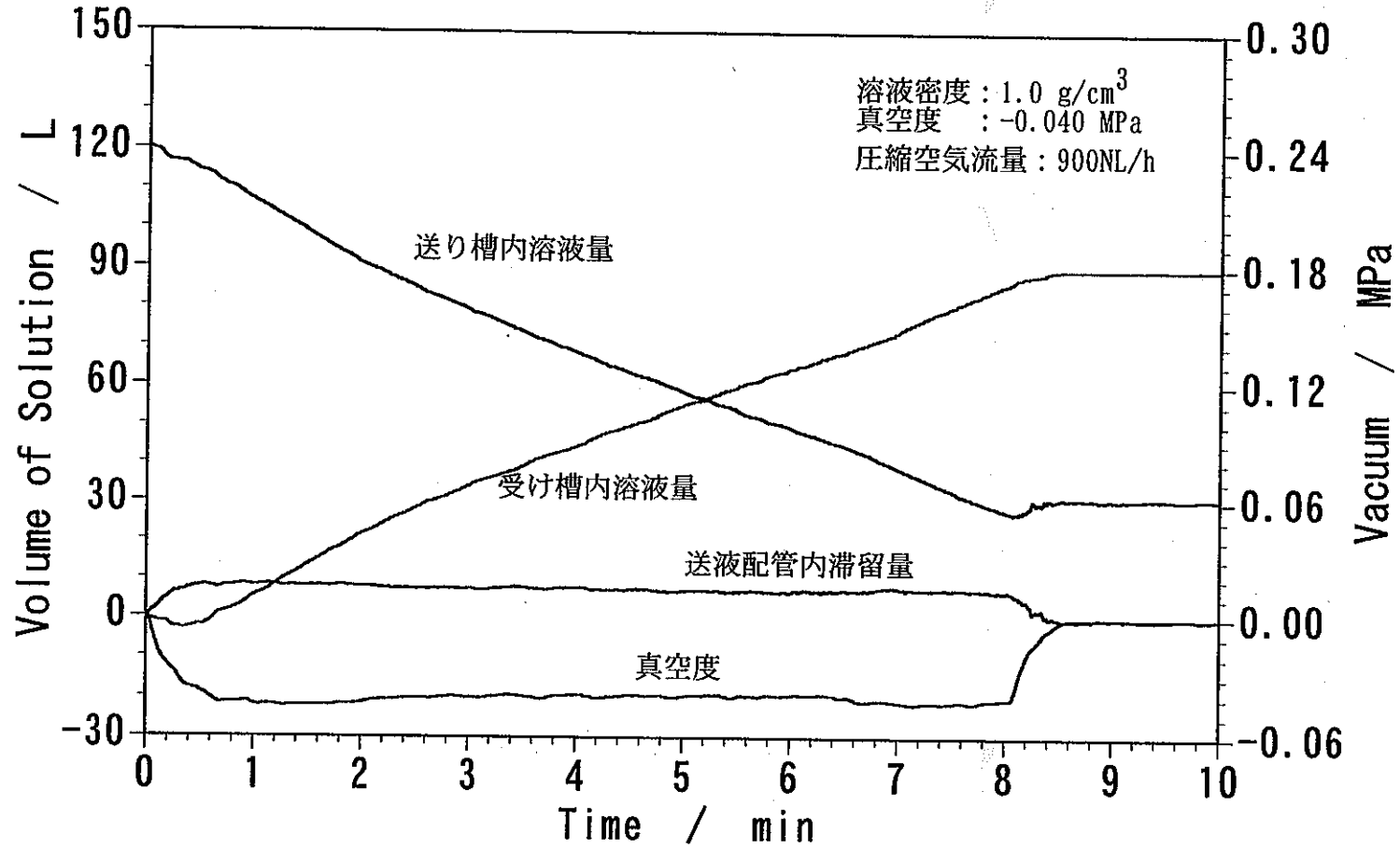
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



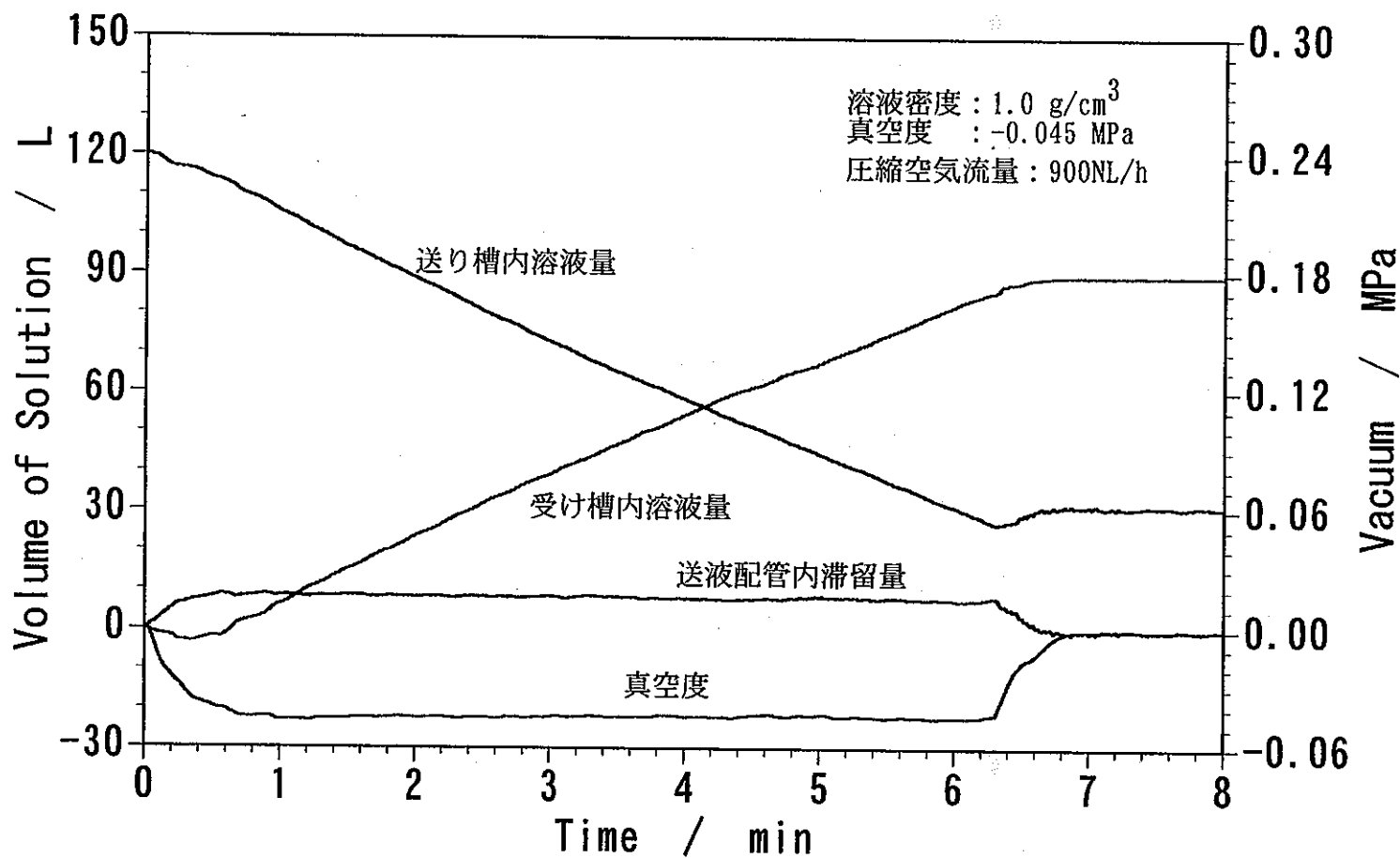
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



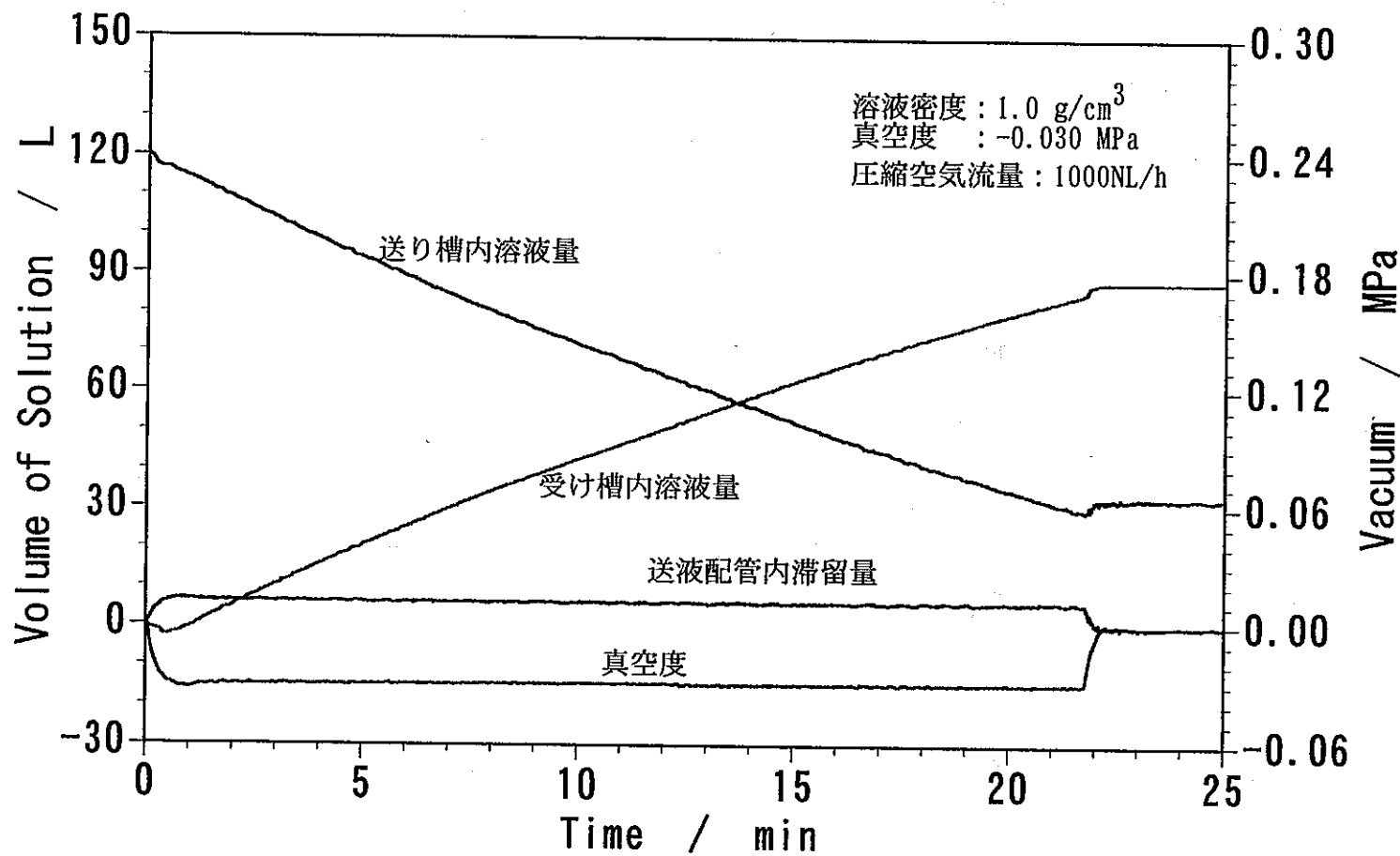
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



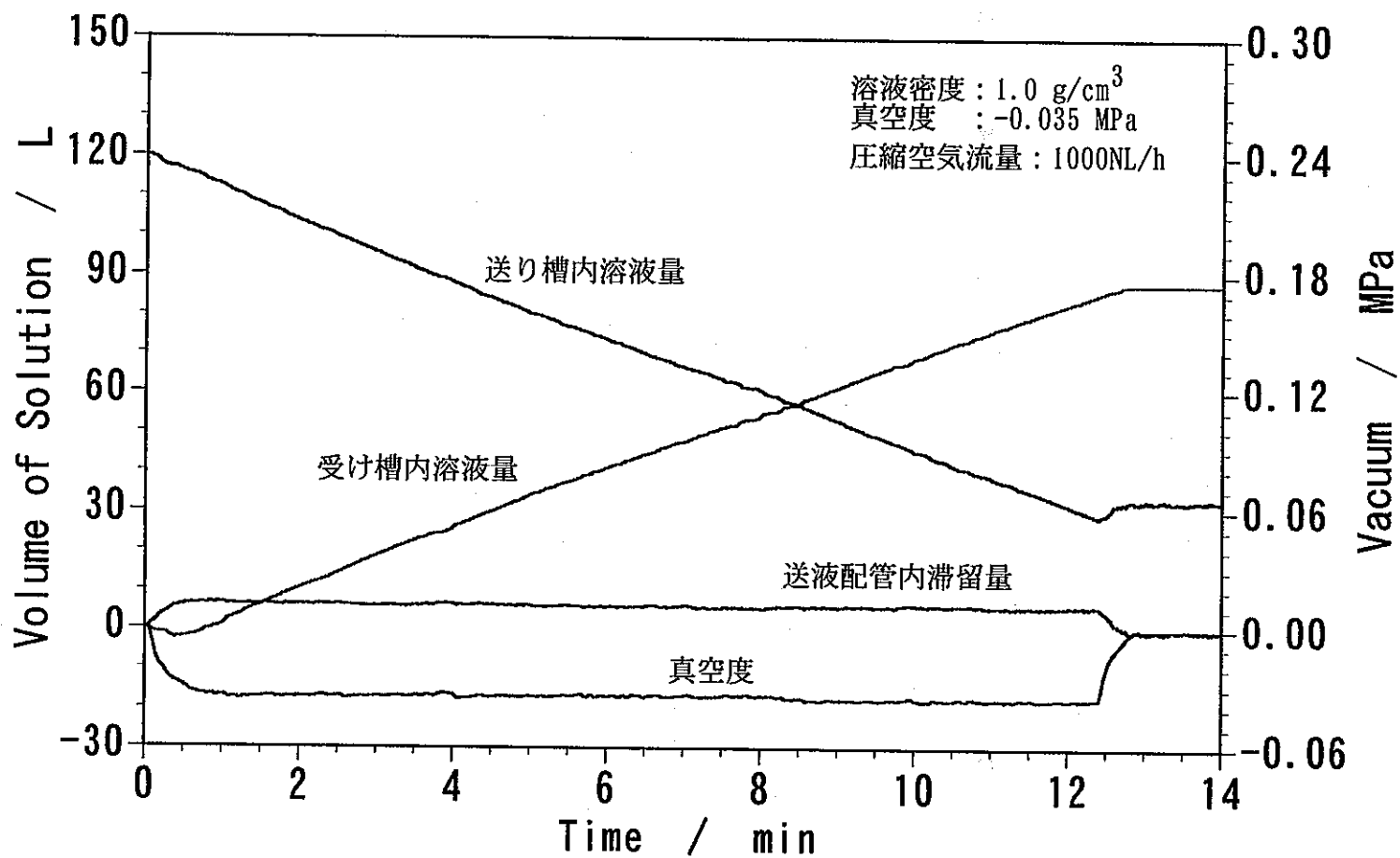
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



