

燃料異常過渡試験のための希釈管の 希釈係数測定に関する検討

Experimental Study on Dilution Coefficients Measurement of
Capsule Dilution Tube for Fuel Transient Tests

井上 修一 小室 忠男 鍋谷 栄昭 松井 義典
飯田 一広 伊藤 和之 木村 明博 菅野 勝

Shuichi INOUE, Tadao OMURO, Hideaki NABEYA, Yoshinori MATSUI
Kazuhiro IIDA, Kazuyuki ITO, Akihiro KIMURA and Masaru KANNO

大洗研究開発センター

照射試験炉センター

原子炉施設管理部

Department of JMTR Operation

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center

Oarai Research and Development Center

May 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

燃料異常過渡試験のための希釈管の希釈係数測定に関する検討

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター

照射試験炉センター 原子炉施設管理部

井上 修一・小室 忠男※・鍋谷 栄昭・松井 義典

飯田 一広※・伊藤 和之※・木村 明博・菅野 勝

(2010 年 3 月 5 日受理)

燃料異常過渡試験キャプセルを用いた燃料照射試験では、燃料破損時においてキャプセルから流出する核分裂生成物(FP:Fission Products)量を炉外に設置した放射線モニターで検出できる最小限にし、FP の原子炉施設内への放出を低減させる目的で燃料異常過渡試験キャプセル内に希釈管を設けている。JMTR 再稼働後に行う燃料異常過渡試験では、広範囲の試験条件の設定が可能なように燃料異常過渡試験キャプセルの給水流量の増加が計画されている。給水流量が増加すると、放出される FP の増大が予想されたため、給水流量をパラメータとして希釈管の希釈効果を炉外実験で確認した。

本報告は、燃料異常過渡試験キャプセル内の希釈管の希釈係数測定結果をまとめたものである。

Experimental Study on Dilution Coefficients Measurement of Capsule Dilution Tube for Fuel Transient Tests

Shuichi INOUE, Tadao OMURO*, Hideaki NABEYA, Yoshinori MATSUI
Kazuhiro IIDA*, Kazuyuki ITO*, Akihiro KIMURA and Masaru KANNO

Department of JMTR Operation
Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 5, 2010)

In fuel irradiation transient tests using a fuel transient test capsule, a dilution tube has been installed in the boiling water capsule in order to detect fission products (FP) from an irradiated fuel, in case of the fuel failure during the transient, by a radiation monitor located outside the reactor. When the fuel failure occurs, the released FP flows out from the capsule through the dilution tube. The dilution tube is designed to minimize the released FP that can be detected by the radiation monitor located outside the reactor.

In the fuel transient irradiation tests planned after the JMTR restart, there is a plan to increase feed water flow rate to the fuel transient test capsule in order to extend the test condition. When the feed water flow rate increases, an increase of released FP is expected. Therefore, the dilution coefficients of the dilution tube were measured experimentally as a function of feed water flow rate.

This report summarizes the measurement results of the dilution tube installed in the fuel transient test capsule.

Keywords : JMTR, Fuel Transient Test Boiling Capsule, Dilution Tube, Dilution Coefficient

※ : Special Topic Researcher (Nuclear Engineering Co.Ltd.)

目 次

1. 概 要.....	1
2. 試験目的.....	1
3. 燃料破損検出方法及び性能.....	2
4. 希釈係数測定試験装置の構成及び試験条件	3
5. 試験の内容	4
6. 希釈係数測定結果.....	4
7. 稀釈管 1 段と 5 段における希釈係数の比較	7
8. まとめ	8
謝 辞.....	8

Contents

1. Outline.....	1
2. Purpose of the examination.....	1
3. Method of detecting fuel damage and performance	2
4. Testing condition and dilution coefficient measuring device.....	3
5. Examination contents.....	4
6. Dilution coefficient measurement results	4
7. Comparison of dilution coefficients	7
8. Conclusions.....	8
Acknowledgements.....	8

This is a blank page.

