

JAERI-Tech

96-058



臨界安全形状ミキサセトラの設計、製作
及び機能試験

1997年1月

梅田 幹・杉川 進・重面隆雄・三好慶典・宮内正勝・井澤直樹

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡
東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター
(〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内) で複写による実費頒布をおこなって
おります。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research
Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy
Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

臨界安全形状ミキサセトラの設計、製作及び機能試験

日本原子力研究所東海研究所 NUCEF 試験室

梅田 幹・杉川 進・重面 隆雄
三好 慶典・宮内 正勝・井澤 直樹

(1996年12月13日受理)

NUCEF 燃料調製設備には、臨界実験で使用した溶液燃料からウラン及びプルトニウムを分離精製するための精製設備がある。精製設備では、ミキサセトラにおいて臨界質量以上の濃縮ウラン及びプルトニウムを取扱う。また、NUCEFでの臨界実験条件に合わせた溶液燃料を調製するために精製設備の運転モードも多様なものとなり、ミキサセトラは単一故障、誤操作を考慮して全濃度での臨界安全形状としている。

本報では、臨界安全形状ミキサセトラの設計、製作及び製作後に行われた機能試験についてまとめた。ミキサセトラの設計では、中性子吸収材（カドミウム）及び中性子減速材（ポリエチレン）を使用し、1段の寸法を制限することによりプロセス条件を満たしつつ臨界安全形状とすることことができた。製作後に行われた機能試験では、製作したミキサセトラは安定に運転制御できることが確認され、所定の性能を有することが確認された。

Design, Construction and Tests of Geometrically Safe Mixer Settler

Miki UMEDA, Susumu SUGIKAWA, Takao JYUMEN,
Yoshinori MIYOSHI, Masakatsu MIYAUCHI and Naoki IZAWA

Department of NUCEF Project
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 13, 1996)

The fuel treatment system in NUCEF(Nucler Fuel Cycle Safety Engineering Research Facility) has purification process for separating and purifying of uranium and plutonium nitrate solution used in criticality experiments. In the purification process, uranium and plutonium over the critical mass are handled in mixer settlers, and there are flexible and complex operation modes to adjust fuel solutions in wide concentration range. Considering the prevention of critical accident caused by maloperation and malfunction, we designed and installed geometrically safe mixer settlers for criticality safety.

Design, construction and function tests of geometrically safe mixer settler are described in this report. The design of geometrically safe mixer settler was accomplished by insertion of neutron absorber (Cadmium) and neutron moderator (polyethylene) and by limitation of stage size. In function tests after construction, it is shown that it is possible to operate and to control these mixer settlers stably and that these mixer settlers satisfy the expected performance.

Keywords: Mixer Settler, Purification, Uranium, Plutonium, Nitrate Solution, Criticality Safety, Geometrically Safe, Neutron Absorber, Neutron Moderator

目 次

1. はじめに	1
2. NUCEF 燃料調製設備におけるミキサセトラの設計	2
2.1 機器設計	2
2.2 臨界安全設計	4
3. 性能確認試験	6
3.1 概要	6
3.2 実機ミキサセトラと試験条件	6
3.3 結果とまとめ	7
4. おわりに	9
謝 辞	9
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Design of Mixer Settler in the Fuel Treatment System of NUCEF	2
2.1 Equipment Design	2
2.2 Criticality Safety Design	4
3. Function Test	6
3.1 Summary	6
3.2 Mixer Settler and Conditions of Test	6
3.3 Results and Conclusion	7
4. General Conclusion	9
Acknowledgment	9
References	10

List of Tables

Table2.1 Stage Residence Time of Mixer Settler	11
Table2.2 Model for Criticality Safety Analysis	11
Table2.3 Calculation Conditions of Criticality Safety Analysis with KENO- N	11
Table2.4 Results of Criticality Safety Analysis for Calculation System(1)	12
Table2.5 Results of Criticality Safety Analysis for Calculation System(2)	12
Table2.6 Results of Criticality Safety Analysis for Calculation System(3)	13
Table2.7 Results of Criticality Safety Analysis for Calculation System(4)	13
Table3.1 Behavior of Interface Height(Extractor)	14
Table3.2 Behavior of Interface Height(U Stripper)	14
Table3.3 Concentration Profile in Extractor	15
Table3.4 Concentration Profile in U Stripper	15

List of Figures

Fig.1.1 Schematic Diagram of Separation Process in NUCEF	16
Fig.2.1 Flowsheet for Pu Purification	16
Fig.2.2 Flowsheet for U Purification	17
Fig.2.3 Vacuum Lift Type of Weir	17
Fig.2.4 Difference Pressure Control System	18
Fig.2.5 Criticality Calculation System(1) -System without Neutron Absorber and Neutron Moderator-	19
Fig.2.6 Criticality Calculation System(2) -System With Neutron Absorber to Bottom-	19
Fig.2.7 Criticality Calculation System(3) -System With Neutron Absorber between Each Stage in Addition to System(2)-	20
Fig.2.8 Criticality Calculation System(4) -System with Neutron Moderator to Each Four Stages in Addition to System(3)-	20
Fig.2.9 Results of Criticality Safety Analysis or Calculation System(1) ..	21
Fig.2.10 Results of Criticality Safety Analysis for Calculation System(2) ..	21
Fig.2.11 Results of Criticality Safety Analysis for Calculation System(3) ..	22
Fig.2.12 Results of Criticality Safety Analysis for Calculation System(4) ..	22
Fig.3.1 Structure of Mixer Settler	23 ~ 24
Fig.3.2 Photograph of Inside Mixer Settler	25
Fig.3.3 Conditions of Function Test	26
Fig.3.4 Results of Difference Pressure Control (Extractor)	27
Fig.3.5 Results of Difference Pressure Control (U Stripper)	27
Fig.3.6 Concentration Profile in Extractor	28
Fig.3.7 Concentration Profile in U Stripper	28

1. はじめに

NUCEF 燃料調製設備には、臨界実験で使用した溶液燃料からウラン及びプルトニウムの分離精製、核分裂生成物 (Fission Products) 及び中性子毒物の分離除去のための精製設備がある。臨界実験で使用した溶液燃料からのウラン、プルトニウムの分離及びウランとプルトニウムの分離精製にはミキサセトラを用いた溶媒抽出法が採用されている。精製設備には主要な設備として 3 台のミキサセトラがある。ウラン及びプルトニウムの抽出用、ウランとプルトニウムの分離用 (プルトニウム逆抽出) 及びウラン逆抽出用である。概略系統図を Fig.1.1 に示す。

3 台のミキサセトラの臨界管理は、单一故障、誤操作を考慮した全濃度での形状寸法管理としている。ミキサセトラの設計ではプロセス条件を考慮した機器設計と臨界管理を考慮した臨界安全設計を同時に関連付けながら進める必要があった。機器設計においては、処理量等のプロセス上の要求を満足しつつ臨界安全上の要求により低い液位で界面を安定して制御する必要があったので、電磁式圧力調節弁と分散型デジタル制御システム (Distributed Digital Control System 以下 DDCS と略す) による PI 制御を組み合わせた差圧制御による減圧セキ方式を開発した。臨界管理には全濃度形状寸法管理を適用し、臨界解析は JACS コードシステムのモンテカルロコード KENO-IV 及び MGCL-137 群ライブラリを用いた臨界解析計算によって行った。これら機器設計及び臨界設計により本設備に設置するミキサセトラは、プロセス条件を満たしつつ全濃度臨界安全形状とすることができた。

製作したミキサセトラは、ウラン溶液を用いて性能確認試験を行い、所定の性能を有することを確認した。

本報は、これら NUCCEF 燃料調製設備の精製設備に設置されたミキサセトラの設計及び性能確認試験の結果についてまとめたものである。

2. NUCEF 燃料調製設備における ミキサセトラの設計

2.1 機器設計

2.1.1 1段の寸法

ミキサセトラを設計するにあたり基本となる1段の寸法は、(1)プロセス上要求される処理量及びミキサ部、セトラ部での必要滞留時間の確保、及び(2)製作可能な寸法であることの2点を考慮して決定した。精製設備の処理量は、プルトニウム及びウランに対してそれぞれ1 kgPu/day, 10 kgU/day(1日8時間運転)である。混合及び相分離に必要なミキサ部及びセトラ部での滞留時間を1分(ミキサ部), 5分(セトラ部)とし、運転上の変動を考慮してある程度の裕度をもたせることとした。本ミキサセトラはステンレススチール(SUS304L)製であり溶接はTIG溶接であるため、溶接による歪みを防ぐために、製作可能な最小寸法としては接液部で100 mmを確保することとした。

1日の処理量をもとにしたプルトニウム及びウラン精製運転時のフローシートをFig.2.1及びFig.2.2に示す。このフローシート、ミキサ部及びセトラ部での滞留時間及び製作可能な寸法を考慮して、1段あたりの製作寸法は巾100×長さ500×高さ132 mm(通常の液位は80 mm)とした。ここで、各ミキサセトラにおけるミキサ部及びセトラ部での滞留時間はTable 2.1となり、必要な時間に対して1.1~2.5倍と十分な裕度をもっていることが確認できる。

2.1.2 新しい界面制御方式の開発

従来用いられてきたミキサセトラの界面制御方式として重力方式及び減圧セキ方式が挙げられる。重力方式による界面制御方法では、水相に設置した水門を上下させることにより界面位調節が行われる。減圧セキ方式では、2重管構造のセキを用いて、減圧度を調節することによりセキ上流側の界面位を調整する。この方式は駆動部が無いことから保守性に優れており、本設備においては減圧セキ方式(減圧度調整はベント部と減圧部の差圧制御による)を採用した。しかし通常界面位が40 mmと低いため、従来のバルブの組合せによる差圧制御では差圧制御精度が不十分であり、今回DDCSを用いて電磁式圧力調節弁をPI制御する差圧制御システムを開発、採用した。

減圧セキ方式の概略図をFig.2.3に示す。差圧制御による減圧セキ方式とは、セトラ部のベント系と減圧部分に差圧を生じさせることにより水相をセキに通過させ次の段のミキサ部へ水相を移送すると同時に、差圧を制御することにより界面位を制御するという方法である(Fig.2.3参照)。差圧制御精度の界面位に対する影響は以下のように考えられる。

まず、圧力平衡より以下の式が成立する。

$$\Delta P = h_w \rho_a - h_z \rho_a \quad (2.1)$$

$$h_z \rho_a = h_o \rho_o + h_a \rho_a \quad (2.2)$$

ΔP : 差圧 (mmAq)

h_o : セトラ部での油相の高さ (mm)

h_a : セトラ部での水相の高さ ($h_o + h_a = 80$ mm)

ρ_o : セトラ部での油相の密度 (0.835 g/cm³)

ρ_a : セトラ部での水相の密度 (1.03 g/cm³)

h_w : セキの高さ (94.0 mm)

h_z : $\Delta P = 0$ の時の減圧部での水相の高さ

式 (2.1), (2.2) 及び $h_a + h_o = 80$ mm より

$$\Delta P = (h_w \rho_a - 80 \rho_o) - (\rho_a - \rho_o) h_a$$

となり、各値を代入して

$$\Delta P = 30.02 - 0.195 h_a \quad (2.3)$$

となる。従って差圧及び水相液位(界面位)の変化量をそれぞれ、d(h_a)及びd(ΔP)すると、

$$d(h_a) = -5.13 d(\Delta P) \quad (2.4)$$

となり、差圧が 1 mmAq 変化すると界面位は 5.13 mm 変化することがわかる。液位は通常 80 mm であり界面位は通常 40 mm であるので、差圧制御精度としては設定値に対して ±1.0 mmAq 程度以上が求められる。