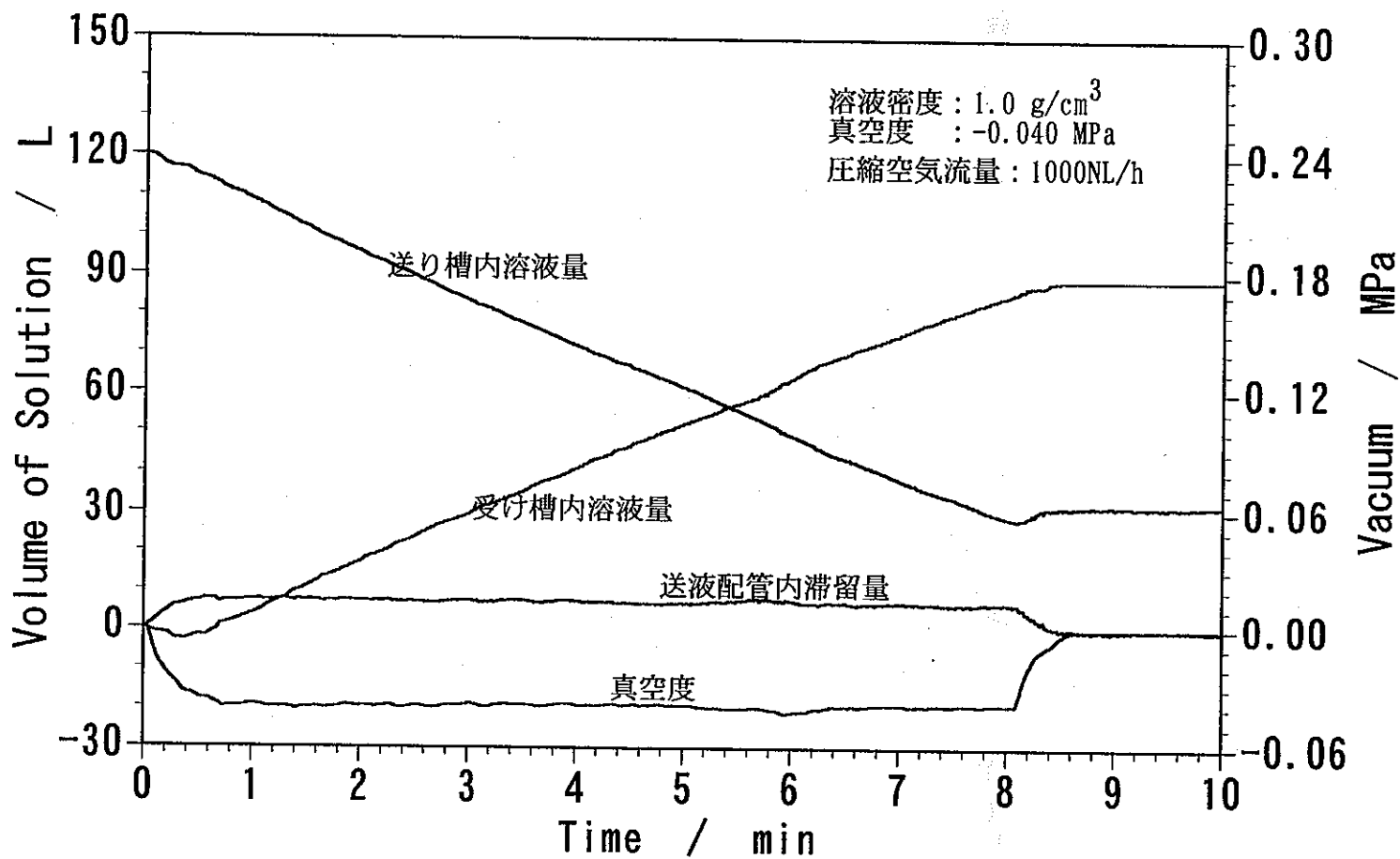
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



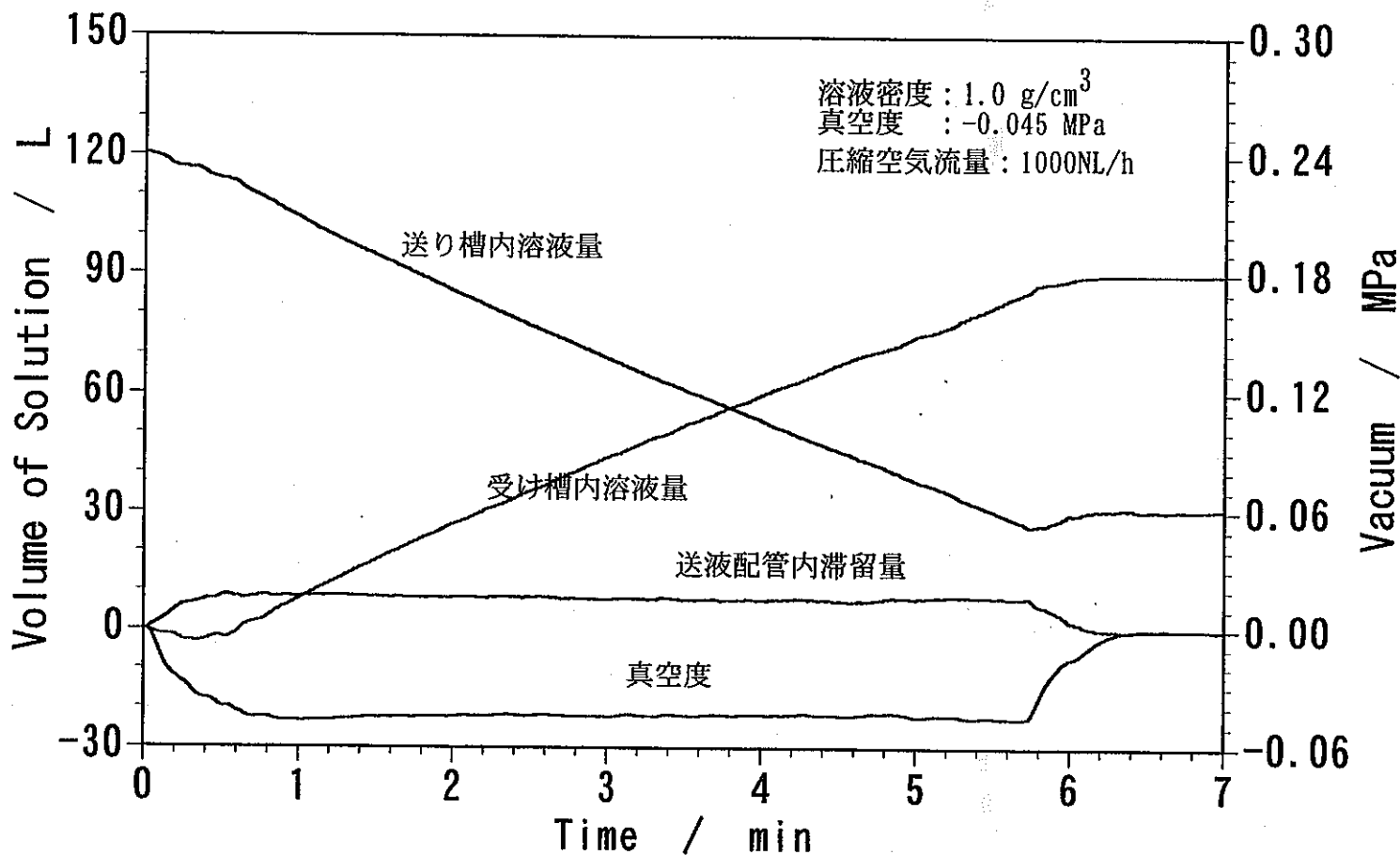
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



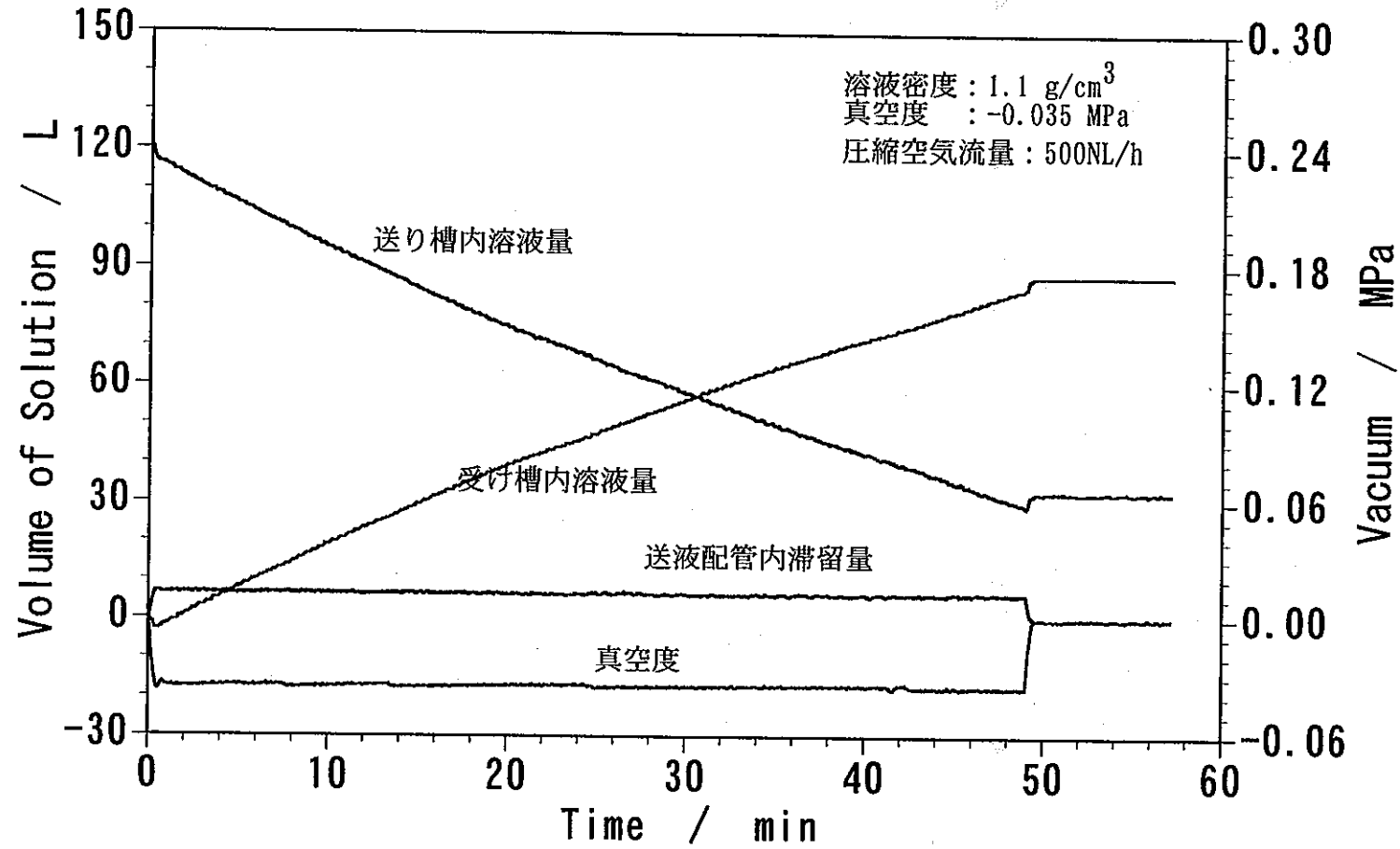
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



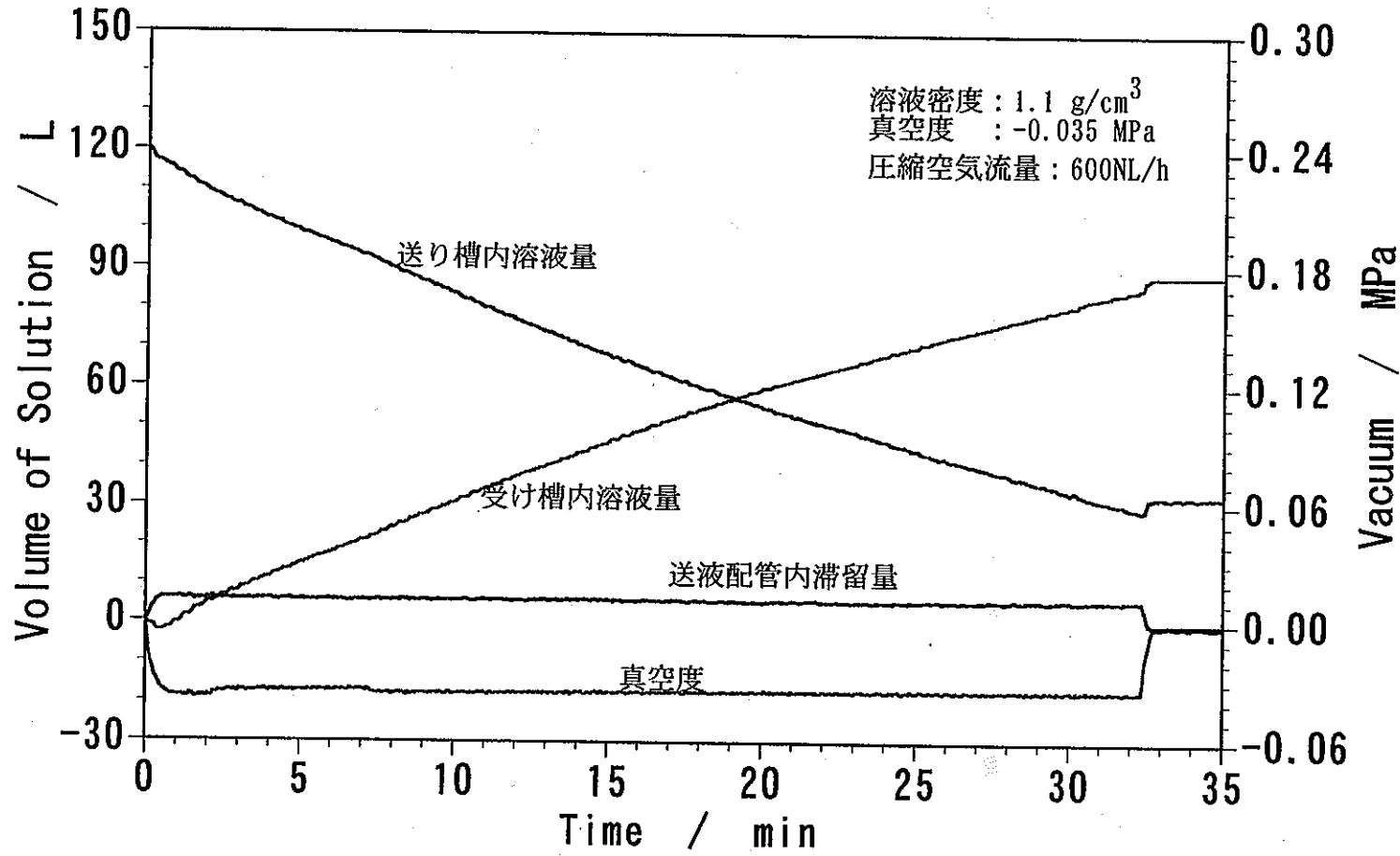
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