1. 概 要

大洗研究開発センターの JMTR (Japan Materials Testing Reactor : 材料試験炉) は、平成 23 年からの再稼働に向けて改修作業を進めている。現在、経済産業省原子力安全・保安院からの受託事業「軽水炉燃材料詳細健全性調査」において、JMTR を活用した軽水炉燃料の健全性評価手法等の信頼性及び透明性の高い技術基盤を得ることを目的に、平成 23 年から照射試験を計画している。このうち、軽水炉燃料においては、高効率・高負荷での運転可能な高度化燃料の開発として、平成 27 年頃に高燃焼度 BWR 用 10×10 燃料を導入する計画であるため、燃料試料の出力急昇照射試験装置 (BOCA/OSF-1) を用いて、燃料試料について現行の上限燃焼度 (燃料集合体で最高 55GWd/t) の約 90GWd/t まで燃料異常過渡試験を行うこととなった。

燃料異常過渡試験では、燃料試料が破損することが考えられるので、破損を検出した場合、速やかに核分裂生成物 (以下、「FP : Fission Products」という) をこの試験に供される燃料異常過渡試験キャプセル (以下、「キャプセル」という) 内に封じ込め、炉外への放出を可能な限り少なくする必要がある。このため、キャプセルはキャプセル内の希釈管を介することにより、一旦、FP 濃度を希釈管容器内の純水で薄め、検出可能な水モニタのレベルまで低下させ希釈管出口以降の配管内を可能な限り低濃度の FP とする構造としている。出力急昇試験設備の全体構成を Fig. 1-1 及びキャプセル構成図を Fig. 1-2 に示す。

今後の試験においては、広範囲の試験条件が設定可能なようにキャプセル給水流量の増加が計画されているため、これまでに得られている燃料試料破損時における FP の濃度挙動を炉外試験によって確認するための基礎試験を行った。

本報告書は、炉外において実施した希釈管の試験結果をまとめたものである。

2. 試験目的

これまで JMTR で行ってきた出力急昇試験は、BWR 条件の圧力下でキャプセル内の給水流量は $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ で実施してきており、この条件で破損検出までの遅れ時間、希釈管の希釈係数などを考慮して FP の検出感度や外部放出量の評価等を行ってきた。

今後の照射試験においては、給水流量を最高 $10 \text{ cm}^3/\text{sec}$ まで流せる水環境調整設備の設計を行っている。このため、各給水流量におけるキャプセル内の希釈管の希釈効率を求めて、今後のキャプセル設計の基礎データ取得のために、以下の目的で試験を行った。

- (1) 今後のキャプセルの使用条件 (燃料破損の早期検出、給水流量の増加等) を考慮して、流量 $1 \text{ cm}^3/\text{sec} \sim 10 \text{ cm}^3/\text{sec}$ での希釈管 1 段当たりの希釈係数の基礎データを採取する。
- (2) 既存の希釈係数 (給水流量 $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$) の再確認を行う。
- (3) 今後予定しているキャプセルの使用条件における希釈係数 (希釈管 5 段、給水流量の増加) について、給水流量と希釈係数の相関を調べる。

3. 燃料破損検出方法及び性能

出力急昇試験において燃料試料が破損し、FP がキャプセル内に放出された場合、放出された FP はキャプセル内の純水と混合して希釈管に入る。希釈管は内径 26mm、1 段当たりの長さ 150mm の円筒 5 段構造(全長約 800mm)で、放出した FP は各段で段階的に希釈される構造になっている。希釈された水は水環境調整設備に設置してある排水側の水モニタで検出し、FP が設定されたレベル以上になった時、遮断弁を自動的に閉じ、FP を含んだ排水の流れを止める。これによって、遮断弁以降は希釈係数により希釈された低濃度の FP が排水される構造となっており、希釈管から水モニタまでの FP 量を最小限に押さえ、水環境調整設備への放出を低減させる。

希釈管の性能としては、キャプセルから流出する FP を水モニタが検出できる FP 濃度まで一時的に希釈し、可能な限り希釈管出口の FP 濃度を低く保つことが要求される。