今回開発したシステムの概略図を Fig.2.4 に示す。ベント系は -600 mmAq に保たれており、真空の供給は -5000 mmAq である。真空設備からの外乱の防止及びベント系との負圧度の差を少なくするために、バッファタンクが備えられている。このバッファタンクでは負圧は -1300 mmAq に制御され、この -1300 mmAq とベント系の -600 mmAq の間に電磁式圧力調節弁を設置し、弁開度を微調整することにより差圧を -20 ~ -30 mmAq 程度の設定値に調整する。本システムの特徴としては、この差圧制御を弁の組合せではなく DDCS を用いた PI 制御で行ったところにある。本システムは、DDCS からの出力に対して精度良く安定した作動が可能な電磁式圧力調節弁が製造されるようになったために可能となった。本システムにより遠隔操作にて簡単に界面位を変化させることができるようになった。また、今回は制御系の簡単化のために 1 つの電磁式圧力調節弁により全段共通で差圧制御を行うこととした。

2.2 臨界安全設計

2.2.1 臨界解析

NUCEF 燃料調製設備の他の主要な機器同様に、精製設備ミキサセトラにおいても臨界安全設計の条件は以下のとおりとした。

- (1) 溶液燃料の全濃度範囲について臨界管理とする。
- (2) プルトニウムの同位体組成は Pu-239 が 100 %とする。
- (3) 溶液燃料のフリーな硝酸濃度は 0 mol/l とする。

設計条件の組合せによってはプルトニウムの析出等により実在しない濃度範囲が含まれるが、臨界解析上安全側となるような条件とした。

臨界安全性の評価には、臨界解析計算コード⁽¹⁾ (JACS コードシステムのモンテカルロコード KENO-IV 及び MGCL-137 群ライブラリ) を使用した。Table 2.2 に計算モデル、Table 2.3 に KENO-IV の計算条件を示す。計算モデルにおける各条件は、実際の運用条件よりも安全側となるよう考慮し、想定し得る最も厳しい条件とした。

解析結果の判定基準としては、解析された計算体系の中性子実効増倍率 k_{eff} が以下の範囲の時、臨界安全性は確保されているものとした。⁽²⁾

$$k_{eff} = k_{av.} + 3 \sigma < 0.95$$

ここで、 $k_{av.}$ は解析計算コード KENO-IV により求めた平均中性子実効増倍率、 σ はそのときの標準偏差である。

2.2.2 計算体系及び解析結果

ミキサセトラの構造は、運転管理上、また製作上単純なものが好ましい。そこで、臨界解析の対象として

- (1) 燃料体系のみ
- (2) 底部に中性子吸收材（カドミウム）を挿入した体系
- (3) 底部及び各段間に中性子吸收材（カドミウム）を挿入した体系
- (4) 底部及び各段間に中性子吸收材（カドミウム）及び 4 段毎に中性子減速材（ポリエチレン）を挿入した体系

の 4 つの計算体系について検討を行った。これら 4 つの計算体系の概略図を Fig.2.5～Fig.2.8 に示す。

各体系の概要を以下にまとめる。

- (1) 燃料のみの基本となる体系
- (2) 燃料体系から底部方向へ漏れ出る中性子と再び体系内に戻る中性子の一部を吸収させる目的で、中性子吸收材であるカドミウムを挿入した。カドミウム板の厚さが 0.5 mm なのは、カドミウムによる中性子の吸収はそのほとんどが表面の微

小厚内で行われるためであり、0.5 mm の厚さは十分な厚さである。

(3) この体系は(2)の体系に加えて、燃料体系内の中性子の一部も吸収することにより中性子実効増倍率 k_{eff} を低く抑えることを目的としたものである。

(4) この体系は(3)の体系の4段毎に中性子減速材であるポリエチレンを挿入した体系である。これは、中性子吸収材（カドミウム）の中性子吸収が主に熱中性子領域で行われる⁽³⁾ために、中性子減速材であるポリエチレンにより中性子を減速させカドミウムの中性子吸収効率を高めるのが目的である。(2)及び(3)の体系において、中性子吸収材の厚さを厚くすることにより中性子実効増倍率 k_{eff} を低く抑えることはあまり効果的でない。また、4段毎に中性子減速材（ポリエチレン）を挿入している理由としては、燃料調製設備で製作するミキサセトラの段数が16段及び12段であるためである。

臨界計算結果を Table 2.4～Table 2.7, Fig.2.9～Fig.2.12 に示す。これらより以下のことがわかった。

プルトニウム燃料を取扱うミキサセトラに関しては、Fig.2.10, Fig.2.11 より燃料体系内への中性子吸収材（カドミウム）の挿入は中性子実効増倍率 k_{eff} を低く抑えるために有効であるが、底部及び各段間に中性子吸収材（カドミウム）を挿入した体系においても液位異常高を考慮した液位 92 mm 時に中性子実効増倍率 k_{eff} が判定基準 0.95 を上回っている。底部及び各段間に中性子吸収材（カドミウム）及び4段毎に中性子減速材（ポリエチレン）を挿入した体系の計算結果は、液位異常高を考慮した液位 92 mm 時においても中性子実効増倍率 k_{eff} は最大約 0.92 となり、判定基準である 0.95 未満、判定基準に対して十分な裕度があることを確認した。これより、臨界設計上プルトニウム燃料を取扱うミキサセトラの体系には底部及び各段間に中性子吸収材であるカドミウムを挿入し、4段毎に中性子減速材であるポリエチレンを挿入した体系を採用することとした。また、通常液位は 80 mm とし、通常用オーバーフロー管のつまりを考慮して 92 mm に非常用オーバーフロー管を付けることとした。

3. 性能確認試験

3.1 概要

前述の NUCEF 燃料調製設備ミキサセトラの設計での検討結果にしたがって、全濃度臨界安全形状のミキサセトラを製作した。

製作したミキサセトラの性能は、精製工程の工程管理を行う上で重要な因子となる。このため、本格的な運転の開始前に製作したミキサセトラの性能評価及び特性把握を行う必要がある。本試験では、共抽出器、U逆抽出器を用いてウランの抽出、逆抽出操作を行い、製作したミキサセトラの性能の評価、確認を行った。給液流量はプロセス設計時において検討した処理量が最大となる条件とし、各ミキサセトラの界面制御性、段効率及び水相中の有機相エントレインメントを測定した。界面制御性は、試験期間中に DDCS に表示される界面の様子によりその安定性を確認した。段効率は、各ミキサセトラ内がほぼ定常に到達した時点で任意の段でサンプリング分析を行い、分析結果から得られた濃度プロファイルに抽出器計算コード⁽⁴⁾を段効率をパラメータにしてフィッティングさせることにより求めた。水相中の有機相エントレインメントは、ミキサセトラから流出する水相を洗浄する希釀剤（n-ドデカン）中の TBP（リン酸トリブチル）量を分析することにより求めた。

3.2 実機ミキサセトラと試験条件

製作したミキサセトラの構造を Fig.3.1 及び Fig.3.2 に示す。本体はステンレススチール (SUS304L) 製で、前述のミキサセトラの設計で示したとおり、底部及び各段間に厚さ 0.5 mm のカドミウムが中性子吸收材として挿入してある。また、共抽出器及び Pu 逆抽出器にはさらに 4 段毎に 50 mm 厚のポリエチレンが中性子減速材として挿入してある。計装としては、各段に界面計（電極式レベル検出器）、温度計（共抽出器：16 段、Pu 逆抽出器：5, 13 段、U 逆抽出器：1, 12 段）及び密度計（共抽出器：16 段）等を備えており、これらのデータは DDCS のトレンドロギング機能を用いて記録する。ここで、界面計に用いた電極式レベル検出器は、電極式であるため測定は接点である。界面計の測定接点の設定値は、通常の界面位（ミキサセトラ底部から）40 mm に対して、界面位異常高設定値 (HH) は 64 mm、界面位高設定値 (H) は 50 mm、界面位低設定値 (L) は 30 mm 及び界面位異常低設定値 (LL) は 15 mm である。これらの設定値をもつ接点に界面が触れると、DDCS の表示色が変化し界面位を知ることができる。

性能確認試験の試験条件を Fig.3.3 に示す。試験には共抽出器及び U 逆抽出器の 2 台のミキサセトラを使用した。共抽出器への調整液の供給流量はプロセス設計時のほぼ最大処理量となるように設定した。その他のスクラブ液、溶媒及びウランストリップ液等は、調

整液供給流量をもとに標準的なウランの抽出、逆抽出のフローとなるように設定した。温度について、共抽出器は室温、U逆抽出器は1段目の液温で約30°C以上(約35°C)に制御した。U逆抽出器の加熱は、供給するウラントリップ液をラインヒータで加熱することにより行った。試験中は、各ミキサセトラから流出する溶液を任意の時間間隔毎にサンプリングし、その分析結果が1回前の分析結果と比較してほぼ変化の無くなった時点をミキサセトラ内がほぼ定常状態に到達したものとした。ミキサセトラ内が定常状態に到達した後に任意の段についてミキサ部及びセトラ部のサンプリングを行い、各ミキサセトラの濃度プロフィールを得た。サンプルの分析は、ウラン濃度及び酸濃度については酸-ウラン逐次アルカリ滴定法及びTBPについては赤外分光光度法を用いて行った。

3.3 結果とまとめ

共抽出器及びU逆抽出器ともに、ミキサセトラ内がほぼ定常状態に到達するのに17時間を要した。17時間の試験期間中の各ミキサセトラの界面制御用差圧の制御結果をFig.3.4及びFig.3.5に示す。どちらの場合も差圧設定値に対して非常に精度良く制御できていることがわかる。設定値に対する誤差としては、最大で±0.3 mmAqであった。また、試験期間中の界面の様子をTable 3.1及びTable 3.2に示す。前述の通り各段の界面位は電極式レベル検出器で監視を行った。この表でH又はLと表示された段は、界面位が通常(40 mm)よりもそれぞれ高い(50 mm)又は低い(30 mm)状態になっている段である。U逆抽出器の界面は、Table 3.2に示されているとおり試験期間中安定して制御することができた。しかし、共抽出器の界面はTable 3.1より試験時間とともに界面位の高い段及び低い段が広がっている。この界面位の高い段と低い段は調整液の供給位置を境にして分かれているという特徴を持っているが、現在のところこの原因は明らかとなっていない。試験終了後、攪拌器を停止した時点でかなりの段のH及びLが復帰していることから、(1)界面は電極式レベル検出器の設定値の極めて近くで制御されており、このため攪拌器の停止と同時にH及びLが復帰した。または(2)セトラ部内が水相連続又は有機相連続なエマルジョン状態になっていたために、表示上はH及びLが点灯していたことが考えられる。ここで電極式レベル検出器の構造上、水相連続なエマルジョンの場合はH表示、有機相連続なエマルジョンの場合はL表示となると考えられる。これら両者の場合とも、界面位はH及びL設定値付近に制御されていたものと考えられるが、ウラン濃度が低い場合の運転時には、H及びLの表示の点灯しない界面が安定して制御されたケースがあった。界面位についてH及びL表示がある時、H及びL設定値付近に界面があるのであれば特に問題はないが、HH及びLL設定値付近の時は差圧設定値を変更する等の処置が必要となる。この点については、工程管理上も今後原因を明らかにしておく必要がある。このため今後の課題としては、(1)アドミッタンス方式の界面計を導入することにより界面の位置を精度良く測定すること、及び(2)界面位をH及びL設定値の範囲内で運転するために処理流量の見直しをすることなどが挙げられる。