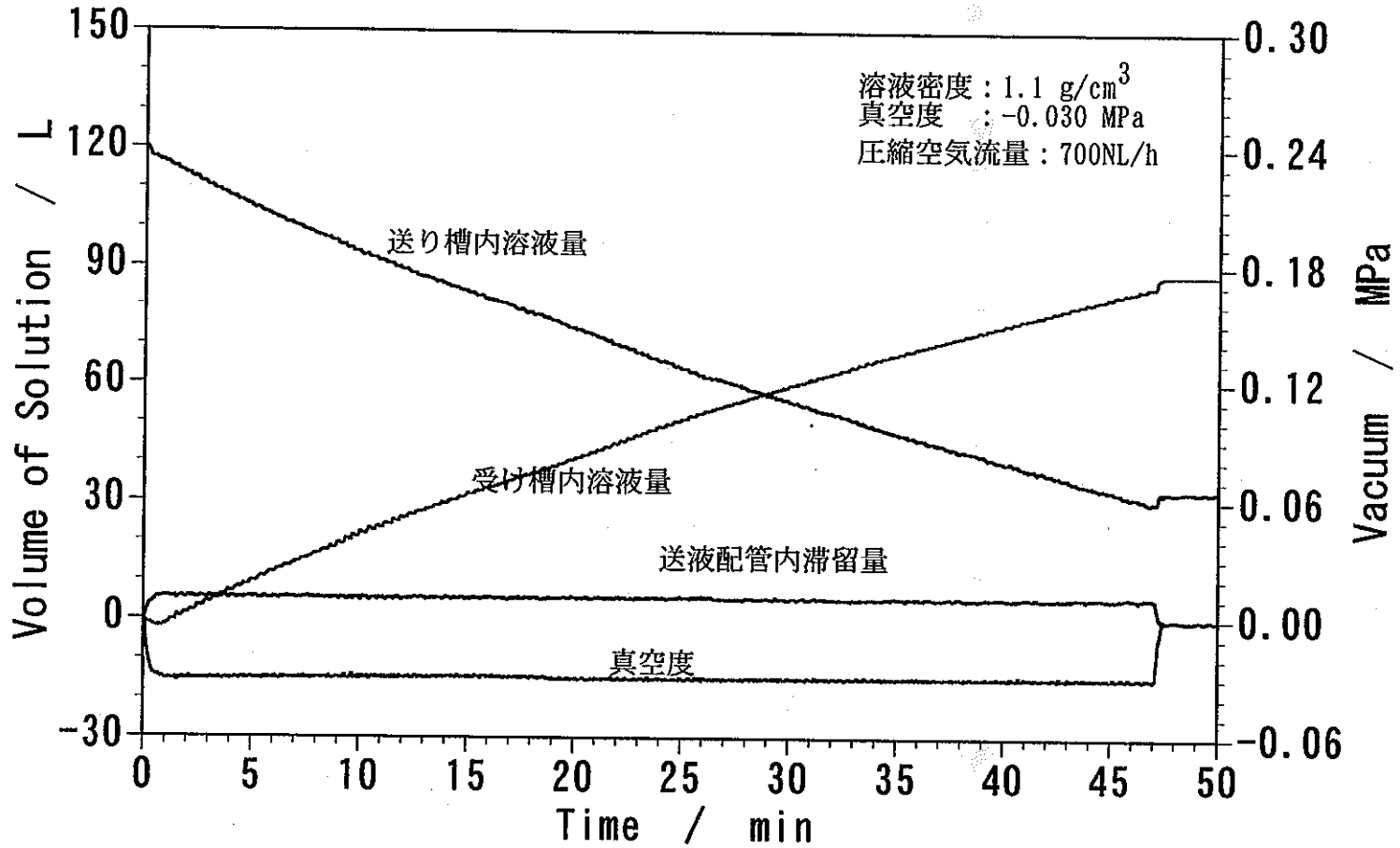
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



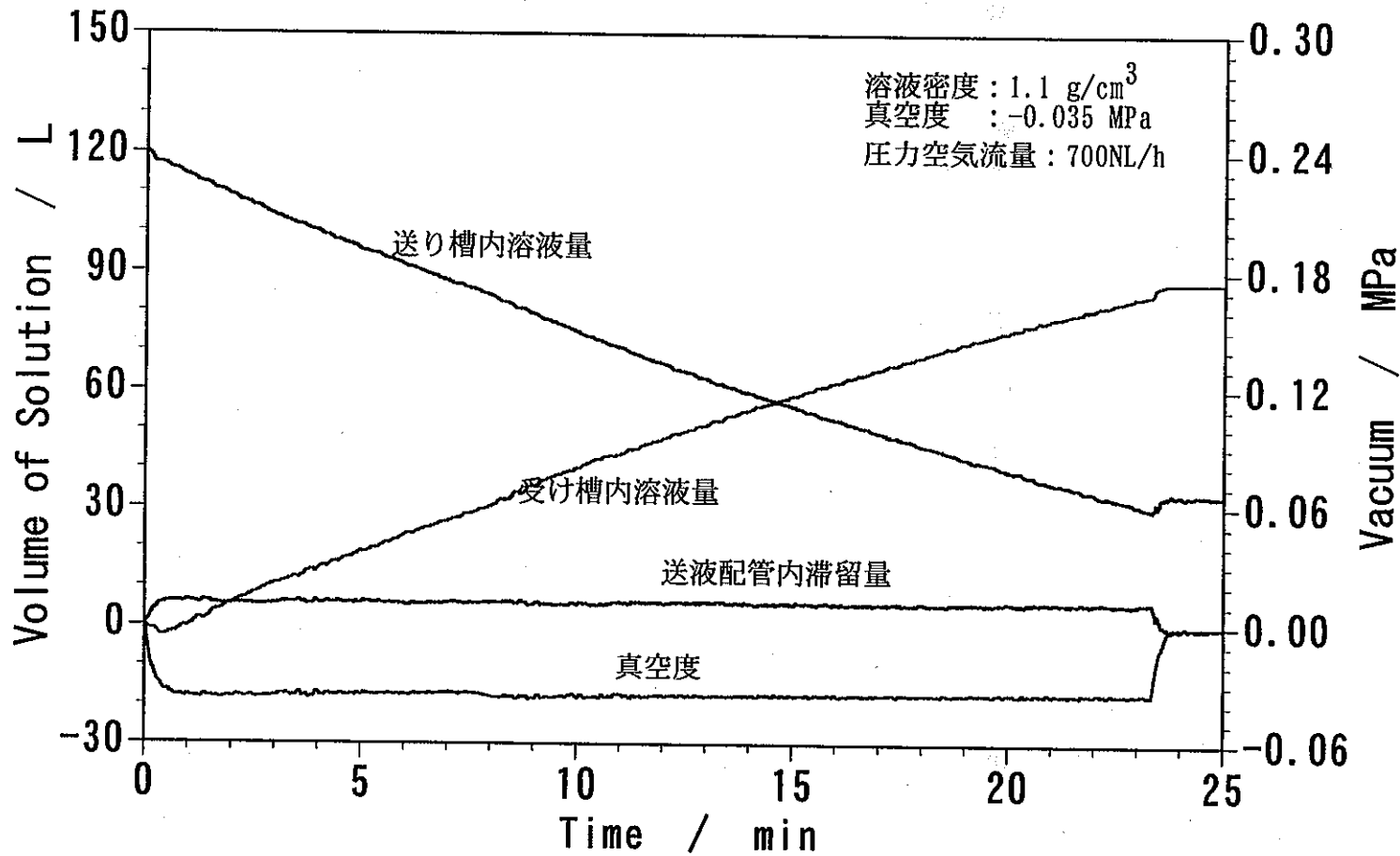
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



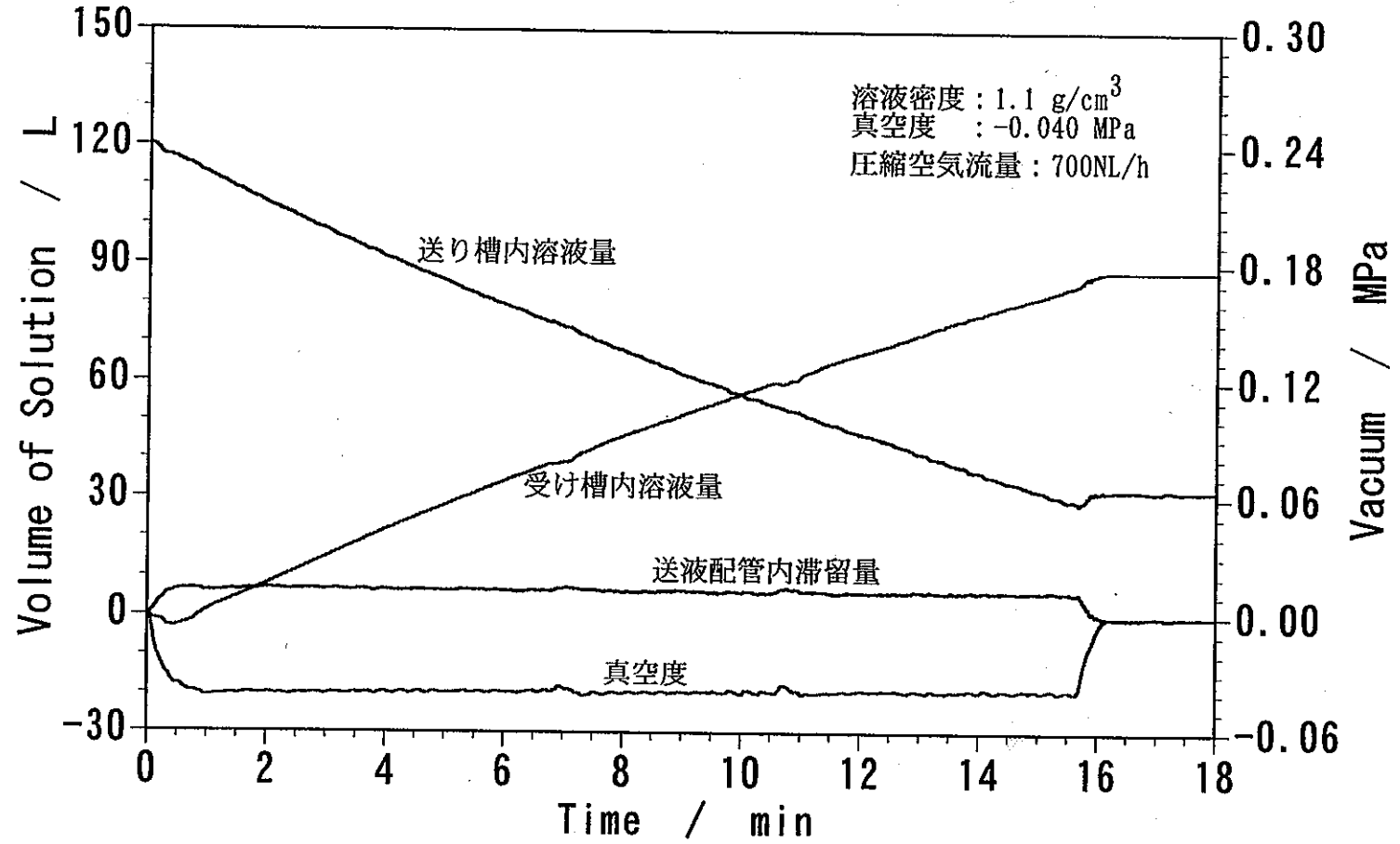
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