なお、希釈管を 1 段から 5 段にした場合、各段の希釈管出口濃度を $C_1 \sim C_5$ とすると、近似式は以下のようになる。

$$C_1(t) = L^{-1} C_1(s) \quad L^{-1} : \text{ラプラス変換}$$

$$C_1(s) = C_0(s) \quad G(s) = C_0/S \times a/(S+a)$$

希釈管 1 段目の出口濃度は、次式のようにになる。

$$C_1(t) = L^{-1} C_0/S \times a/(S+a) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$= C_0(1 - \exp(-at))$$

$$\alpha = C_1(t) / C_0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

以降、2 段目から 5 段目の濃度は以下の通りである。

$$C_2(t) = C_0 \{1 - \exp(-at) \times (1+at)\} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$C_3(t) = C_0 \{1 - \exp(-at) \times (1+at+at^2/2)\} \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$C_4(t) = C_0 [1 - \exp(at) \{1+at+(at)^2/2+(at)^3/6\}] \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$C_5(t) = C_0 [1 - \exp(at) \{1+at+(at)^2/2+(at)^3/6+(at)^4/24\}] \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$= C_0 \alpha$$

$$\alpha = C_5(t) / C_0 \quad \dots \dots \dots (7)$$

C_0 : 希釈管入口濃度 (一定)
 C_1 : 希釈管 1 段の希釈管出口濃度
 C_5 : 希釈管 5 段の希釈管出口濃度
 α : 希釈係数

ここで流量 $1\text{cm}^3/\text{sec}$ の時の遅れ定数 (a) は次の通りである。

$$a = q/Q = 1/80 \quad q : \text{流量 } 1 \text{ cm}^3/\text{sec}$$

$$Q : \text{タンク 1 段の容量 } 80 \text{ cm}^3$$

$$t : \text{希管通水後の経過時間 (sec)}$$

4. 希釈係数測定試験装置の構成及び試験条件

今回使用した希釈係数測定試験装置は、可視可能なアクリル製で1～5段の模擬希釈管を使用し、窒素ガスを利用した加圧装置、タンクNo.1、タンクNo.2、圧力計、流量調節弁などから構成される。トレーサとしてNaCl水溶液を使用し、NaCl水溶液のNa濃度変化を測定して希釈効果を求めた。この測定には、希釈管を通過した水溶液をポリビンにサンプリングし、ICP（高周波誘導結合プラズマ）発光分光分析法で測定した。炉外で実施した希釈係数測定試験装置をFig. 4-1に示す。

試験条件は希釈管入口圧力0.96MPaの状態で、流量は希釈管が5段では $1\text{cm}^3/\text{sec}$ 、 $2\text{cm}^3/\text{sec}$ 、1段では1, 2, 3, 6, $10\text{cm}^3/\text{sec}$ で実施した。圧力については照射条件での圧力で実施する予定であったが、装置の制約上できなかった。

4.1 各部の構成

(1) タンク

No.1 タンクは試験のための洗浄用純水、No.2 タンクはNaCl水溶液を貯留するためのもので、容量は各100である。

(2) 希釈管

試験装置に取り付ける模擬希釈管は、従来のキャプセルと同一構造の希釈管（1段 80cm^3 ）とし、1段から5段まで接続可能な構造とした。

希釈管の接続は上下を板で押えネジで固定する方法とした。希釈管の構造図をFig. 4-2に示す。

希釈管詳細図をFig. 4-3に示す。

(3) 圧力計

タンク内の圧力を測定するためのものであり、圧力範囲を0～1MPaとした。

(4) 流量調整用弁

希釈管への流量を調整するための弁であり、 $1\text{cm}^3/\text{sec}$ ～ $10\text{cm}^3/\text{sec}$ の範囲で調整可能とした。

4.2 試験条件

(1) 希釈管1段の試験条件

圧 力	: 0.96MPa(窒素ガス)
流量（目標）	: 1, 2, 3, 6, $10\text{cm}^3/\text{sec}$
Na 濃度（目標）	: 78 ppm（塩化ナトリウム（NaCl）200ppm水溶液）

(2) 希釈管5段での試験条件

圧 力	: 0.96 MPa(窒素ガス)
流量	: $1\text{cm}^3/\text{sec}$ 及び $2\text{cm}^3/\text{sec}$
Na 濃度（目標）	: 59,000 ppm（塩化ナトリウム（NaCl）15%水溶液）

5. 試験の内容

トレーサーとして塩化ナトリウム (NaCl) 水溶液を使用して給水流量毎の希釈管入口と出口の Na 濃度を測定して希釈管の希釈係数 (出口濃度/入口濃度) を求める。希釈係数測定の希釈管段数は 1 段及び 5 段の 2 通りとする。希釈係数としては 1 段では 1×10^{-3} 程度、5 段では 1×10^{-6} 程度の感度が得られるように計画する。