次に、定常に達した各ミキサセトラの濃度プロフィールを Table 3.3, Table 3.4 及び Fig.3.6, Fig.3.7 に示す。これらの分析結果より得た濃度プロフィールに、段効率をパラメータとして抽出計算コードにより計算した濃度プロフィールをフィッティングさせ、各ミキサセトラの本試験条件での段効率を求めたところ、共抽出器で約 9.2 %, U 逆抽出器で約 10.0 % となった。ここで、抽出計算コードでパラメータとした段効率は本来各段毎にある値をとるものであるが、本計算ではミキサセトラ全段共通で一定の値とした。計算により得られた段効率の値は他の文献⁽⁵⁾と比較して、満足できるものであった。このことより、ミキサ部での滞留時間及び攪はん状態等がウランの抽出、逆抽出に十分であることがわかった。

最後に水相中への有機相エントレインメントの値は、約 0.1 wt% と他の文献⁽⁶⁾と比較して一般的な値となった。また、希釈剤洗浄器通過後の水相中への有機相エントレインメントは約 0.003 wt% とかなり低い値となった。このことより、セトラ部での滞留時間等が相分離に十分であり、セトラ部での相分離性能が十分満足できるものであることが示された。

以上の結果より、今回製作したミキサセトラは設計性能を十分有することが確認できた。また、今後の NUCEF における臨界実験用燃料調製運転に十分供し得ることが確認できた。

4. おわりに

NUCEF 燃料調製設備で使用する臨界安全形状ミキサセトラの設計、製作及び性能確認試験を行った。製作可能な寸法、プロセス上必要なサイズ及び寸法管理による全濃度での臨界安全性の確保等を考慮して設計を行い、ミキサセトラのサイズ及び体系を選定した。またこのとき、低い液位を安定して制御するために電磁式圧力調節弁と DDCS (PI 制御)による減圧セキ方式による界面制御方法を開発した。性能確認試験ではウラン溶液を用いて、共抽出器、U逆抽出器の性能を評価した。この結果、今回設計、製作したミキサセトラは今後の臨界実験用燃料調製運転に十分供し得ることが確認できた。

謝　　辞

性能確認試験を行う上で、NUCEF 試験室臨界技術課燃料技術グループの方々、技術試験課分析グループの方々及び阿部正幸氏をはじめとする東京ニュークリア・サービス株式会社の方々に御協力頂きました。臨界計算については、計算の進め方について臨界技術課臨界技術グループ曾野浩樹氏に助言及び支援頂きました。ここに深く感謝の意を表します。また、本書を作成するにあたり適切なコメントを頂いた NUCEF 試験室技術試験課課長岡崎修二氏、本設備の設計等において指導頂いた NUCEF 試験室次長竹下功氏、原稿を査読して頂いたプロセス安全工学研究室副主任研究員内山軍蔵氏に深く感謝致します。

4. おわりに

NUCEF 燃料調製設備で使用する臨界安全形状ミキサセトラの設計、製作及び性能確認試験を行った。製作可能な寸法、プロセス上必要なサイズ及び寸法管理による全濃度での臨界安全性の確保等を考慮して設計を行い、ミキサセトラのサイズ及び体系を選定した。またこのとき、低い液位を安定して制御するために電磁式圧力調節弁と DDCS (PI 制御)による減圧セキ方式による界面制御方法を開発した。性能確認試験ではウラン溶液を用いて、共抽出器、U逆抽出器の性能を評価した。この結果、今回設計、製作したミキサセトラは今後の臨界実験用燃料調製運転に十分供し得ることが確認できた。

謝　　辞

性能確認試験を行う上で、NUCEF 試験室臨界技術課燃料技術グループの方々、技術試験課分析グループの方々及び阿部正幸氏をはじめとする東京ニュークリア・サービス株式会社の方々に御協力頂きました。臨界計算については、計算の進め方について臨界技術課臨界技術グループ曾野浩樹氏に助言及び支援頂きました。ここに深く感謝の意を表します。また、本書を作成するにあたり適切なコメントを頂いた NUCEF 試験室技術試験課課長岡崎修二氏、本設備の設計等において指導頂いた NUCEF 試験室次長竹下功氏、原稿を査読して頂いたプロセス安全工学研究室副主任研究員内山軍蔵氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) J. Katakura, Y. Naito and Y. Komuro, "Development of the Computer Code System JACS for Criticality Safety", Trans. Am. Nucl. Soc. 41 (1982) 329.
- (2) 奥野 浩, 内藤 敏孝, 「臨界安全解析コードシステム JACS の計算誤差評価」, JAERI-M 057 (1987).
- (3) BNL-325, Second Edition (1958).
- (4) 権田 浩三 他, 「PUREX プロセス計算コード Revised MIXSET」, PNCT 841-79-26 (1979).
- (5) J. K. Davidson, A. C. Schafer, Jr., and W. O. Haas, Jr., "The Application of Mixer-Settlers to the PUREX Process" (1957).
- (6) G. A. Rowden, J. B. Scuffham, G. C. I. Warwick, "The Effect of Changes in Operating Organic/Aqueous Ratio on the Operation of a Mixer Settler".

Table 2.1 各ミキサセトラ1段あたりの滞留時間

		共抽出器	Pu逆抽出器	U逆抽出器
Pu 運 転	ミキサ部	2.46分/段	2.30分/段	1.98分/段
	セトラ部	水相 油相	8.81 11.2	9.90 8.57
U 運 転	ミキサ部	1.84	—	1.44
	セトラ部	水相 油相	8.89 6.27	— —

*セトラ部の水相、油相の液深は等しいものとする。

Table 2.2 臨界解析計算モデル

燃料形態	Pu(NO ₃) ₄ －水
同位体組成	Pu-239 : 100 %
反射条件	完全水反射 (計算上は 30 cm の水)
判定基準	$k_{\text{eff}} < 0.95$

Table 2.3 KENO-IV の計算条件

1世代当たりの中性子数	300
計算世代数	103
スキップ世代数	3
初期中性子発生分布	一様分布 (平坦)
中性子平均重み	0.5 (全領域)

Table 2.4 臨界計算結果—臨界計算体系（1）—

液深	Pu 燃料濃度 (gPu/l)	kav.	σ	k_{eff} $= k_{\text{av.}} + 3 \sigma$
80mm	100	1.00529	0.00504	1.02040
	200	1.05661	0.00524	1.07233
	300	1.05019	0.00476	1.06448
	400	1.04640	0.00495	1.06126
	500	1.04324	0.00485	1.05780
	600	1.05118	0.00495	1.06603
	700	1.02796	0.00467	1.04196
92mm	100	1.06304	0.00597	1.08095
	200	1.09916	0.00511	1.11449
	300	1.10919	0.00513	1.12458
	400	1.08526	0.00484	1.09978
	500	1.11076	0.00545	1.12711
	600	1.09382	0.00546	1.11020
	700	1.09128	0.00514	1.10670

[kav. : 臨界計算コードにより求めた平均中性子実効増倍率]
 σ : 標準偏差

Table 2.5 臨界計算結果—臨界計算体系（2）—

液深	Pu 燃料濃度 (gPu/l)	kav.	σ	k_{eff} $= k_{\text{av.}} + 3 \sigma$
80mm	100	0.88920	0.00531	0.90514
	200	0.92557	0.00523	0.94126
	300	0.92406	0.00579	0.94143
	400	0.93022	0.00483	0.94473
	500	0.93388	0.00542	0.95013
	600	0.92080	0.00559	0.93757
	700	0.92382	0.00470	0.93793
92mm	100	0.95261	0.00546	0.96899
	200	0.98892	0.00512	1.00428
	300	0.99011	0.00574	1.00733
	400	0.99044	0.00550	1.00694
	500	0.98826	0.00544	1.00458
	600	0.99276	0.00528	1.00860
	700	0.98624	0.00514	1.00166

[kav. : 臨界計算コードにより求めた平均中性子実効増倍率]
 σ : 標準偏差

Table 2.6 臨界計算結果－臨界計算体系（3）－

液深	Pu 燃料濃度 (gPu/ l)	kav.	σ	k_{eff} = kav. + 3 σ
80mm	100	0.80550	0.00481	0.81994
	200	0.86676	0.00600	0.88474
	300	0.89089	0.00499	0.90586
	400	0.90775	0.00526	0.92352
	500	0.89930	0.00529	0.91517
	600	0.91846	0.00498	0.93339
	700	0.89975	0.00484	0.91428
92mm	100	0.86371	0.00514	0.87912
	200	0.93557	0.00539	0.95173
	300	0.95129	0.00539	0.96747
	400	0.96190	0.00441	0.97512
	500	0.95928	0.00518	0.97482
	600	0.97130	0.00488	0.98594
	700	0.95318	0.00552	0.96974

[kav. : 臨界計算コードにより求めた平均中性子実効増倍率]
 σ : 標準偏差]

Table 2.7 臨界計算結果－臨界計算体系（4）－

液深	Pu 燃料濃度 (gPu/ l)	kav.	σ	k_{eff} = kav. + 3 σ
80mm	100	0.75184	0.00436	0.76493
	200	0.81575	0.00498	0.83068
	300	0.83587	0.00514	0.85128
	400	0.85133	0.00618	0.86987
	500	0.83981	0.00514	0.85524
	600	0.85829	0.00490	0.87299
	700	0.83739	0.00451	0.85091
92mm	100	0.80722	0.00502	0.82229
	200	0.86779	0.00524	0.88349
	300	0.89002	0.00556	0.90671
	400	0.89168	0.00532	0.90765
	500	0.89728	0.00556	0.91427
	600	0.90304	0.00537	0.91913
	700	0.90357	0.00530	0.91948

[kav. : 臨界計算コードにより求めた平均中性子実効増倍率]
 σ : 標準偏差]

Table 3.1 共抽出器の界面の挙動

時間(h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	停止後
段 数	1								H										
	2						H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
	3					H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
	4				H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
	5				H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
	6			H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
	7		H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
	8		H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
	9																		
	10																		
	11		L	L	L				L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	
	12		L	L	L	L			L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	
	13		L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	
	14		L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	
	15		L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	
	16		L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	

* 通常界面位 40 mm に対して、H設定は 50 mm, L設定は 30 mm である。

Table 3.2 U逆抽出器の界面の挙動

時間(h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	停止後
段 数	1																		
	2			H	H	H	H	H	H										
	3																		
	4																		
	5																		
	6																		
	7																		
	8															L	L	L	
	9																		
	10																		
	11																		
	12																		

* 通常界面位 40 mm に対して、H設定は 50 mm, L設定は 30 mm である。

Table 3.3 定常(17時間)後其抽出器内濃度プロファイル

段数		2	6	9	12	16
水相	U濃度(gU/l)	0.0047	0.041	—	—	6.4
油相	硝酸濃度(mol/l)	2.92	3.07	—	—	2.58
水相	U濃度(gU/l)	—	—	63.6	79.6	—
油相	硝酸濃度(mol/l)	—	—	0.32	0.09	—