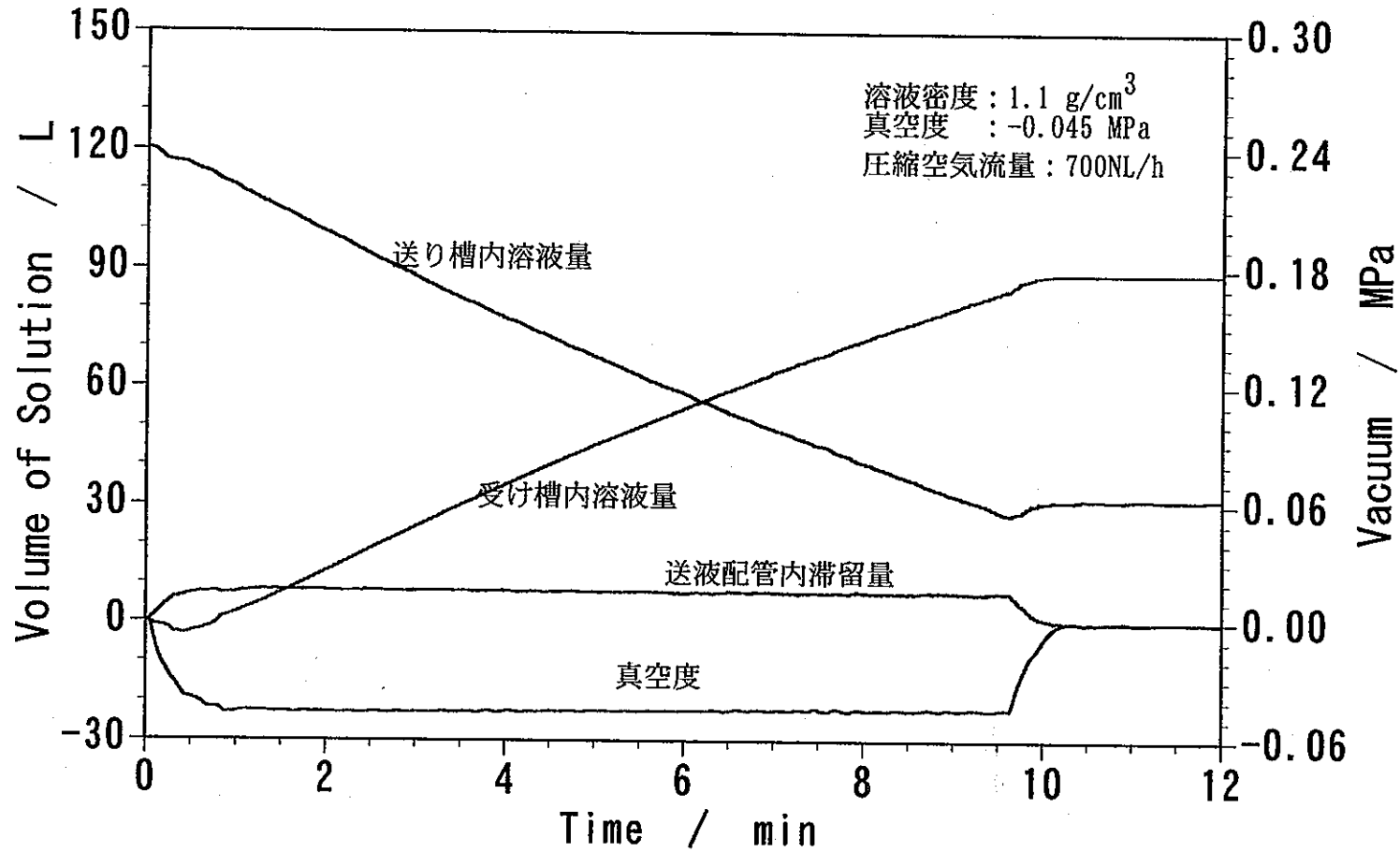
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



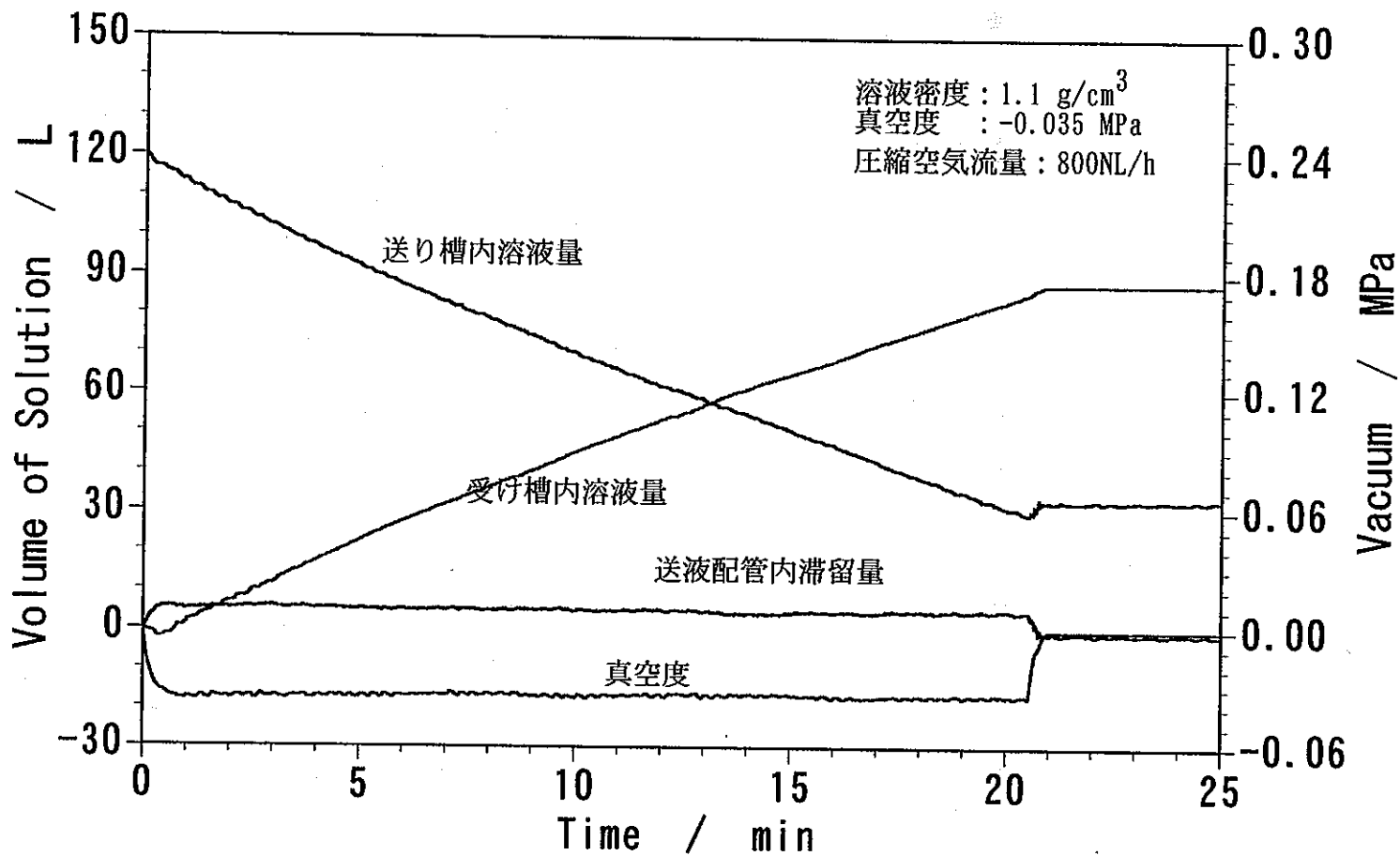
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



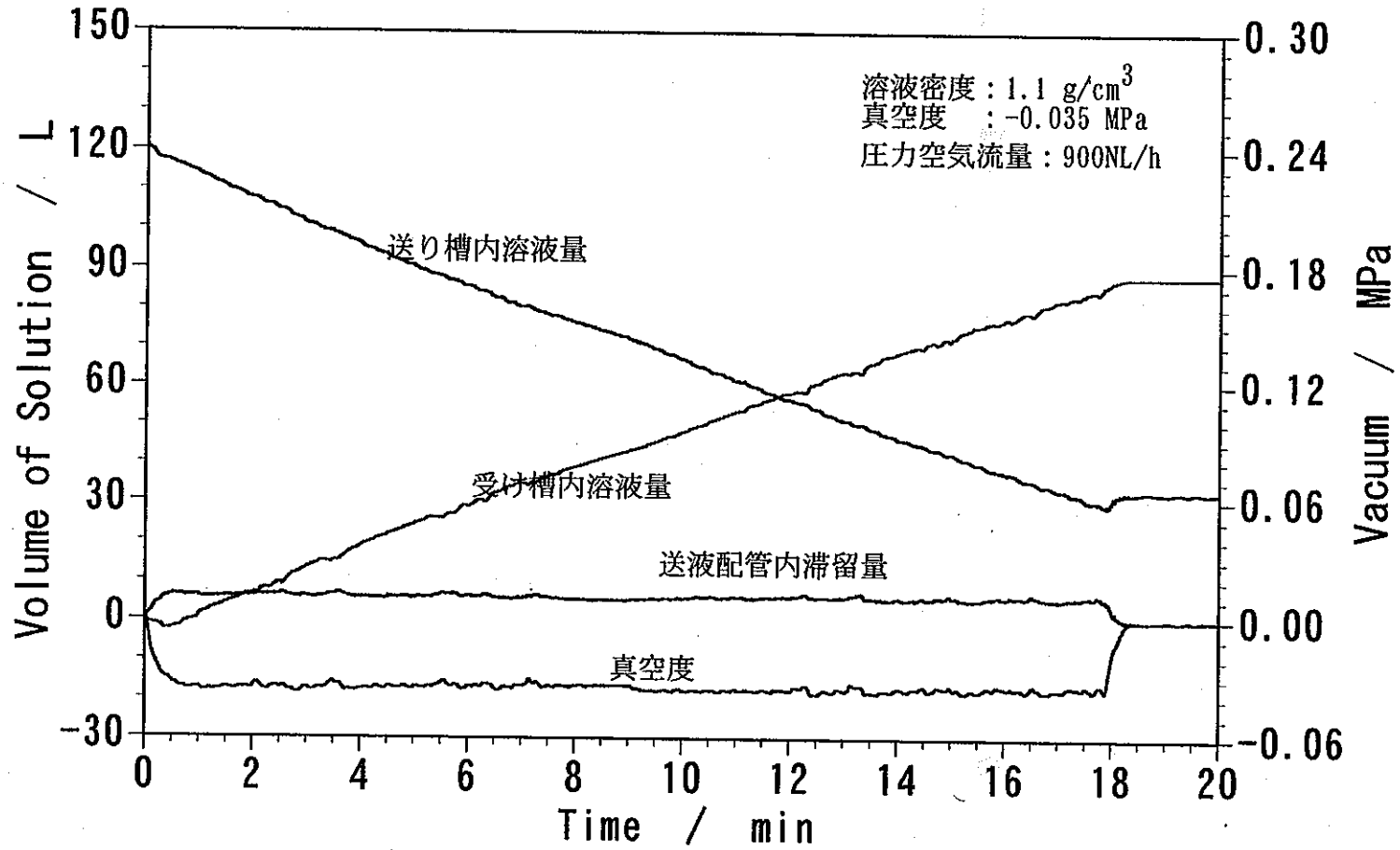
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



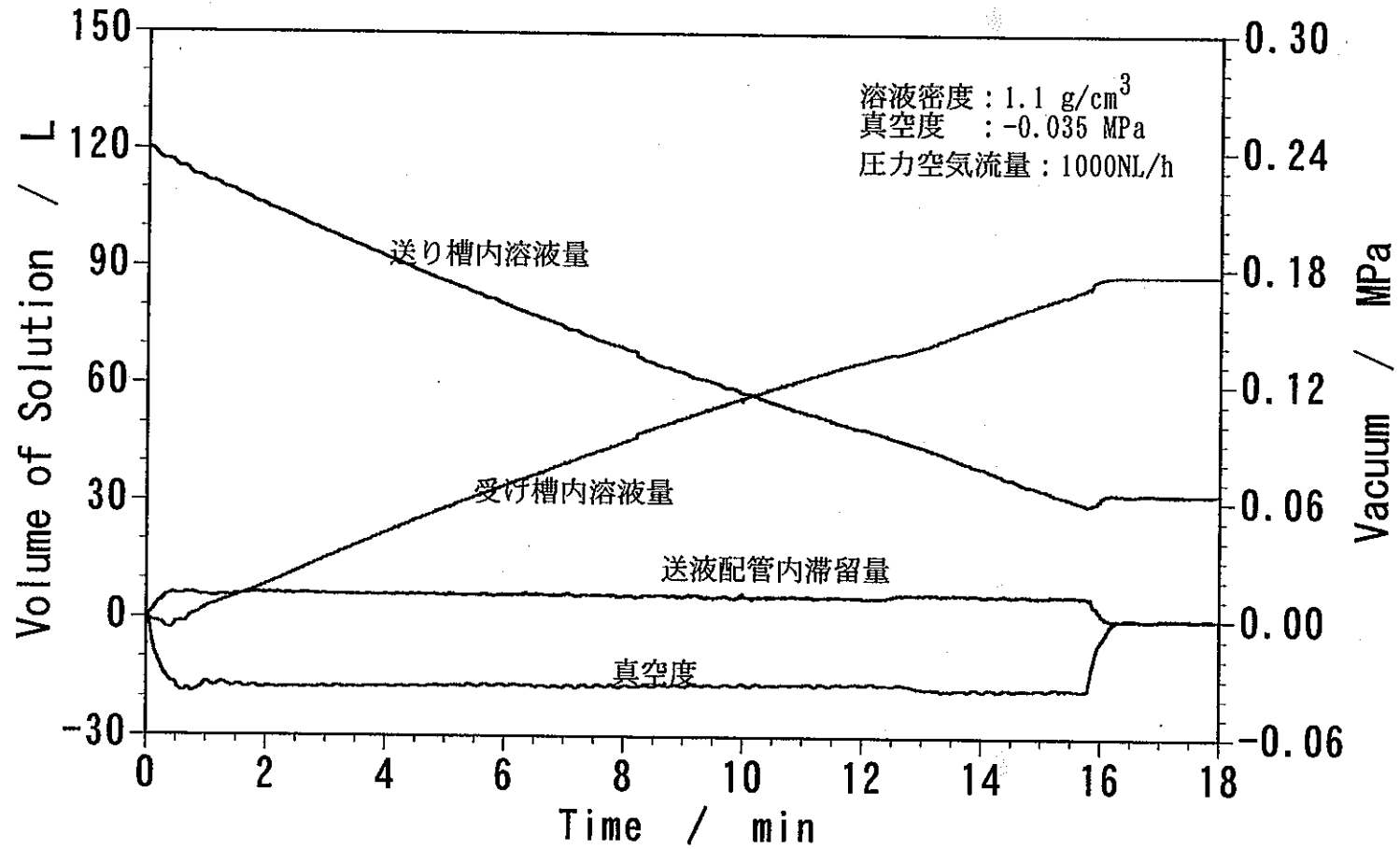
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