5.1 希釈管 1 段の試験

- (1) 希釈管への給水流量は、 $1\text{cm}^3/\text{sec} \sim 10\text{ cm}^3/\text{sec}$ とする。流量は試験前に実測 (希釈管出口の水を 1 分間程度ビーカー等に溜めてメスシリンダーで測定) して設定するが、サンプリング終了後にも測定して再度確認する。2 回の測定において流量が異なる場合は、2 回のデータの平均値を用いる。
- (2) サンプリング時間は、流量 $1\text{cm}^3/\text{sec}$ 及び $2\text{ cm}^3/\text{sec}$ は 4 秒間隔、 $3\text{cm}^3/\text{sec}$ は 3 秒間隔、 $6\text{cm}^3/\text{sec}$ 及び $10\text{cm}^3/\text{sec}$ は 1 秒間隔で NaCl 水溶液を採取する。
- (3) NaCl 水溶液の Na 濃度は、希釈管出入口の水をサンプリングして ICP (高周波誘導結合プラズマ) 発光分光分析法で測定する。
- (4) 希釈管 1 段におけるサンプリング時間は、排水量が計 100cm^3 程度を目安に設定する。この時のサンプリング数は 11~22 個程度とする。
- (5) データの再現性は、流量 $1\text{cm}^3/\text{sec}$ と $2\text{cm}^3/\text{sec}$ におけるデータを各々 2 回採取することにより確認する。

5.2 希釈管 5 段の試験

- (1) 希釈管 5 段における希釈管への給水流量は、 $1\text{cm}^3/\text{sec}$ 及び $2\text{cm}^3/\text{sec}$ とする。
- (2) サンプリング時間は、流量 $1\text{ cm}^3/\text{sec}$ 及び $2\text{cm}^3/\text{sec}$ とともに 5 秒間隔で NaCl 水溶液を採取する。
- (3) NaCl 水溶液の Na 濃度は、希釈管出入口の水をサンプリングして ICP (高周波誘導結合プラズマ) 発光分光分析法で測定する。
- (4) 希釈管 5 段使用時のサンプリング時間は、排水量が 500cm^3 程度を目安に設定する。この時のサンプリング数は 70~80 個程度とする。

6. 希釈係数測定結果

6.1 希釈管 1 段試験

(1) 流量 $1\text{cm}^3/\text{sec}$

流量 $1\text{cm}^3/\text{sec}$ の試験は再現性確認のため、2 回実施した。

1 回目の試験流量は目標流量 $1\text{cm}^3/\text{sec}$ に対して $1.3\text{cm}^3/\text{sec}$ 、2 回目の試験流量は $1\text{ cm}^3/\text{sec}$ であった。

流量 $1.3\text{ cm}^3/\text{sec}$ の試験における 希釈管出口 Na 濃度/希釈管入口 Na 濃度 (以下、「希釈係数」という) の変化は、Fig. 6-1 に示す通り NaCl 水溶液を希釈管に通水してから 8 秒間はバックグラウン

ド（約 1.1ppm）であった。8～31.5 秒（23.5 秒間）は希釈係数の変化が約 0.3 であり、3 項の計算式(2)に示す近似計算値の 0～22 秒で希釈係数の変化が約 0.3 とほぼ同様な変化を示し、その後は近似計算値より早い変化を示して約 54 秒後にほぼ近似計算値と等しくなった。

流量 $1\text{cm}^3/\text{sec}$ の試験における希釈係数の変化は、Fig. 6-2 に示す通り NaCl 水溶液を希釈管に通水してから 8 秒間はバックグラウンド（約 0.1ppm）であった。8～24 秒間は近似計算値よりも遅れて変化し、24～54.5 秒（30.5 秒間）は希釈係数の変化が約 0.3 であり、近似計算値の 0～28.5 秒で希釈係数の変化が約 0.3 とほぼ同様な変化を示し、その後は近似計算値より早い変化を示して約 75 秒後にほぼ等しくなった。

Na 濃度の分析結果及び希釈係数を Table 6-1 及び Table 6-2 に示す。

2) 流量 $2\text{cm}^3/\text{sec}$

流量 $2\text{cm}^3/\text{sec}$ の試験は再現性確認のため、2 回実施した。

1 回目の試験流量は目標流量 $2\text{cm}^3/\text{sec}$ に対して $1.7\text{cm}^3/\text{sec}$ 、2 回目の試験流量は $1.9\text{cm}^3/\text{s}$ であった。