Table 3.4 定常(17時間)後U逆抽出器内濃度プロファイル

段数		3	4	5	6	7	8	12
水相	U濃度(gU/l)	9.9	—	0.046	—	0.0143	0.0176	—
油相	硝酸濃度(mol/l)	<0.01	—	<0.01	—	<0.01	<0.01	—
水相	U濃度(gU/l)	—	0.0561	0.0319	0.0270	—	—	0.0011
油相	硝酸濃度(mol/l)	—	<0.01	<0.01	<0.01	—	—	<0.01

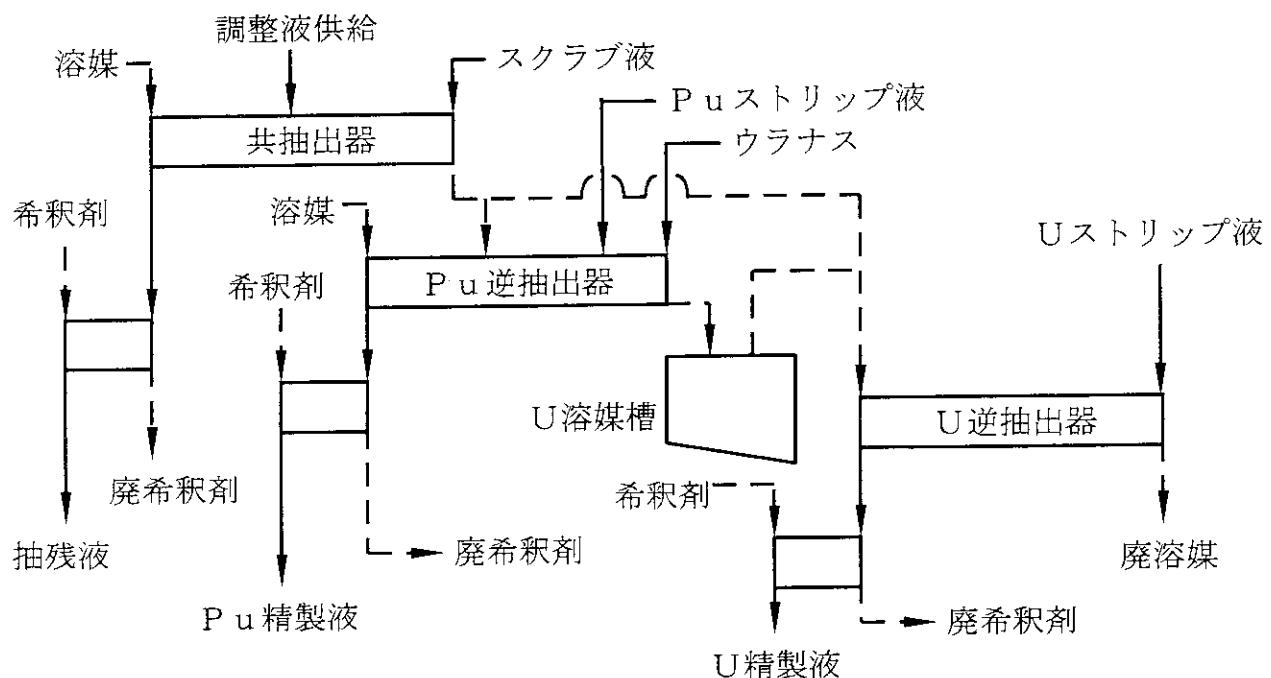


Fig.1.1 NUCEF 燃料調製設備内精製設備概略系統図

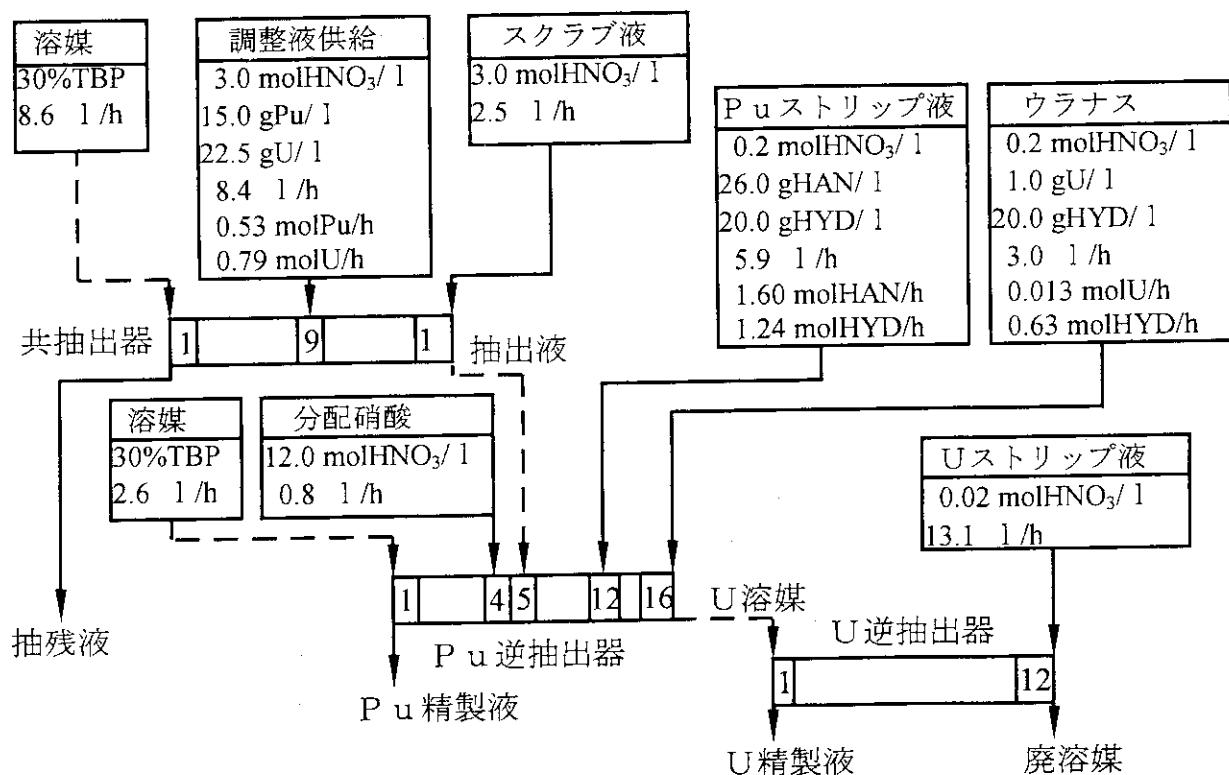


Fig.2.1 プルトニウム精製時のフローシート

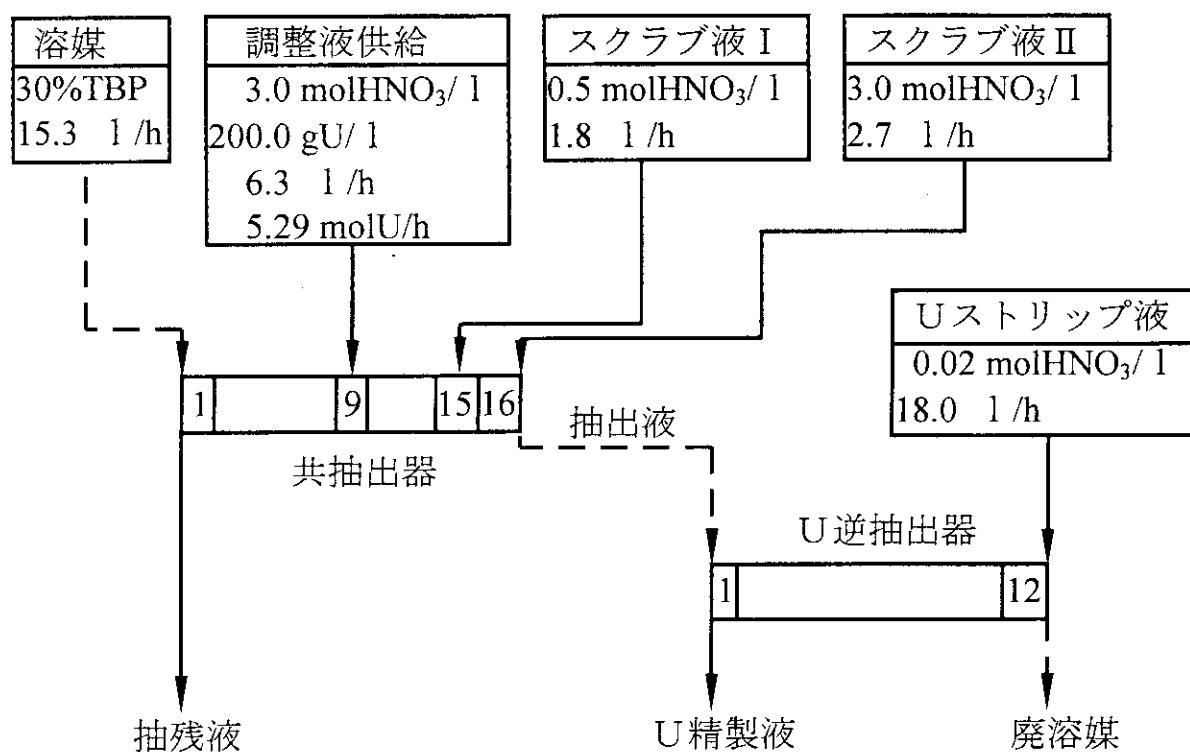