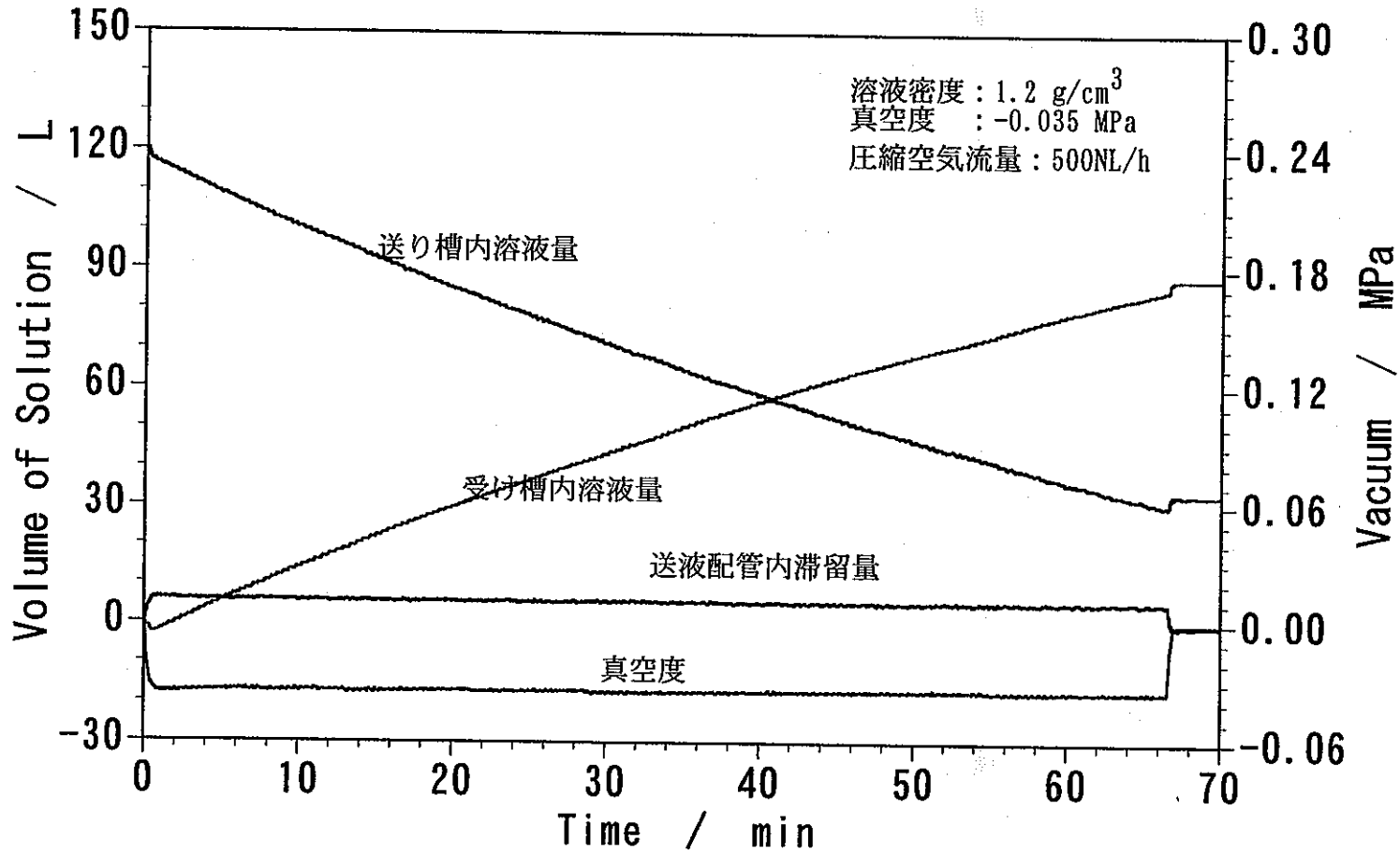
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



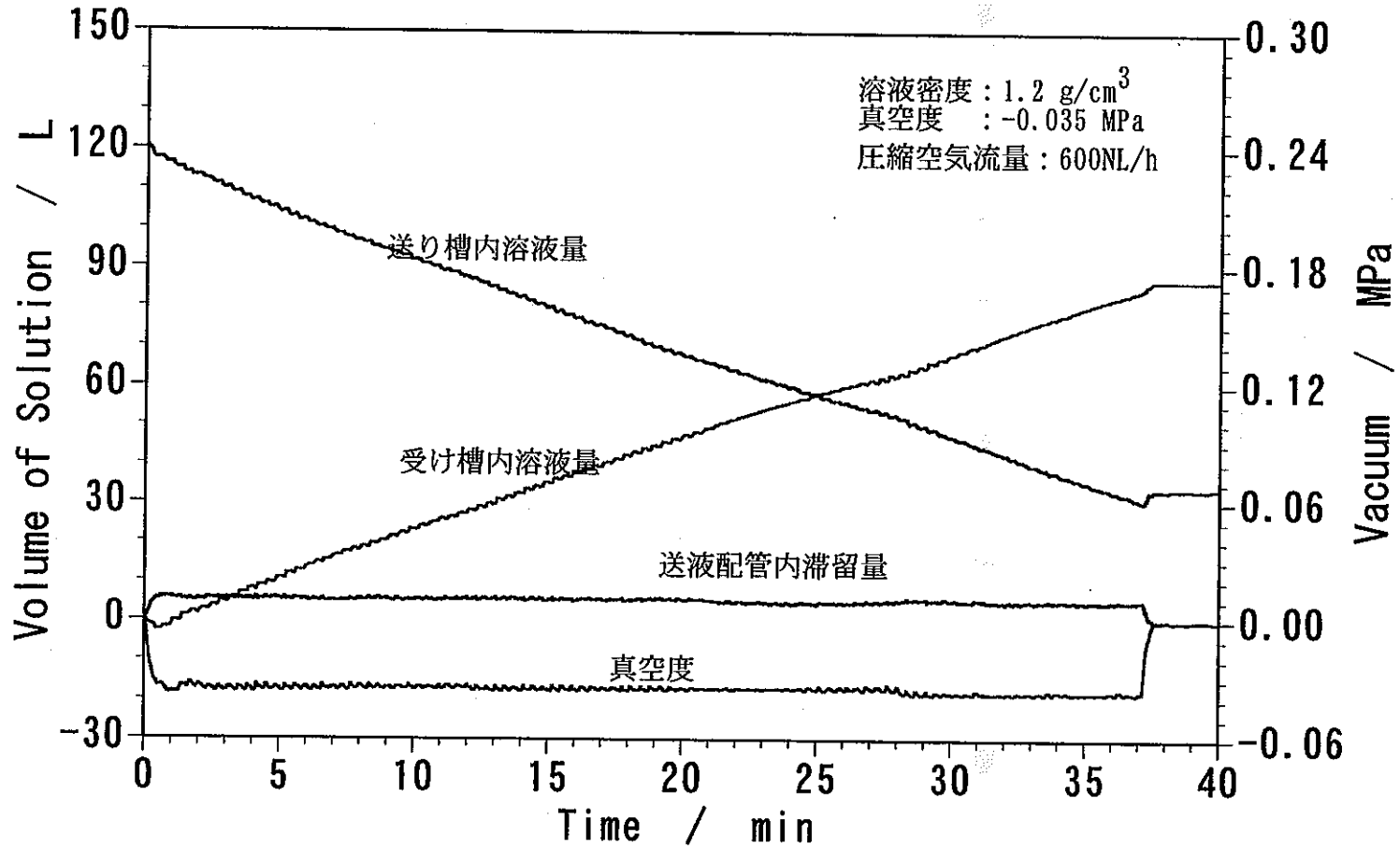
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



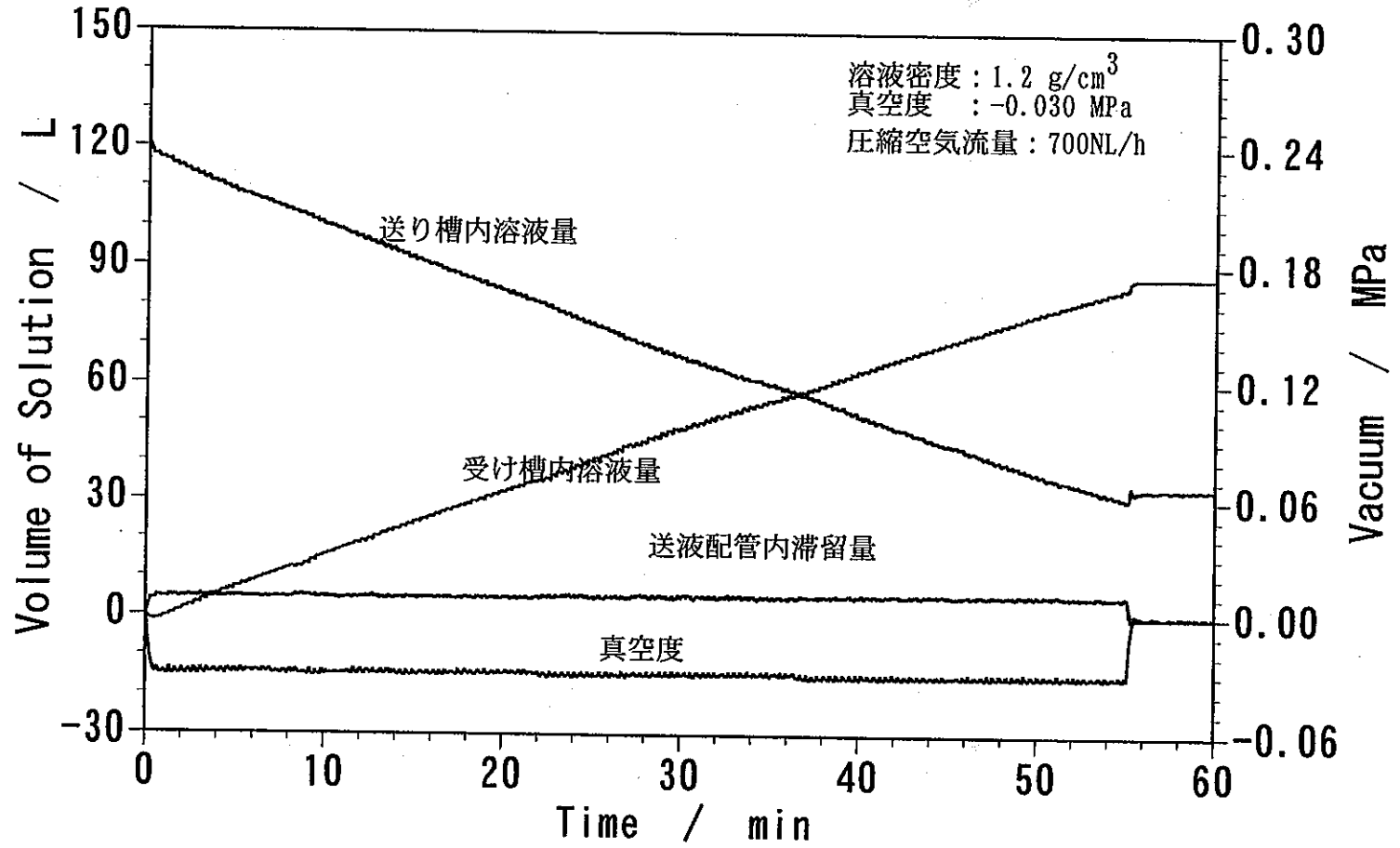
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



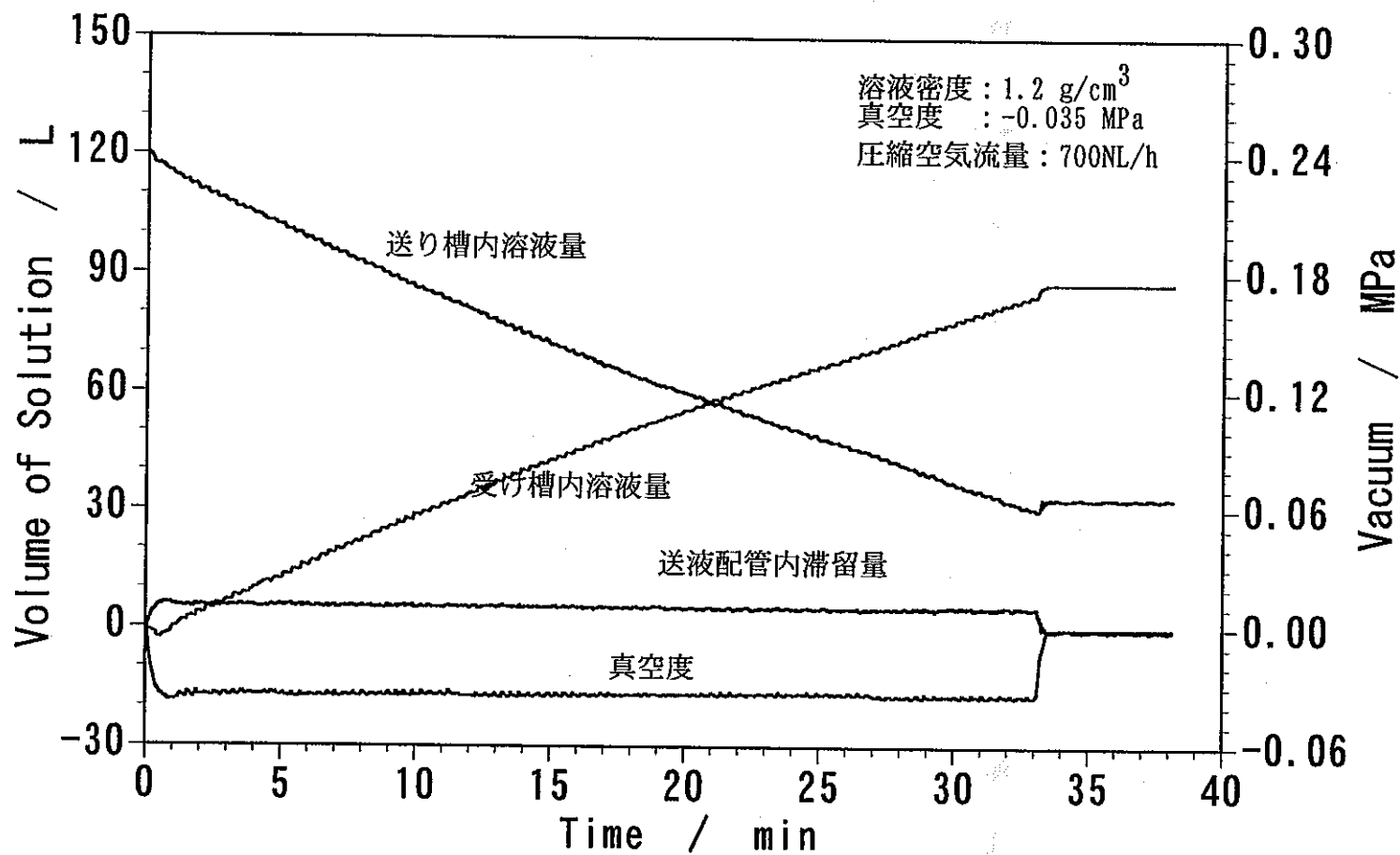
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