流量 $1.7\text{cm}^3/\text{sec}$ の試験における希釈係数の変化は、Fig. 6-3 に示す通り NaCl 水溶液を希釈管に通水してから 4 秒間はバックグラウンド（約 0.1ppm）であった。4～12 秒間は近似計算値よりも遅れて変化し、12～30.5 秒（18.5 秒間）は希釈係数の変化が約 0.3 であり、近似計算値の 0～16.8 秒で希釈係数の変化が約 0.3 とほぼ同様な変化を示し、その後は近似計算値より早い変化を示したが最後のサンプリングである 40 秒を経過しても近似計算値より遅れて変化した。

流量 $1.9\text{cm}^3/\text{sec}$ の試験における希釈係数の変化は、Fig. 6-4 に示す通り NaCl 水溶液を希釈管に通水してから 4 秒間はバックグラウンド（約 0.1ppm）であった、4～20 秒（16 秒間）は希釈係数の変化が約 0.3 であり、近似計算値の 0～15 秒で希釈係数の変化が約 0.3 とほぼ同様な変化を示し、その後は近似計算値より早い変化を示して約 26 秒後にほぼ等しくなった。

Na 濃度の分析結果および希釈係数を Table 6-3 及び Table 6-4 に示す。

(3) 流量 $3\text{cm}^3/\text{sec}$

試験流量は目標流量 $3\text{cm}^3/\text{sec}$ に対して $3.2\text{cm}^3/\text{s}$ であった。

流量 $3.2\text{cm}^3/\text{sec}$ の試験における希釈係数の変化は、Fig. 6-5 に示す通り NaCl 水溶液を希釈管に通水してから 3 秒間はバックグラウンド（約 0.1ppm）であった、3～13 秒（10 秒間）は希釈係数の変化が約 0.3 であり、近似計算値の 0～8.8 秒で希釈係数の変化が約 0.3 とほぼ同様な変化を示し、その後は近似計算値より早い変化を示して約 23 秒後にほぼ等しくなった。

Na 濃度の分析結果および希釈係数を Table 6-5 に示す。

(4) 流量 $6\text{cm}^3/\text{sec}$

試験流量は目標流量 $6\text{cm}^3/\text{sec}$ に対して $6.7\text{cm}^3/\text{sec}$ であった。

流量 $6.7\text{cm}^3/\text{sec}$ の試験における希釈係数の変化は、Fig. 6-6 に示す通り NaCl 水溶液を希釈管に通水してから 1 秒間はバックグラウンド（約 0.1ppm）であった、1～5.5 秒（4.5 秒間）は希釈係数の変化が約 0.3 であり、近似計算値の 0～4.5 秒で希釈係数の変化が約 0.3 とほぼ同様な変化を示し、その後は近似計算値より早い変化を示して約 7 秒後にほぼ等しくなった。

Na 濃度の分析結果および希釈係数を Table 6-6 に示す。

(5) 流量 10cm³/sec

試験流量は目標流量 10cm³/sec に対して 9.7cm³/sec であった。

流量 9.7 cm³/sec の試験における希釈係数の変化は、Fig. 6-7 に示す通り NaCl 水溶液を希釈管に通水して 1 秒後には変化し、0～3.1 秒は希釈係数の変化が約 0.3 であり、近似計算値の 0～3 秒で希釈係数の変化が約 0.3 とほぼ同様な変化を示し、その後は近似計算値より早い変化を示して約 3.2 秒後にほぼ等しくなった。Na 濃度の分析結果を Table 6-7 に示す。

これらの結果から実測した希釈係数の変化開始点は近似計算値より流量が低いほど遅れる傾向がみられる。しかし、希釈係数が 0.3 変化する時間は流量 1cm³/sec で 30.5 秒、流量 1.9cm³/sec で 16 秒、流量 3.2cm³/sec で 10 秒、流量 6.7cm³/sec で 4.5 秒、流量 9.7cm³/sec で 3.1 秒であり、希釈係数が変化する時間は流量に反比例（流量 1cm³/sec で 0.3 変化する所用時間/各流量 1.9、3.2、6.7、9.7 で 0.3 変化する所用時間）し、この間の実測値と近似計算値の変化率（0.3/0.3 変化する所用時間）はほぼ同じ傾向である結果が得られた。流量 1cm³/sec から 10 cm³/sec の希釈係数の変化を Fig. 6-8 および Na 実測値を Table 6-8 に示す。