Fig.2.2 ウラン精製時のフローシート

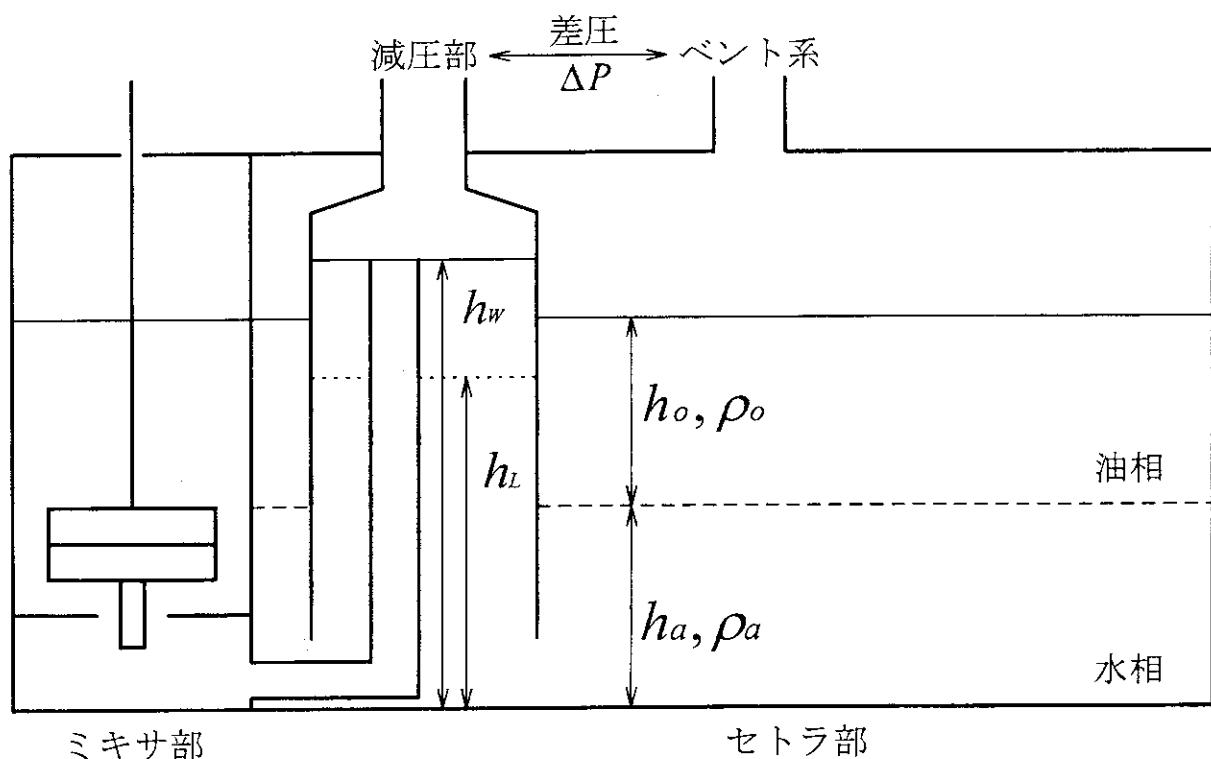


Fig.2.3 減圧セキ方式の概略図

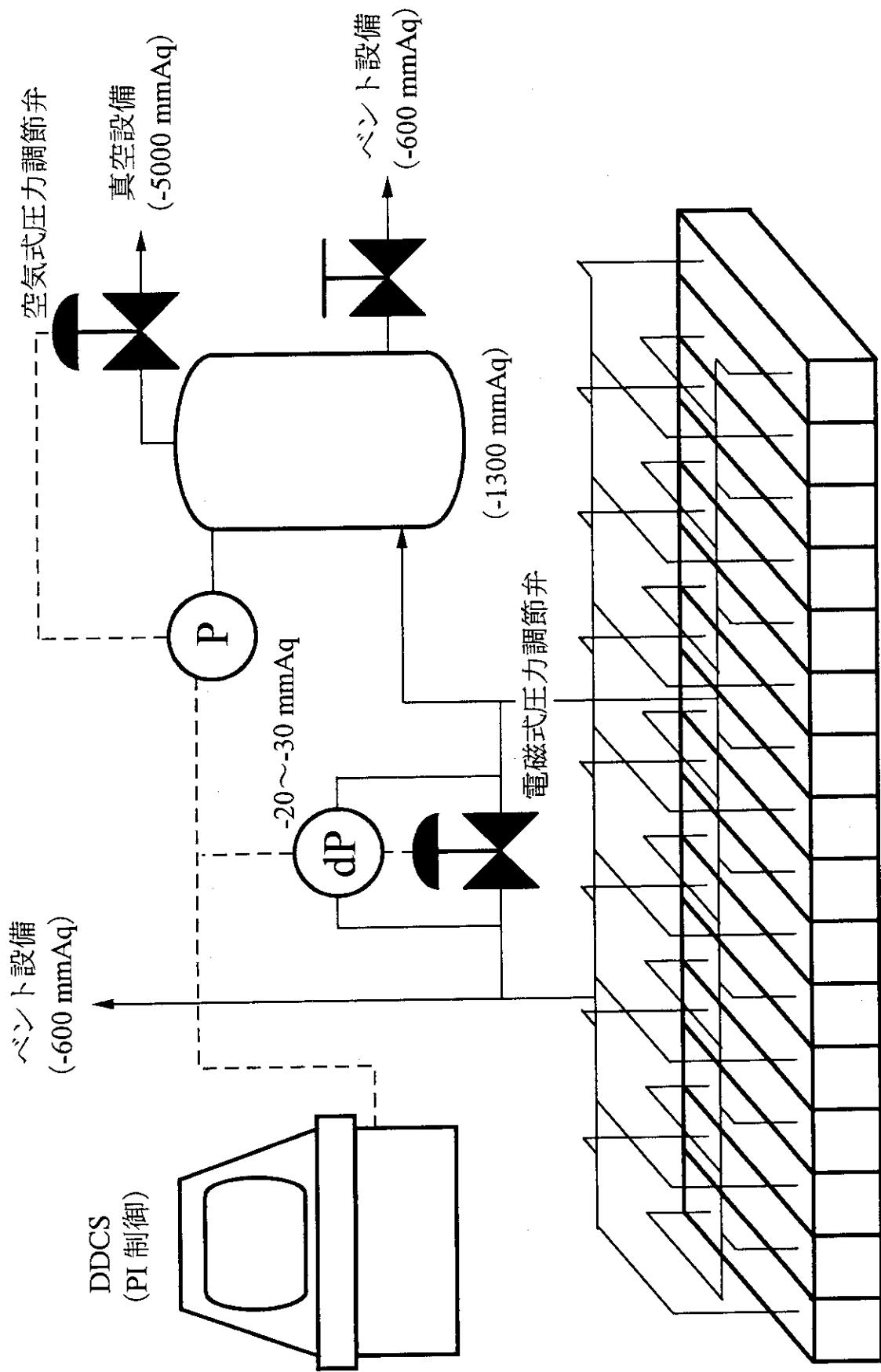


Fig.2.4 差圧制御システムの概略図

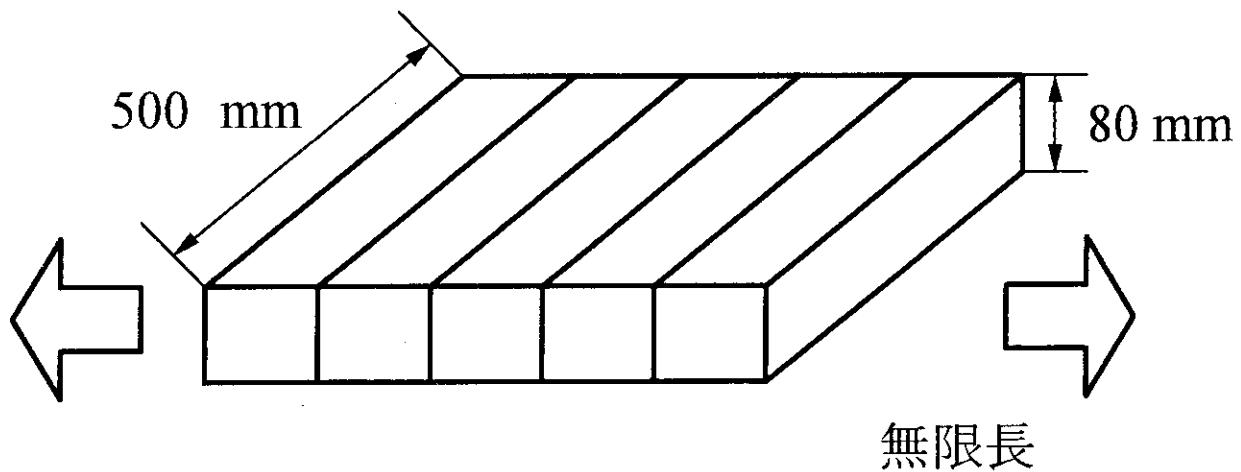


Fig.2.5 臨界計算体系（1）－燃料体系のみ－

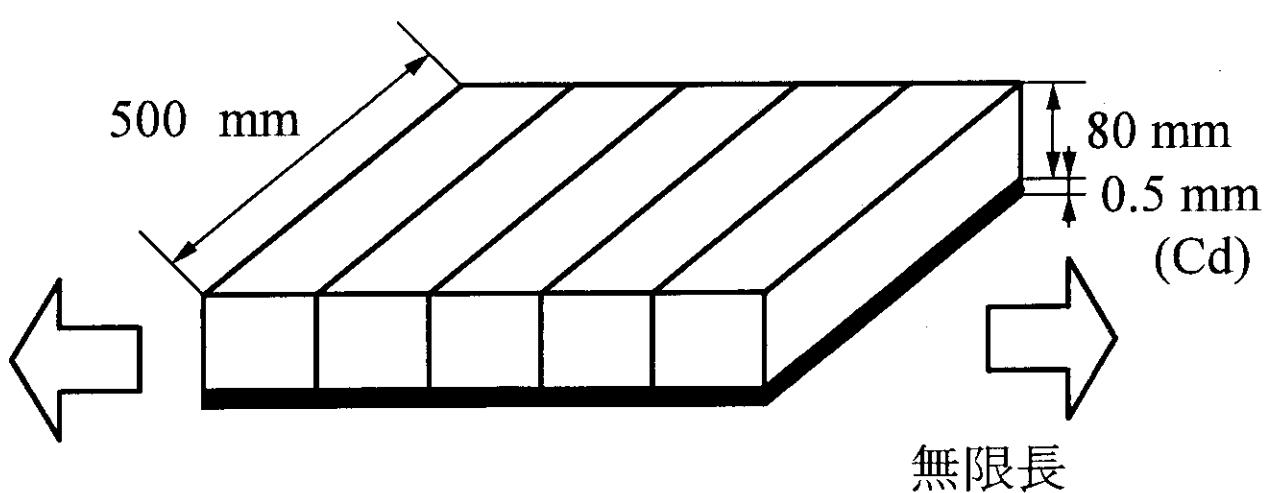


Fig.2.6 臨界計算体系（2）
－底部に中性子吸収材（カドミウム）
を挿入した体系－

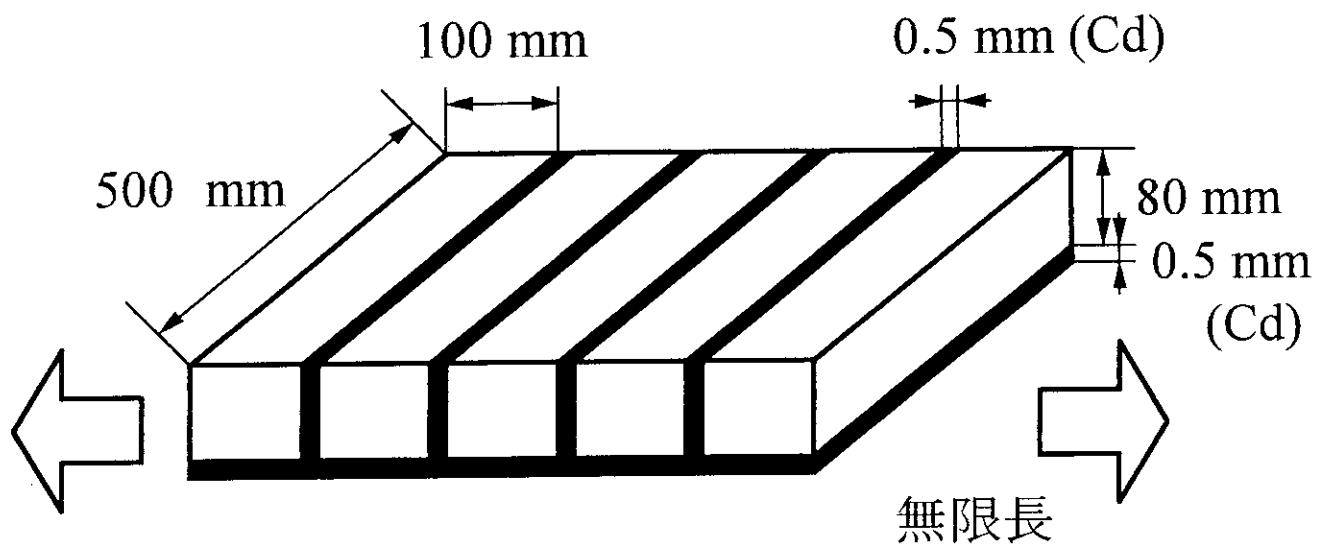


Fig.2.7 臨界計算体系（3）
—底部及び各段間に中性子吸収材（カドミウム）
を挿入した体系—