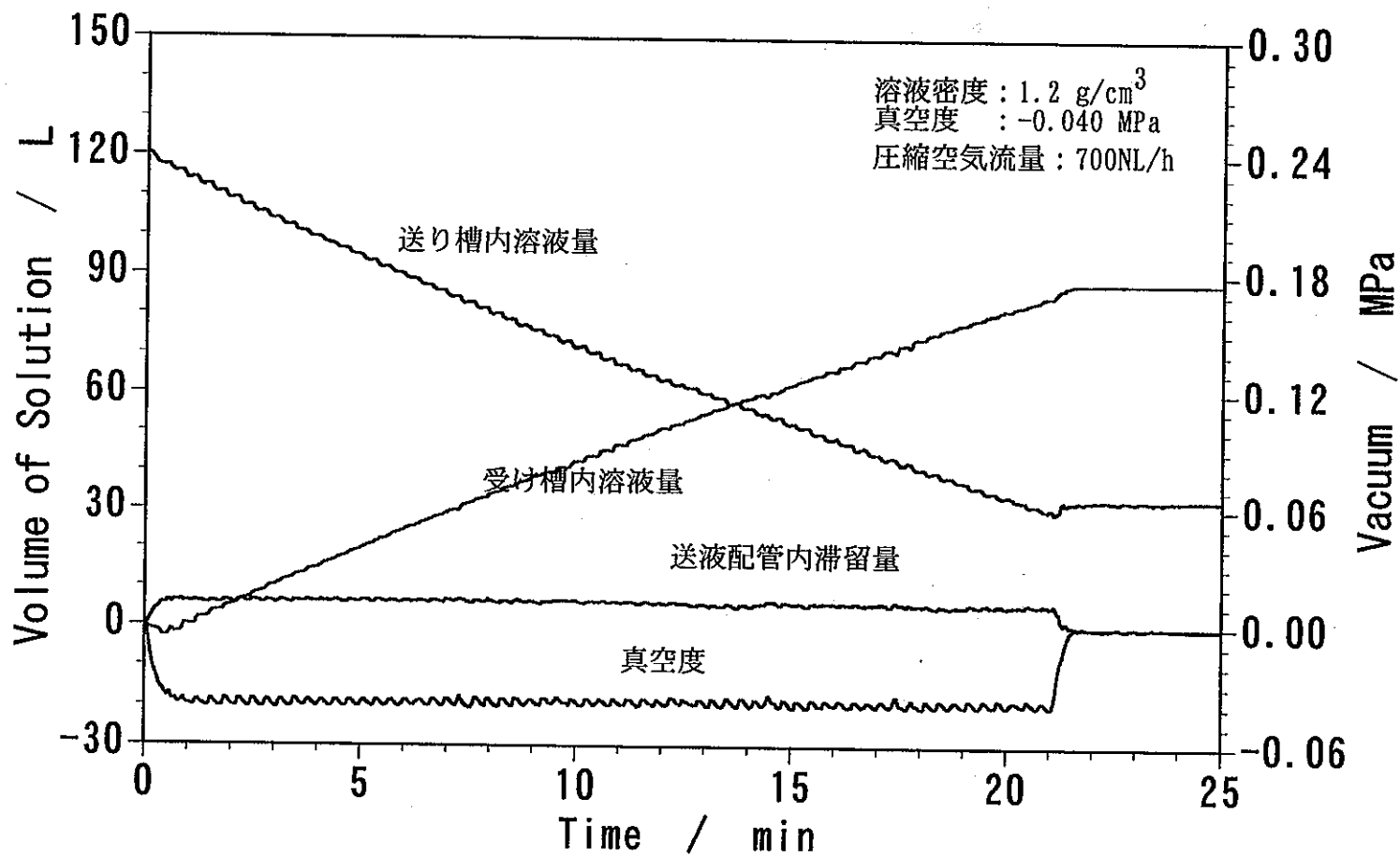
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



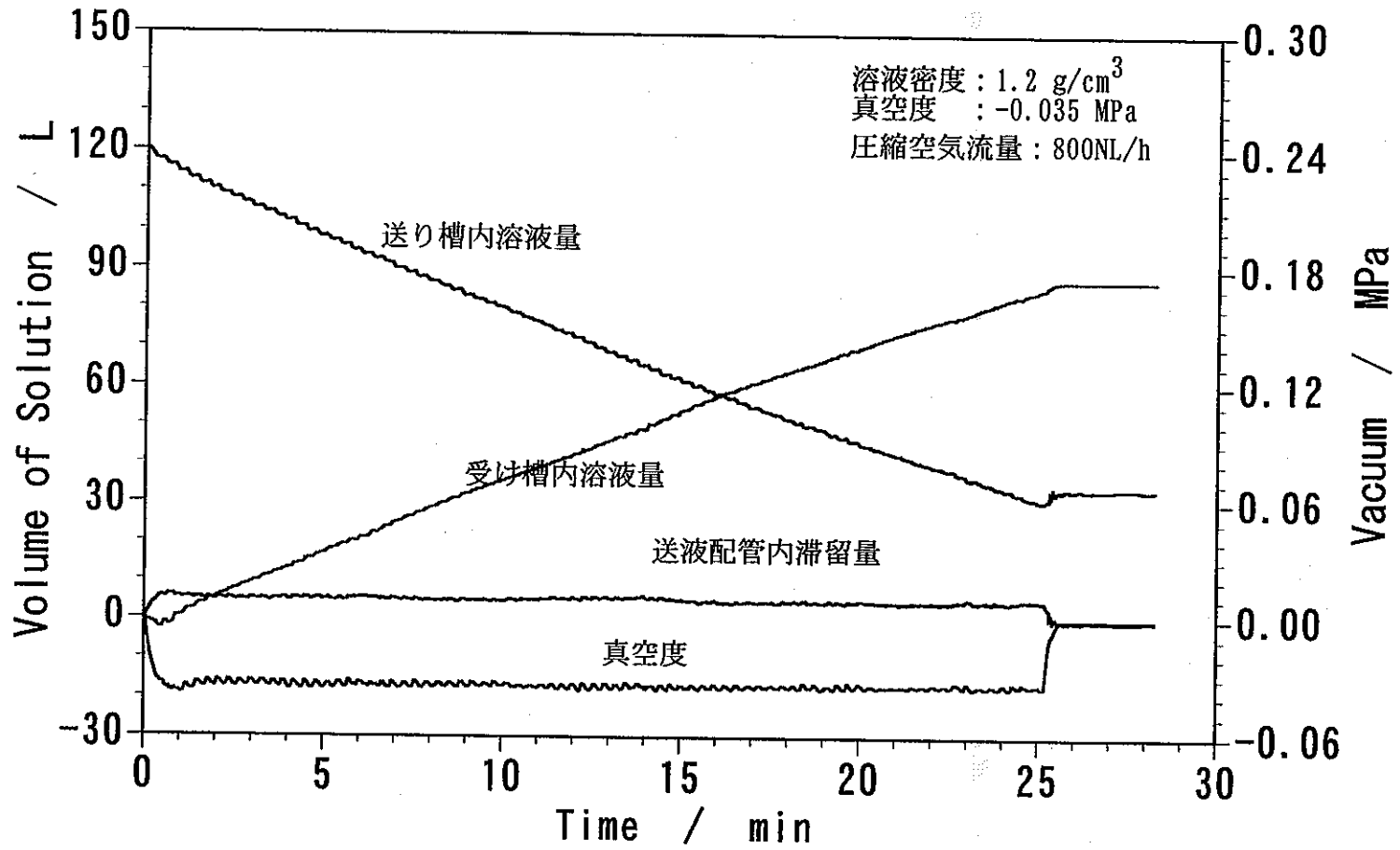
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



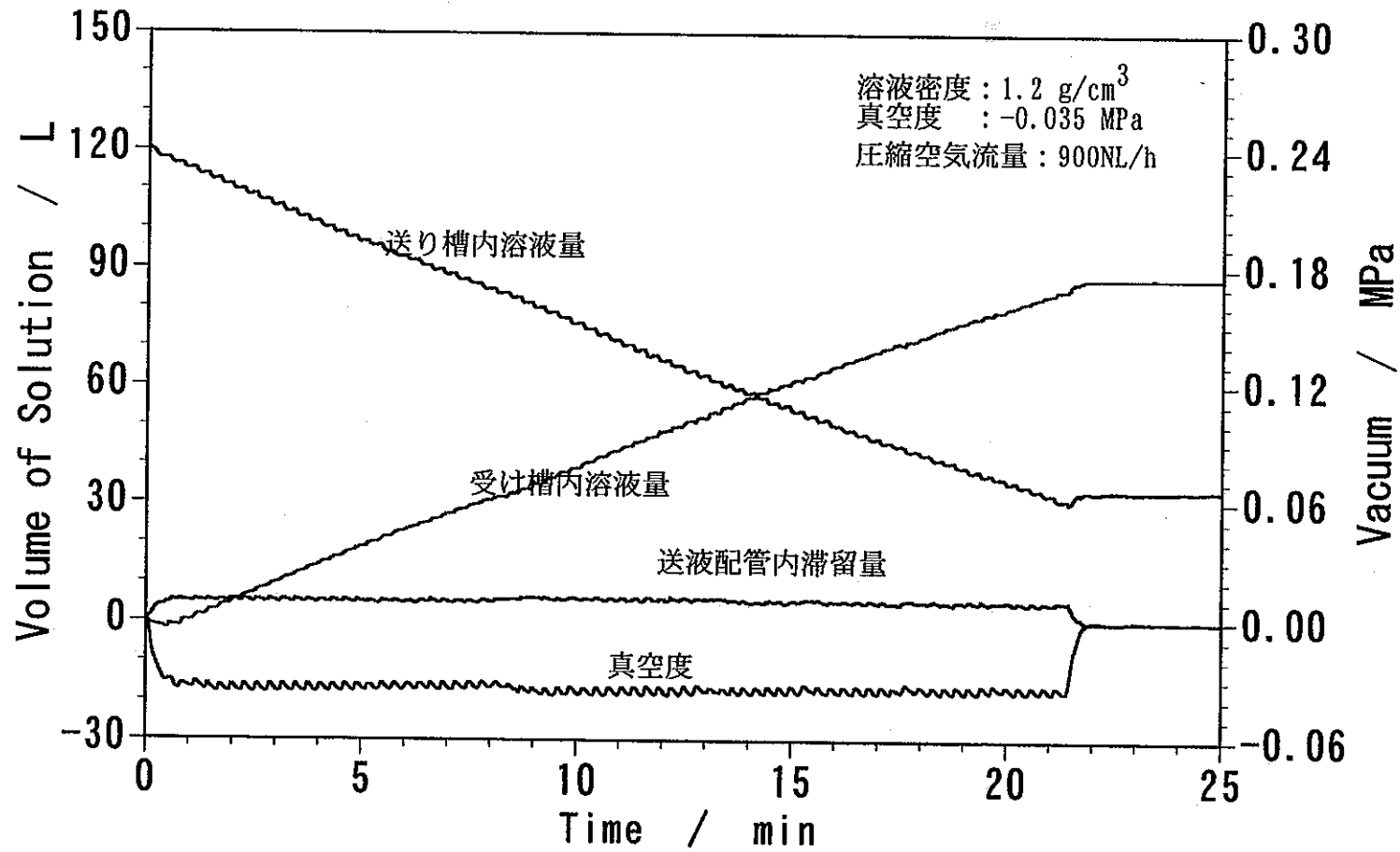
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



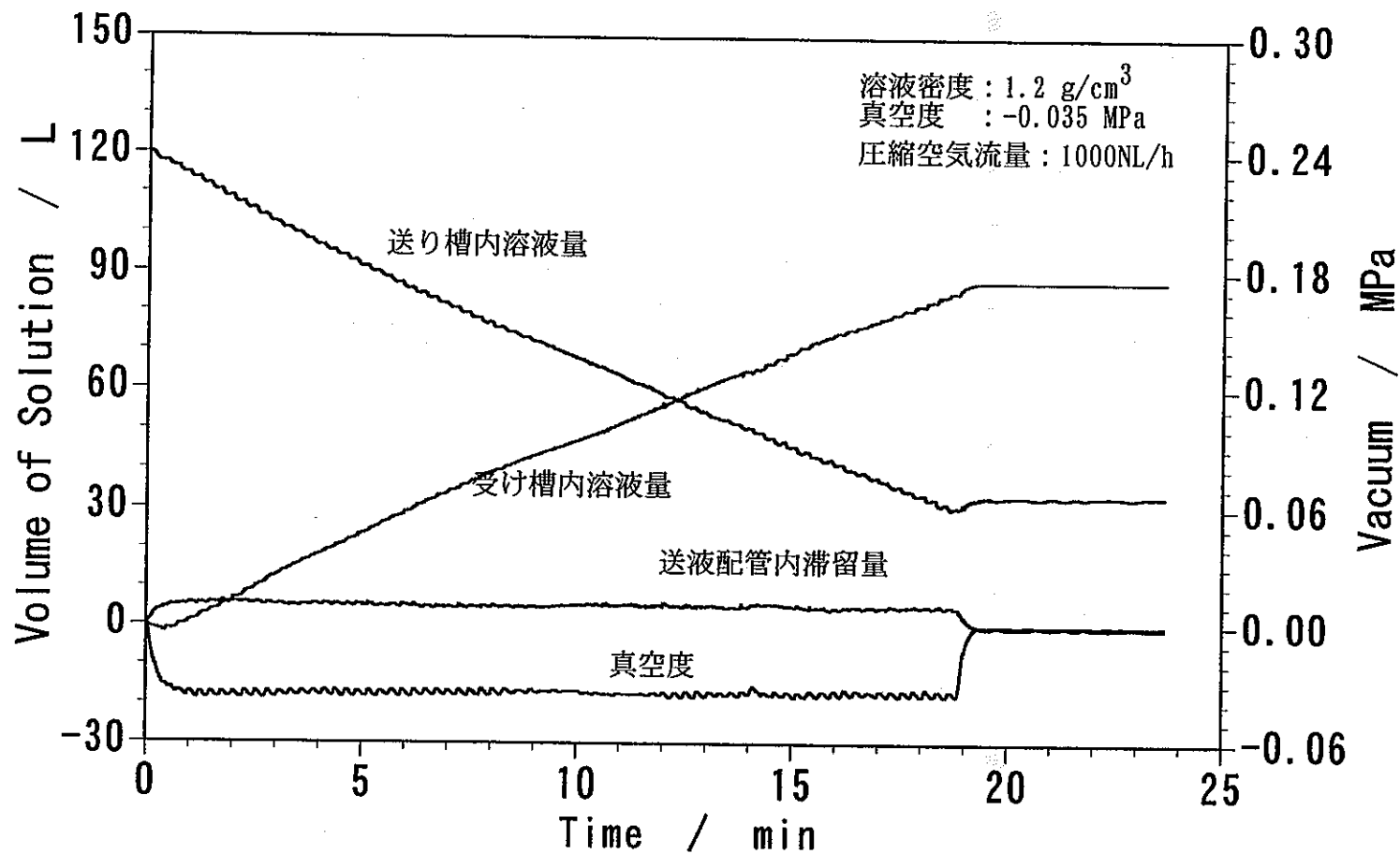
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