6.2 希釈管 5 段試験

既存の水環境調整設備による破損検知までのおおよその時間は流量 1cm³/sec において 30 秒程度（希釈係数では 2.5×10^{-5} ）であるため、希釈管 5 段を使用して希釈係数のデータを評価した。流量 1 cm³/sec の試験は従来のキャプセル希釈係数のデータを確認するためのもので、流量 2 cm³/sec の試験は今回更新する装置の現段階の最大流量 2cm³/sec における希釈係数のデータを新たに採取し、流量 1cm³/sec、2cm³/sec から流量 10cm³/sec までの希釈係数の変化を推定するためのものである。

(1) 流量 1cm³/sec

NaCl 水溶液を用いた希釈管 5 段、流量 1cm³/sec における希釈係数は、Fig. 6-9 に示す通り NaCl 水溶液を希釈管に通水してから 40 秒間はバックグラウンド（約 0.02ppm）であった。40～50 秒間は近似計算値よりも遅れて変化し、50～81 秒（31 秒間）は希釈係数の変化が 2.5×10^{-5} （放射能高で遮断弁が閉じる希釈係数）であり、3 項の計算式(7)に示す近似計算値の 0～28.5 秒で希釈係数の変化が 2.5×10^{-5} とほぼ同様な傾きを示した。結果を Table 6-9 に示す。

(2) 流量 2 cm³/sec

NaCl 水溶液を用いた希釈管 5 段、流量 1.8 cm³/sec における希釈係数は、Fig. 6-10 に示す通り NaCl 水溶液を希釈管に通水してから 10 秒間はバックグラウンド（約 0.1ppm）であった。10～25 秒間は近似計算値よりも遅れて変化し、25～40 秒（15 秒間）は希釈係数の変化が 2.5×10^{-5} （放射能高で遮断弁が閉じる希釈係数）であり、3 項の計算式(7)に示す近似計算値の 0～14.5 秒で希釈係数が 2.5×10^{-5} とほぼ同様な傾きを示した。結果を Table 6-10 に示す。

(3) 既存データとの比較

既存の希釈係数データは KOH をトレーサーとして求めたものである。今回、トレーサーを NaCl

水溶液に変更して希釈係数を比較した。

Fig. 6-11 に示す通り希釈係数変化の開始時間は従来(KOH)データが通水して約 175 秒後、今回(NaCl)データが通水して約 40 秒後であった。また、放射能高で遮断弁が閉じるときの希釈係数は 2.5×10^{-5} であるが、これに要する時間が従来と今回のデータは各々通水して約 215 秒後と約 81 秒であったが、希釈係数が変化を開始し、放射能高で遮断弁が閉じるまでの時間は各々約 40 秒と 41 秒となり、ほぼ同じであった。結果を Table 6-11 に示す。

このように、希釈係数変化の開始時間は大きく異なるが希釈係数の変化開始から 2×10^{-5} に到達する時間は約 40 秒と同じであった。既存の希釈係数変化開始時間遅れ原因はサンプリングラインの影響と推定され、希釈係数の変化傾向は両者とも同じであると考えられる。

(4) 流量による比較

各流量における希釈係数の変化開始時間は $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ では通水して約 45 秒後、 $2 \text{ cm}^3/\text{sec}$ では約 10 秒後であった。また、放射能高で遮断弁が閉じる（希釈係数は 2.5×10^{-5} ）ことに要する時間は各々通水して約 81 秒後と約 40 秒後であり、流量にほぼ反比例（希釈係数の変化率には比例）して変化している。また、希釈係数変化の開始から放射能高で遮断弁が閉じるまでの時間についても、流量 $1 \text{ cm}^3/\text{s}$ が 31 秒、 $2 \text{ cm}^3/\text{s}$ が 15 秒と流量と反比例した結果となった。

7. 希釈管 1 段と 5 段における希釈係数の比較

同一流量で、希釈管段数が 1 段と 5 段における希釈係数の変化を比較した。なお、希釈係数の立ち上がりと比較するため、希釈管 5 段の原点は希釈係数が変化開始する点（ $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ が 45 秒、 $2 \text{ cm}^3/\text{sec}$ が 25 秒）とした。