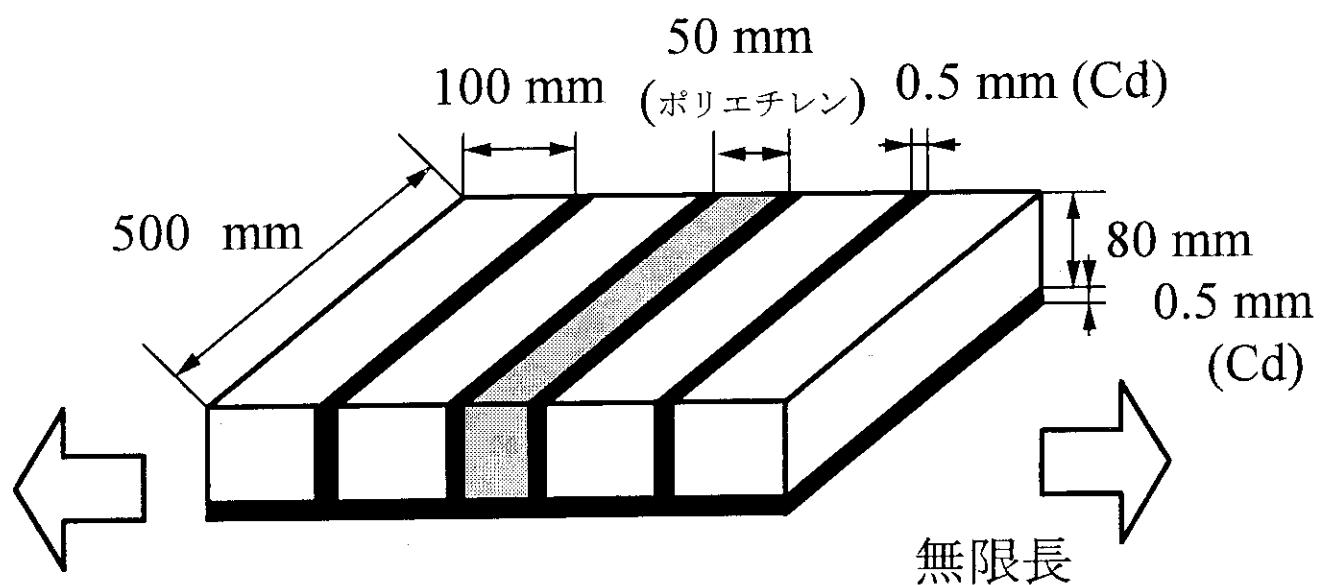


Fig.2.8 臨界計算体系（4）
—底部及び各段間に中性子吸収材（カドミウム）及
び4段毎に中性子減速材（ポリエチレン）を挿入し
た体系—

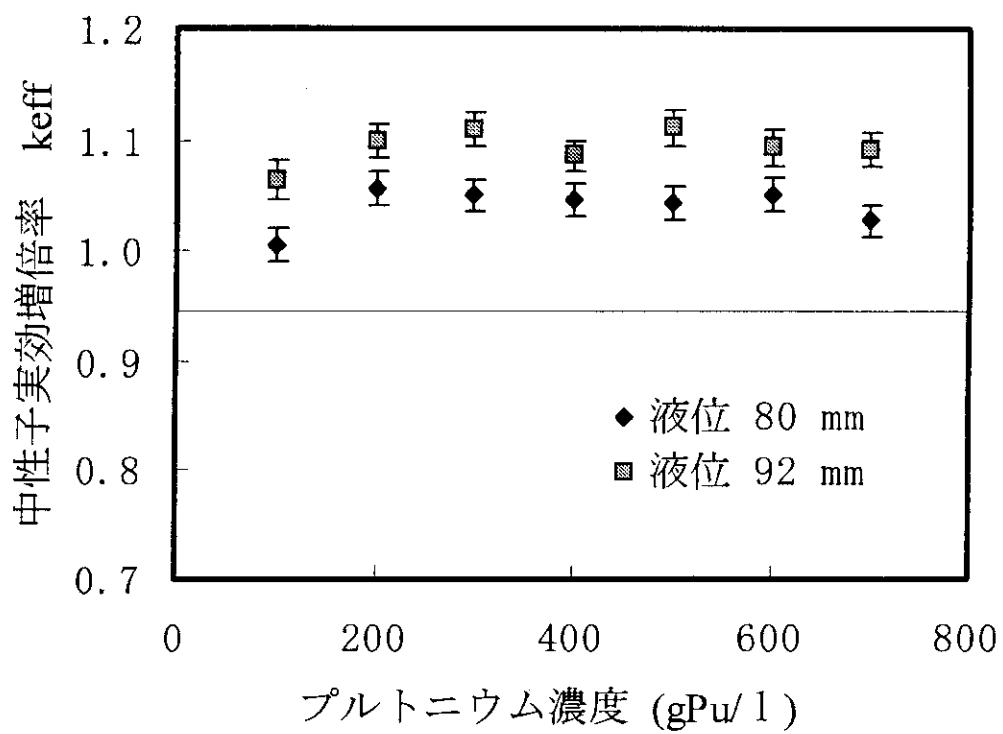


Fig.2.9 臨界計算結果－臨界計算体系（1）－

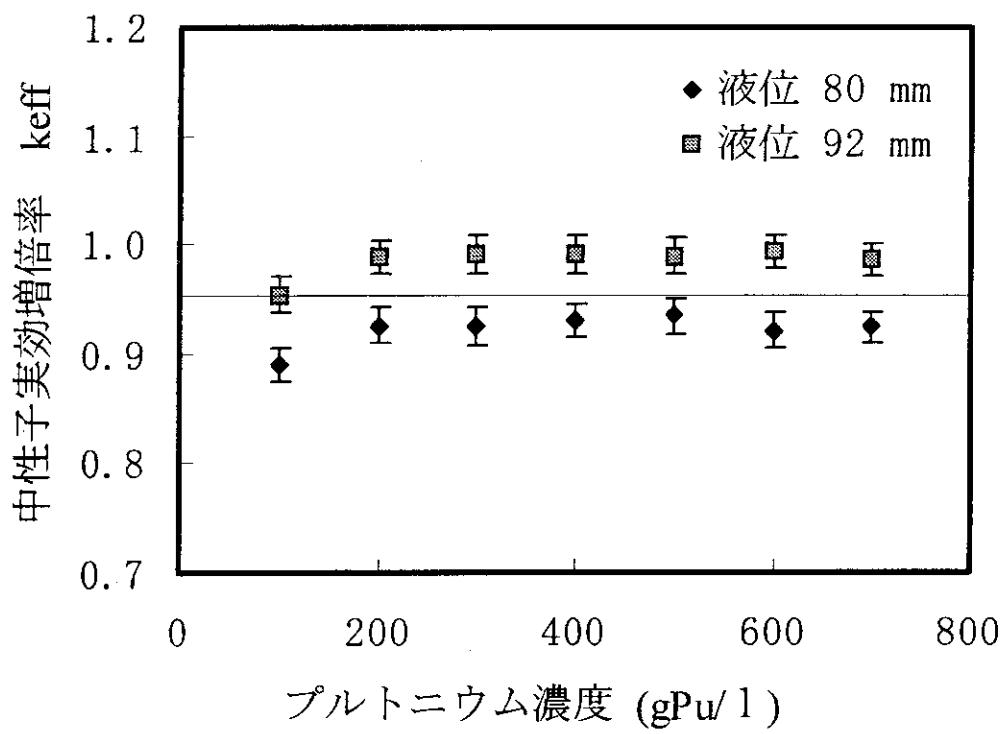


Fig.2.10 臨界計算結果－臨界計算体系（2）－

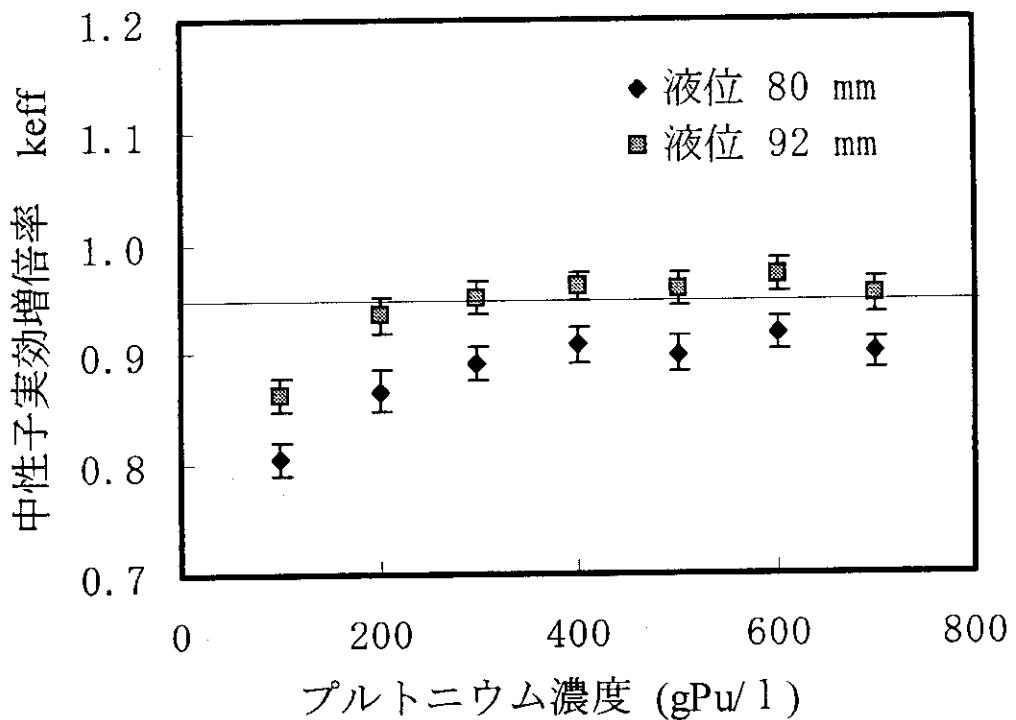


Fig.2.11 臨界計算結果－臨界計算体系（3）－

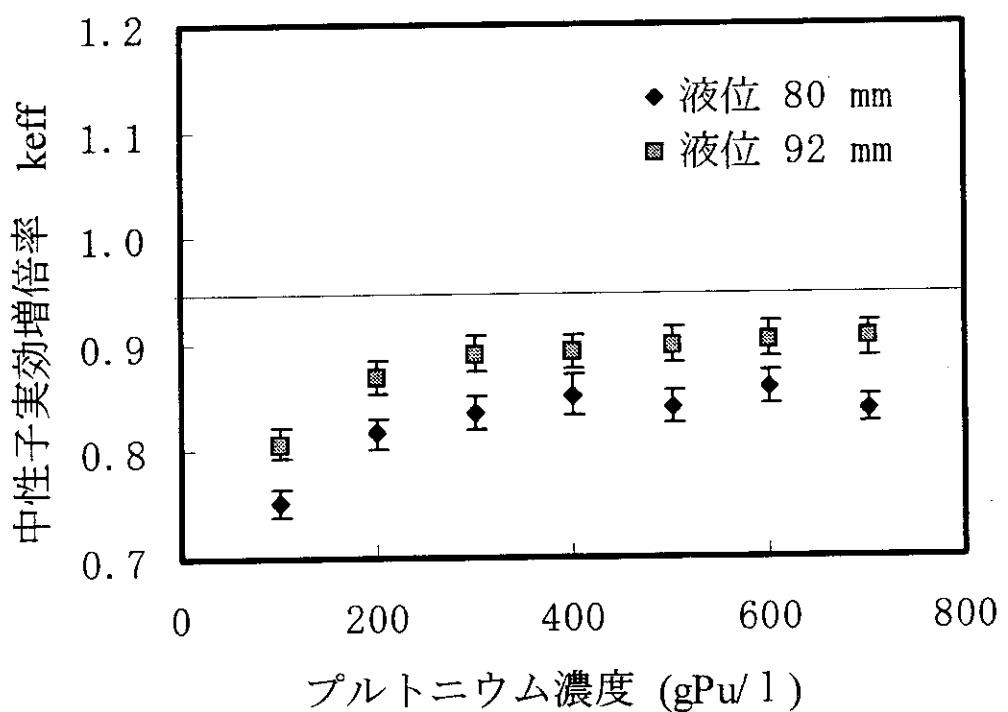
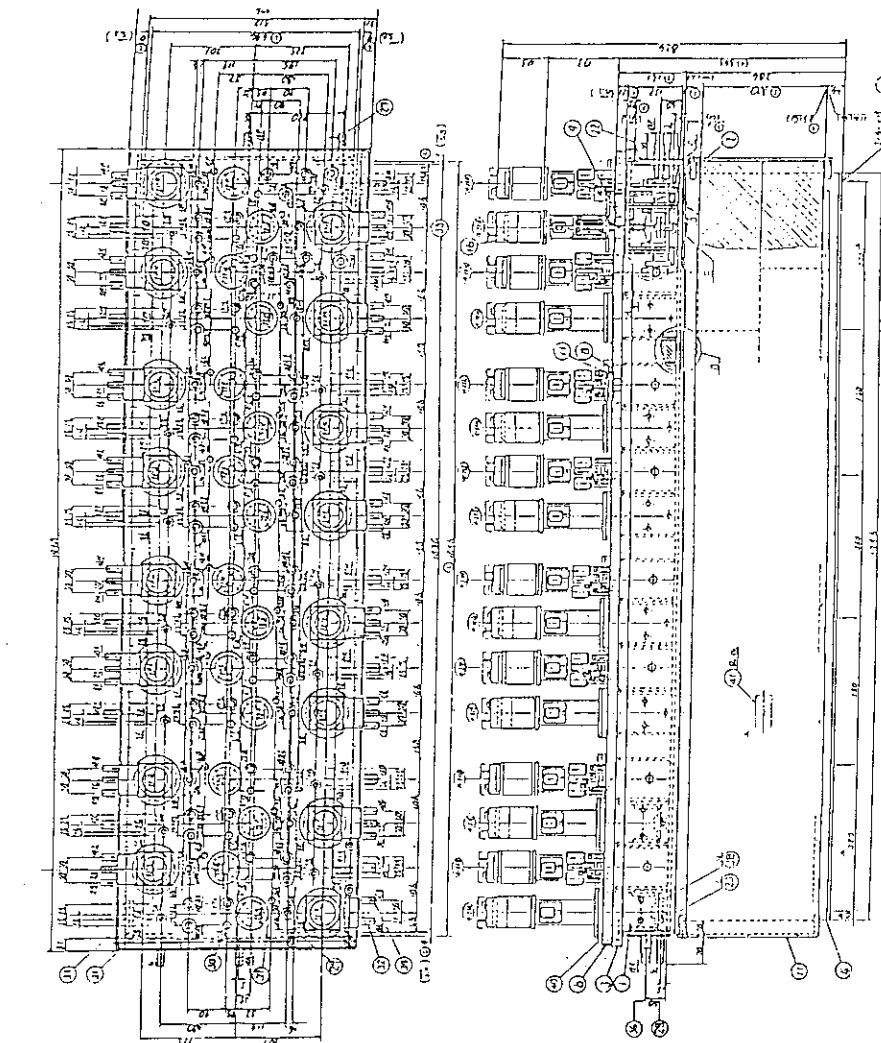