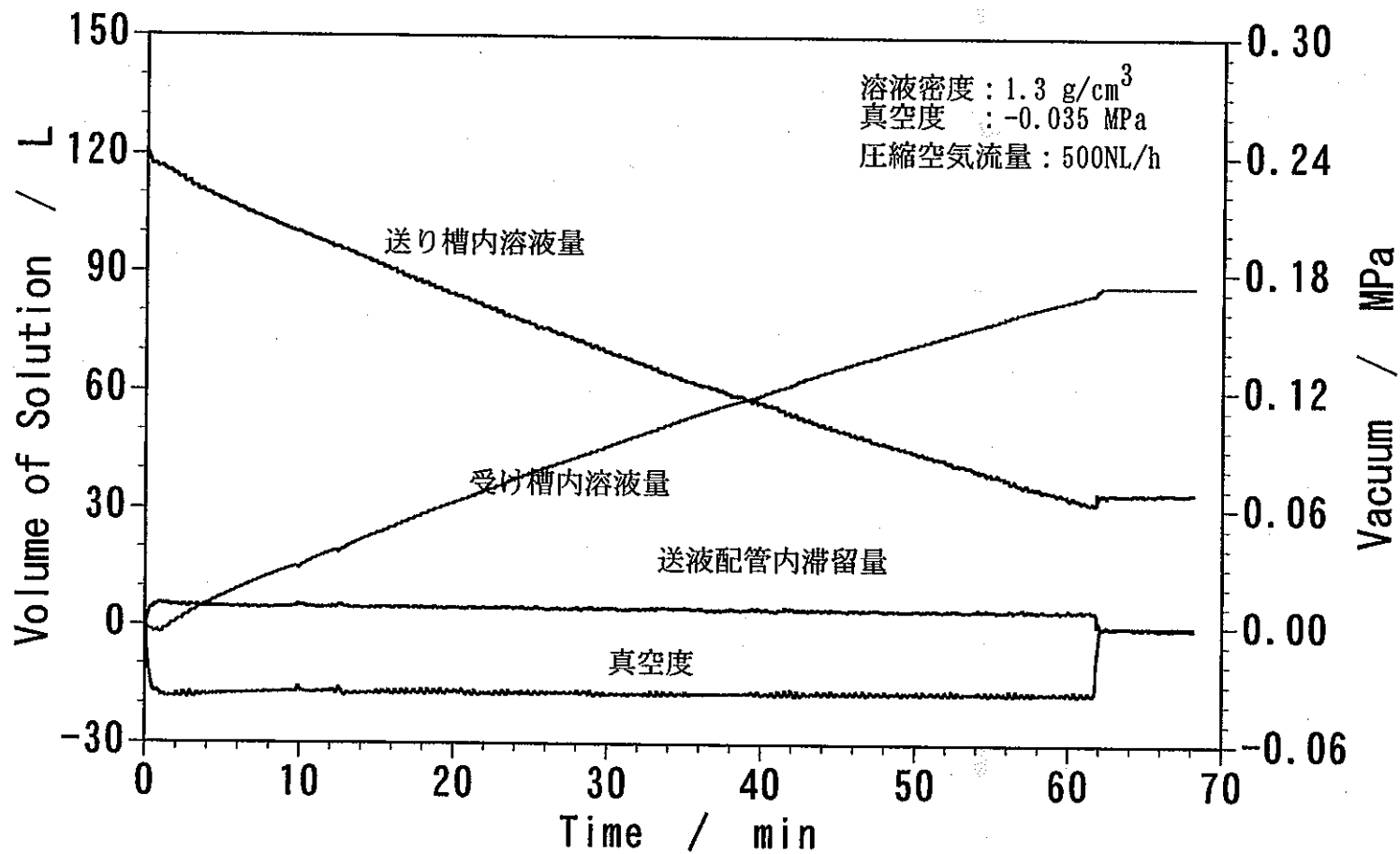
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



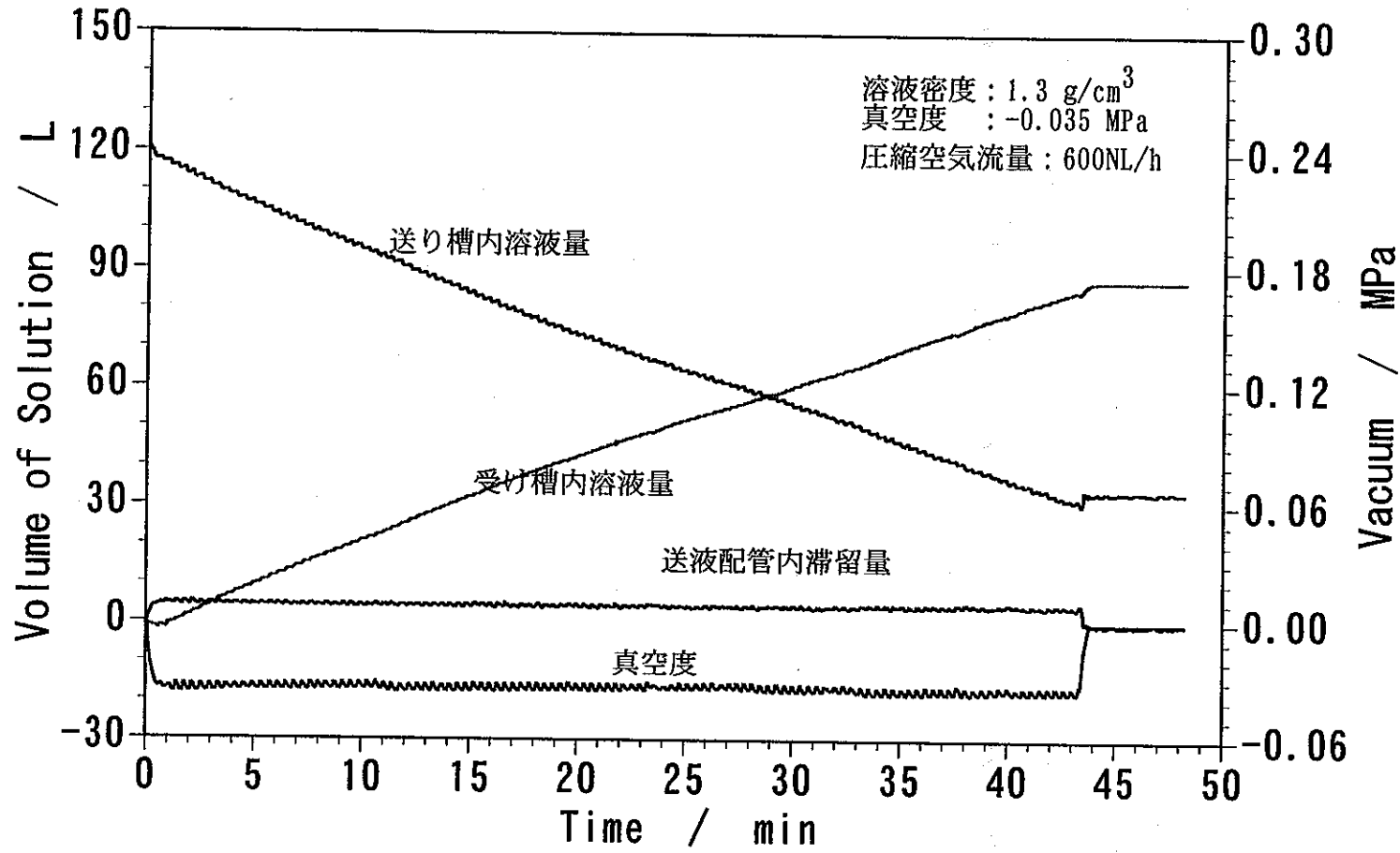
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



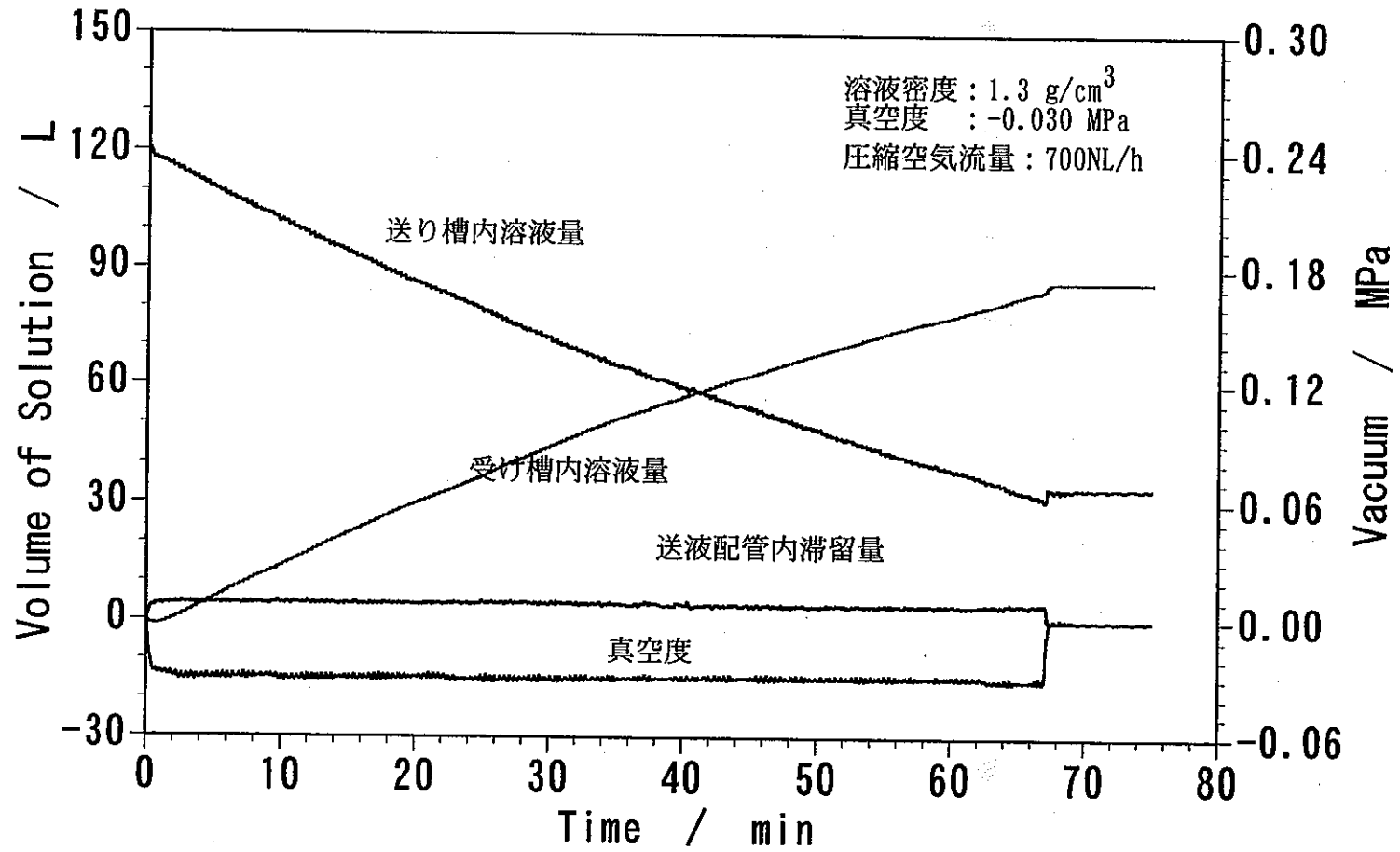
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