Fig.2.12 臨界計算結果－臨界計算体系（4）－



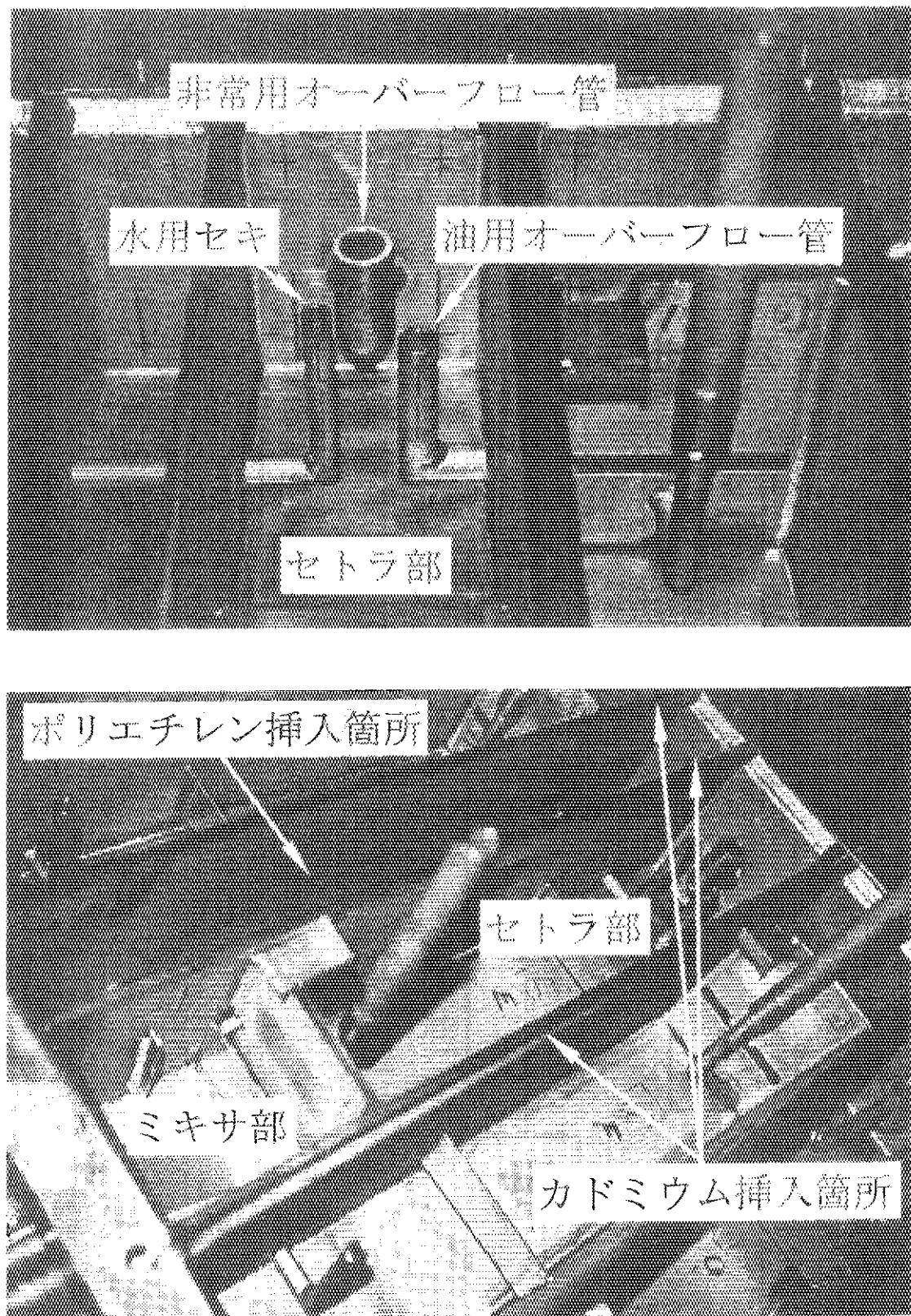


Fig.3.2 実機ミキサセトラの内部写真（共抽出器）

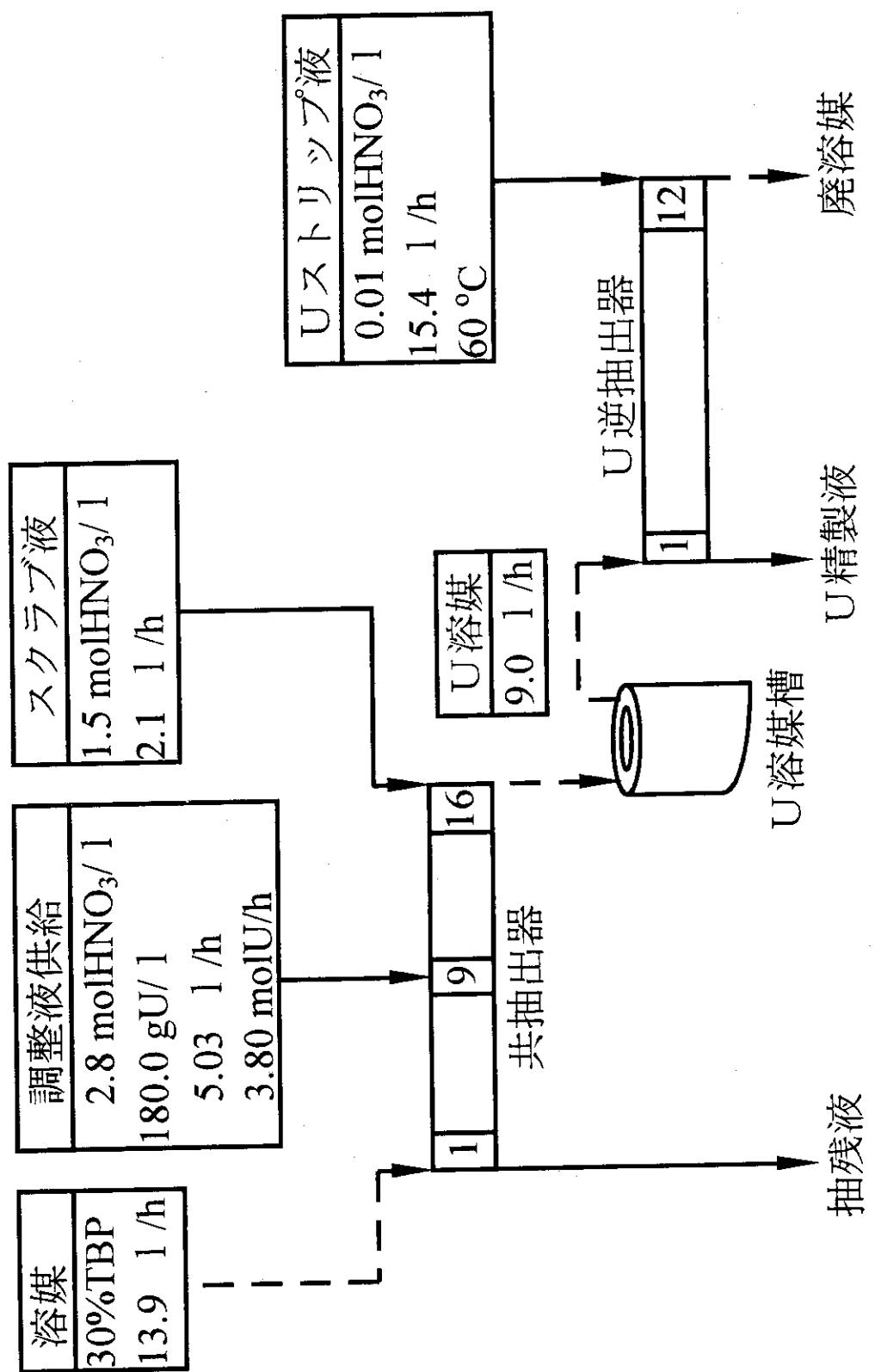


Fig.3.3 性能確認試験条件

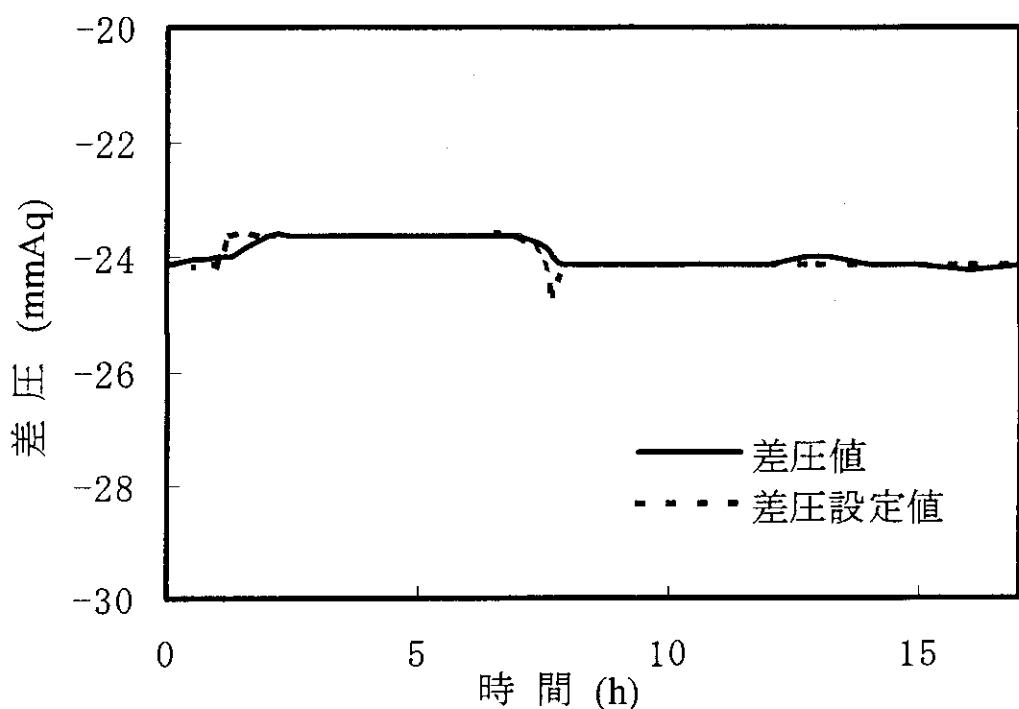


Fig.3.4 界面制御用差圧制御結果（共抽出器）