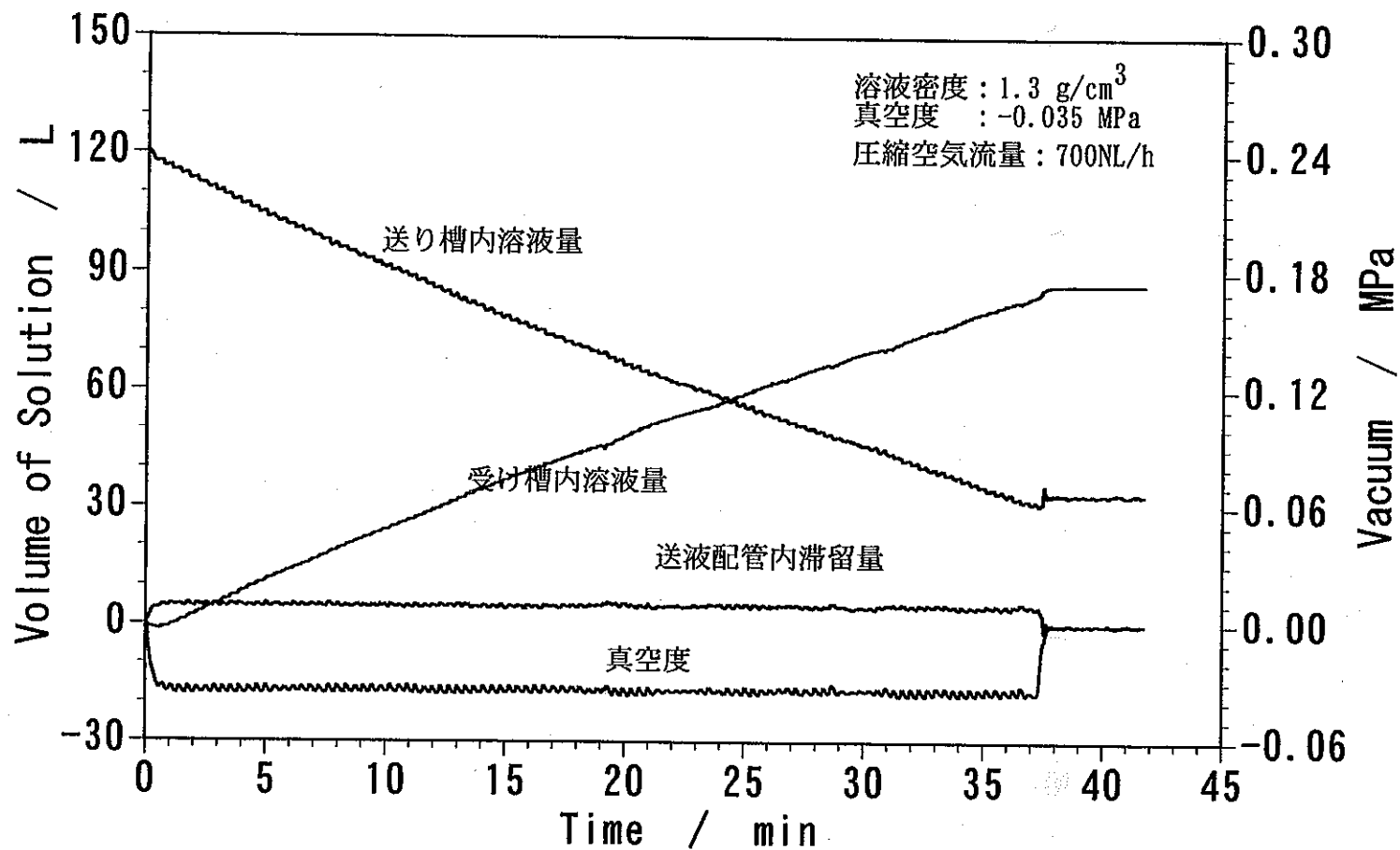
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



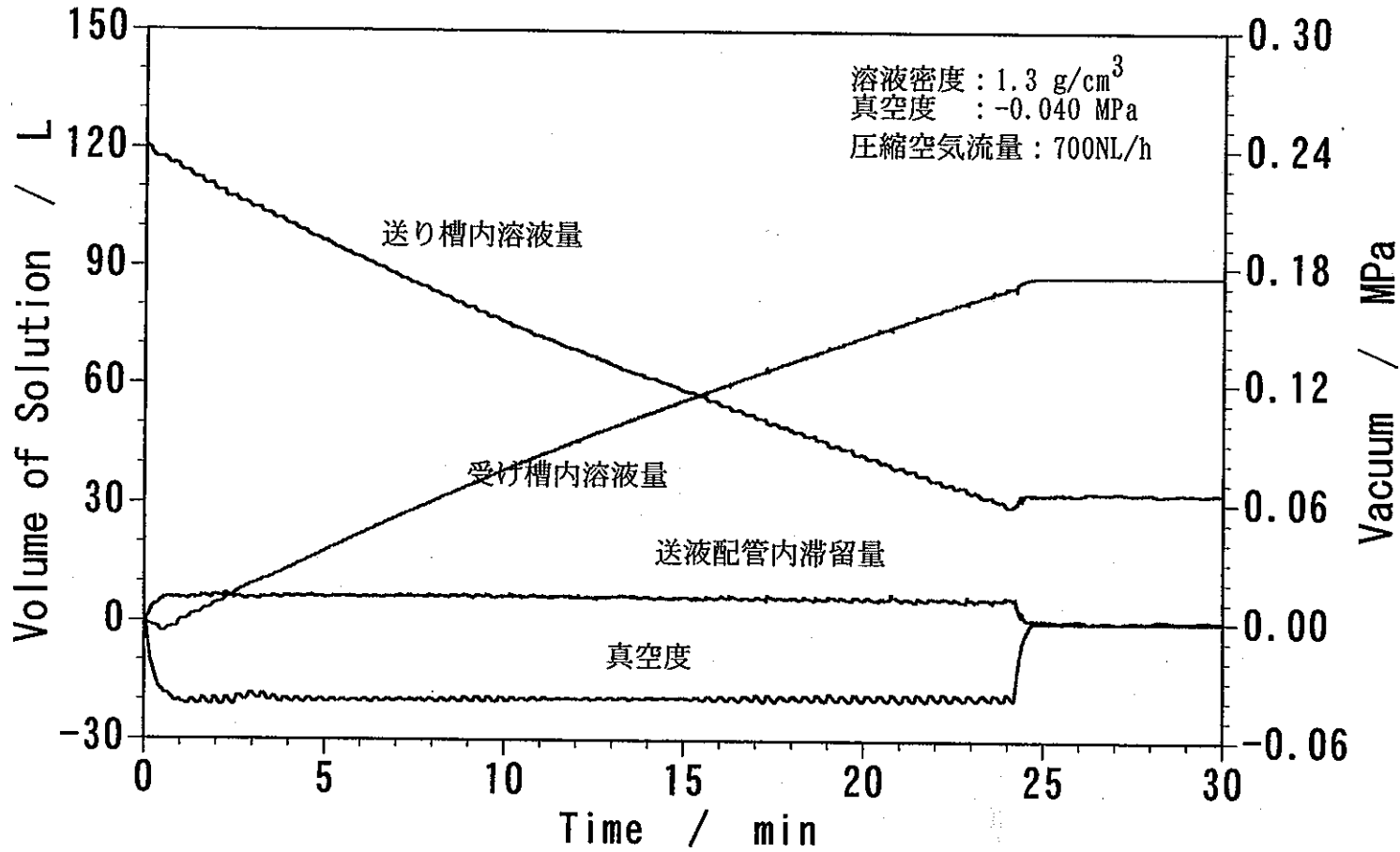
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



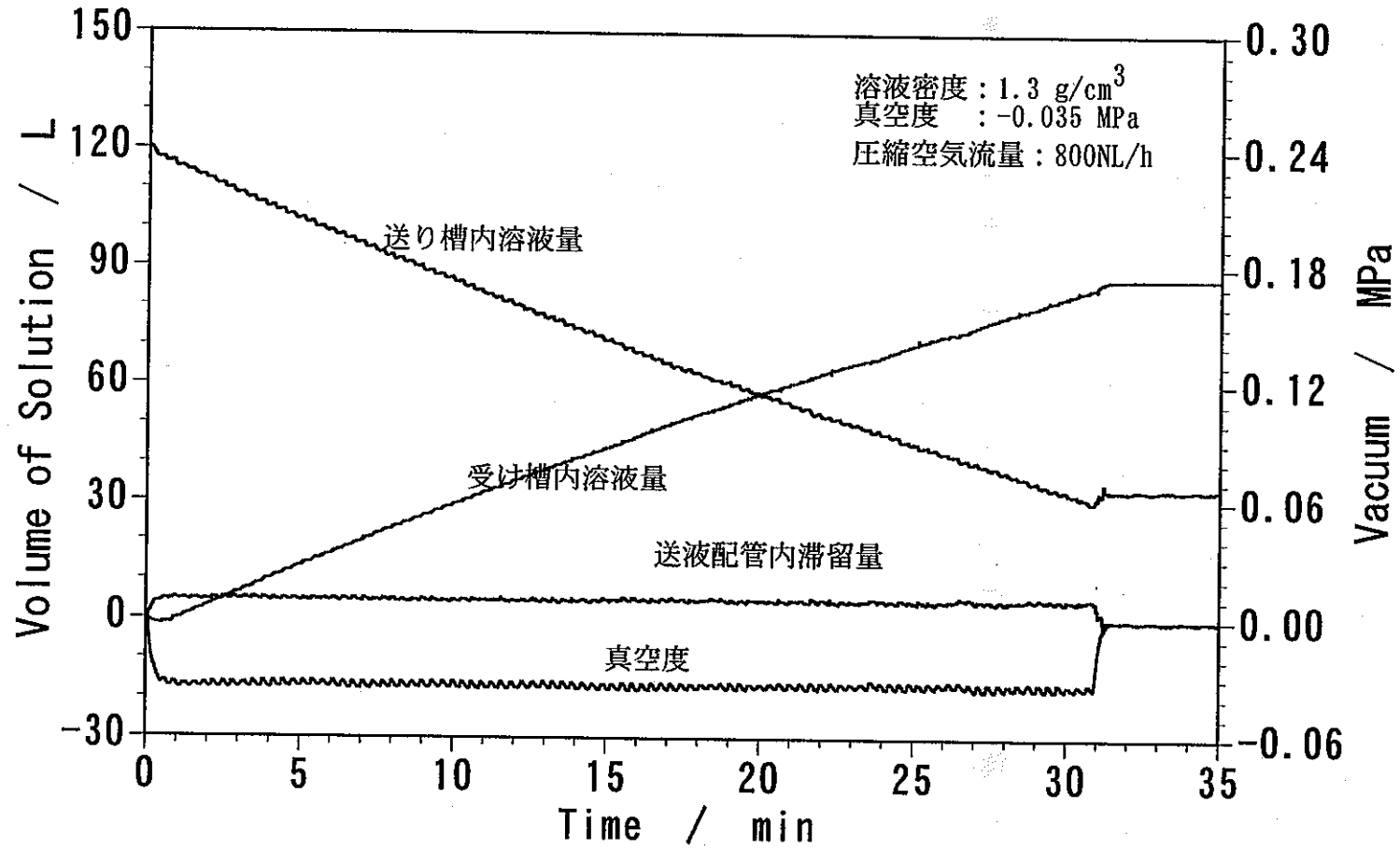
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



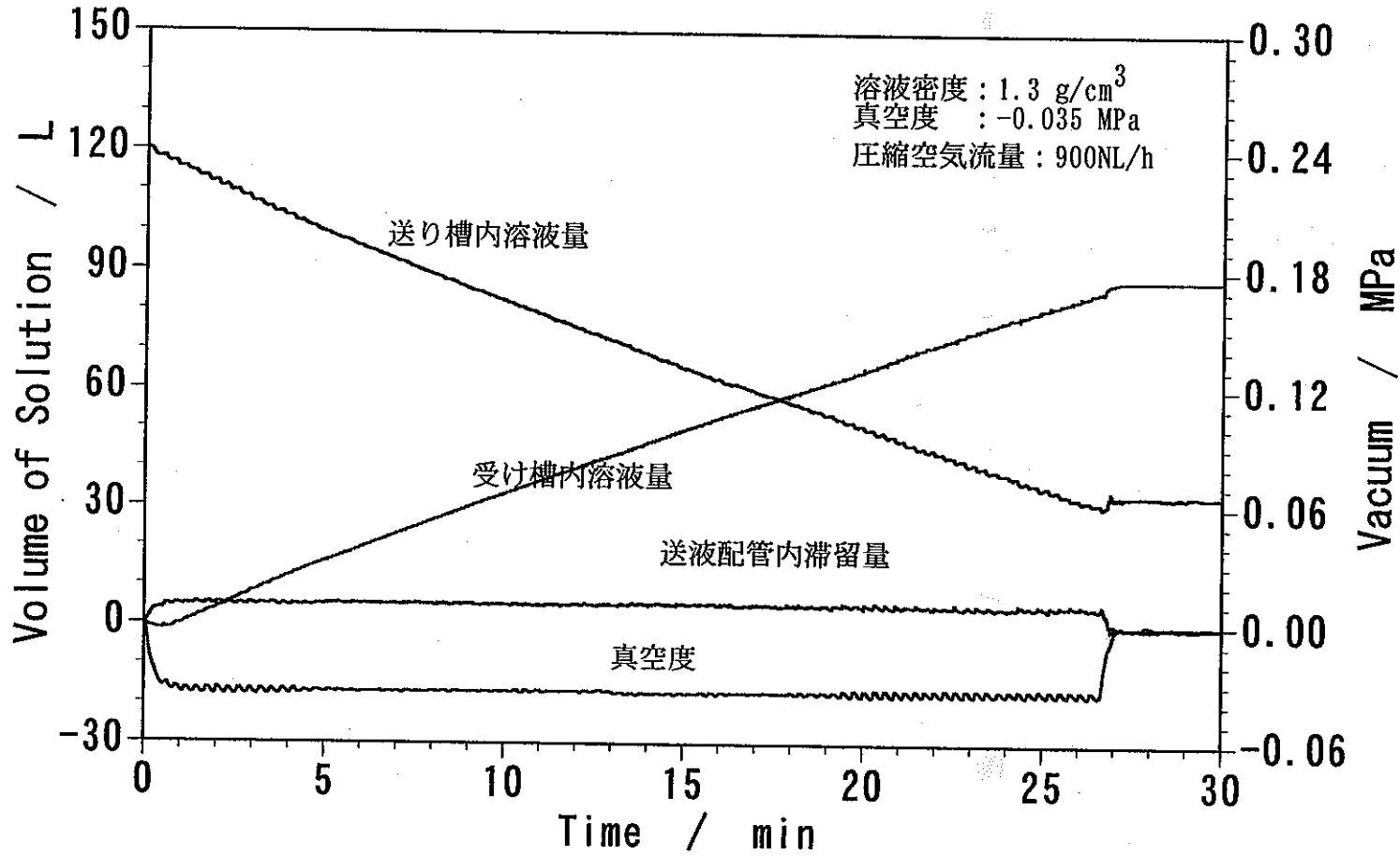
送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化



送液中の受け槽、送り槽及び送液配管内滞留溶液量と真空度の変化