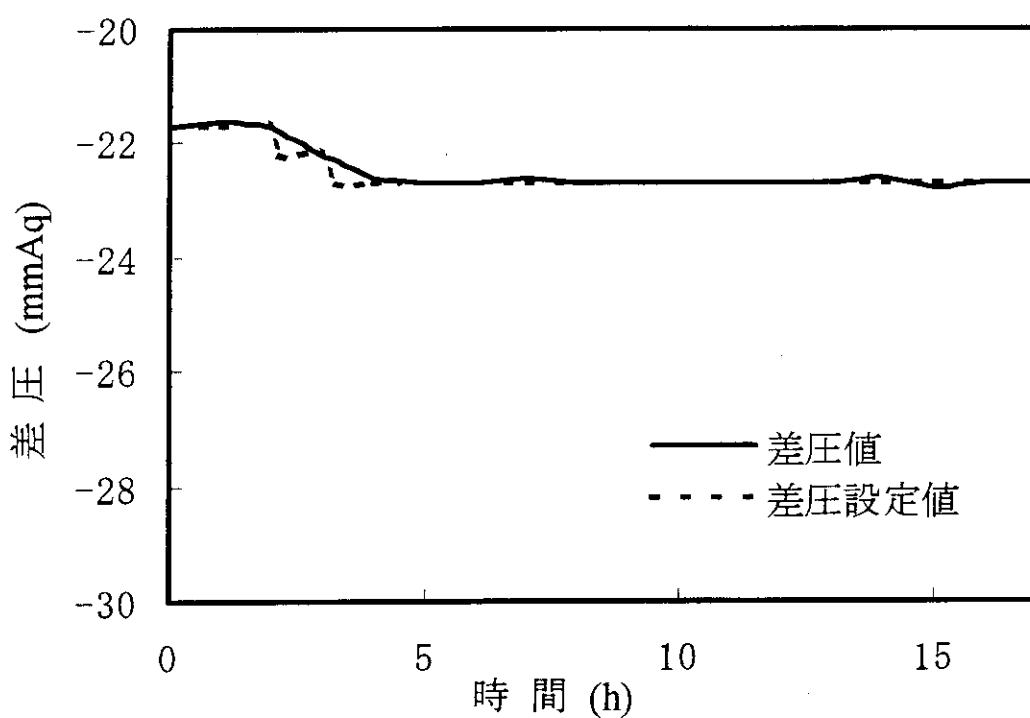


Fig.3.5 界面制御用差圧制御結果（U逆抽出器）

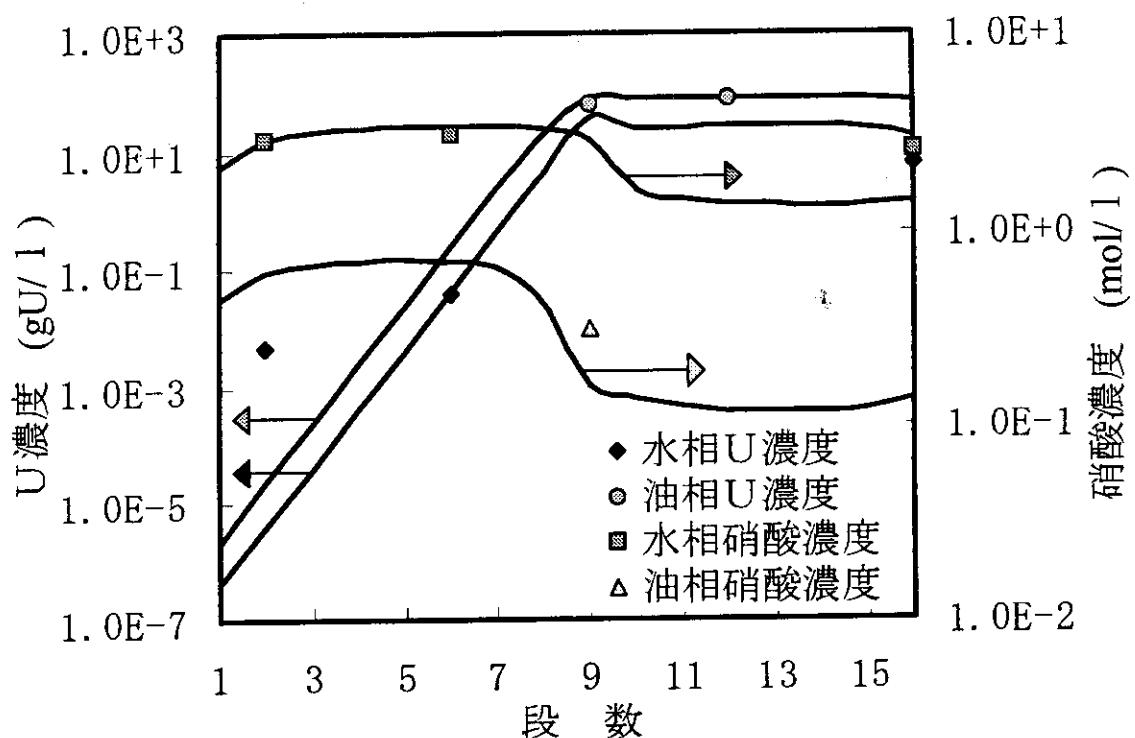


Fig.3.6 定常後共抽出器内濃度プロフィール

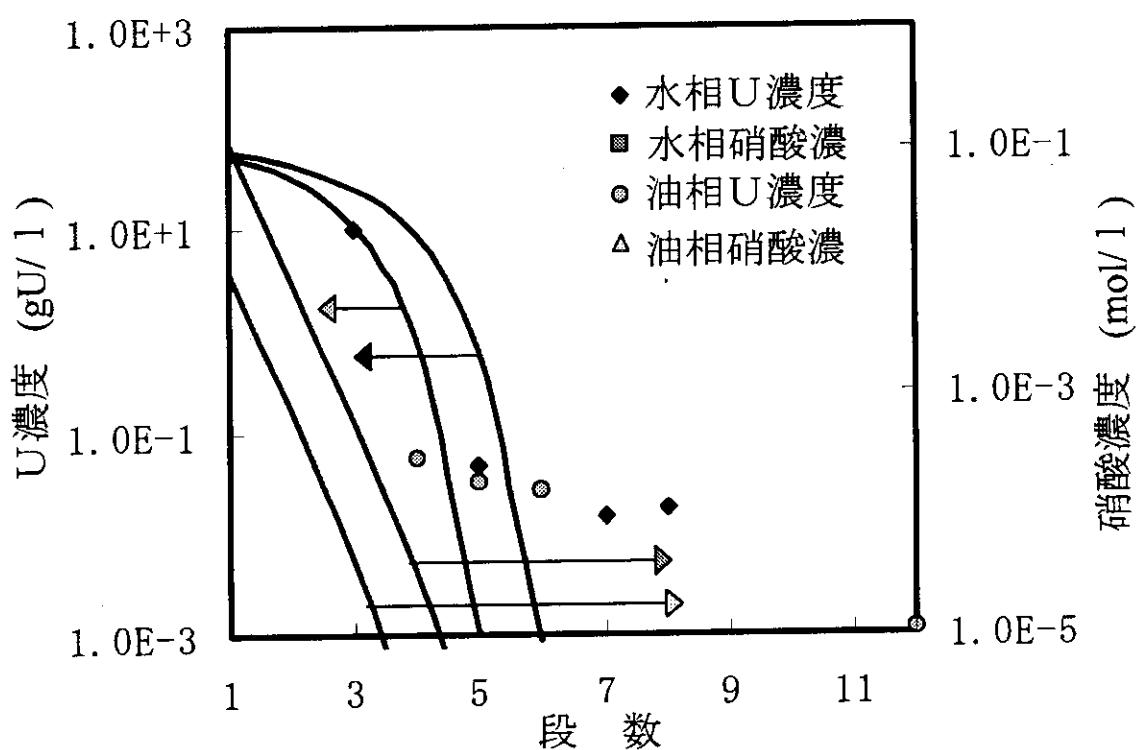


Fig.3.7 定常後U逆抽出器内濃度プロフィール