(1) 流量が $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ の場合

Fig. 7-1 に示す通り希釈係数の変化が開始してから希釈管 1 段では 0.25 に到達する時間が 41.5 秒、5 段では 2.5×10^{-5} に到達する時間が 44.5 秒とほぼ同じ時間であった、結果を Table 7-1 に示す。

(2) 流量が $2 \text{ cm}^3/\text{sec}$ の場合

Fig. 7-2 に示す通り希釈係数の変化が開始してから希釈管 1 段では 0.25 に到達する時間が 18.5 秒、5 段では 2.5×10^{-5} に到達する時間が 19 秒とほぼ同じ時間であった。結果を Table 7-2 に示す。

流量 $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 及び $2 \text{ cm}^3/\text{sec}$ における希釈管 5 段の希釈係数の変化は、希釈管 1 段の希釈係数の変化とほぼ同じであった。また、流量が異なることによる希釈管 5 段の希釈係数への影響は、ほぼ流量に比例して希釈係数が速く変化することが分かった。これらの結果から、流量 $3 \text{ cm}^3/\text{sec} \sim 10 \text{ cm}^3/\text{sec}$ の希釈係数の変化は、希釈管 1 段のデータまたは希釈管 5 段のデータから推定できると考えられる。

8. ま と め

- (1)今後の照射予定を考慮した希釈係数の基礎データ(希釈管は 1 段で流量 $1\text{cm}^3/\text{sec}\sim 10\text{cm}^3/\text{sec}$)を計画通り採取し、各流量における希釈係数は実測値と近似計算値の変化率(傾き)がほぼ同じ傾向であることを明らかにした。
- (2)今回と従来のキャプセルの希釈係数(給水流量 $1\text{cm}^3/\text{sec}$)は、放射能高で遮断弁が閉じる希釈係数(2.5×10^{-5})に到達する時間が各々通水して約 215 秒後と約 85 秒後と異なるものの、希釈係数が変化して 2.5×10^{-5} まで立ち上がる時間は約 40 秒とほぼ同じであることを確認した。
- (3)今後の燃料異常過渡試験で使用するキャプセルの使用条件(希釈管 5 段、給水流量を $1\text{cm}^3/\text{sec}$ から $10\text{cm}^3/\text{sec}$ に増加)における希釈係数は、希釈管 1 段のデータから推定できる可能性があることが分かった。また希釈管 5 段、流量 $1\text{cm}^3/\text{sec}\sim 2\text{cm}^3/\text{sec}$ のデータからも推定できる可能性があることが分かった。
- (4)目標流量 $1\text{cm}^3/\text{sec}$ では $1\text{cm}^3/\text{sec}$ 及び $1.3\text{cm}^3/\text{sec}$ 、目標流量 $2\text{cm}^3/\text{sec}$ では $1.7\text{cm}^3/\text{sec}$ 及び $1.9\text{cm}^3/\text{sec}$ と目標流量から少し外れたものの希釈係数の変化の傾向はほぼ同じであり、再現性があることを確認した。

これらの結果から、希釈係数は、流量が増加すると比例して速い変化となるため、流量が $2\text{cm}^3/\text{sec}$ の場合は $1\text{cm}^3/\text{sec}$ の場合と比較して半分の時間で検出でき、希釈係数もほぼ同じであり FP の放出率が変わらないことが分かった。また、流量が $1\text{cm}^3/\text{sec}$ における既存希釈係数データと今回取得したデータが同等であることを確認した。

5 段の希釈管への $10\text{cm}^3/\text{sec}$ の通水試験は、試験装置の制約でできなかったこと及び $10\text{cm}^3/\text{sec}$ 通水の場合はキャプセルの炉外装置の配管の内径等の因子が影響してくること等、将来 $10\text{cm}^3/\text{sec}$ での照射試験を行う場合には配管の圧力損失を考慮して配管径及び希釈管の構造を含め検討する必要があると考える。このため、 $10\text{cm}^3/\text{sec}$ まで流量を増加させる場合には、事前に 5 段の希釈管の効果を実機を模擬した試験により確認する必要があると考える。

謝 辞

今回の本報告書に記載した実験装置の組み立てや測定の方法などについて、大洗研究開発センター照射試験炉センター照射試験開発課石田卓也氏に御協力頂きました。ここに謝意を表します。

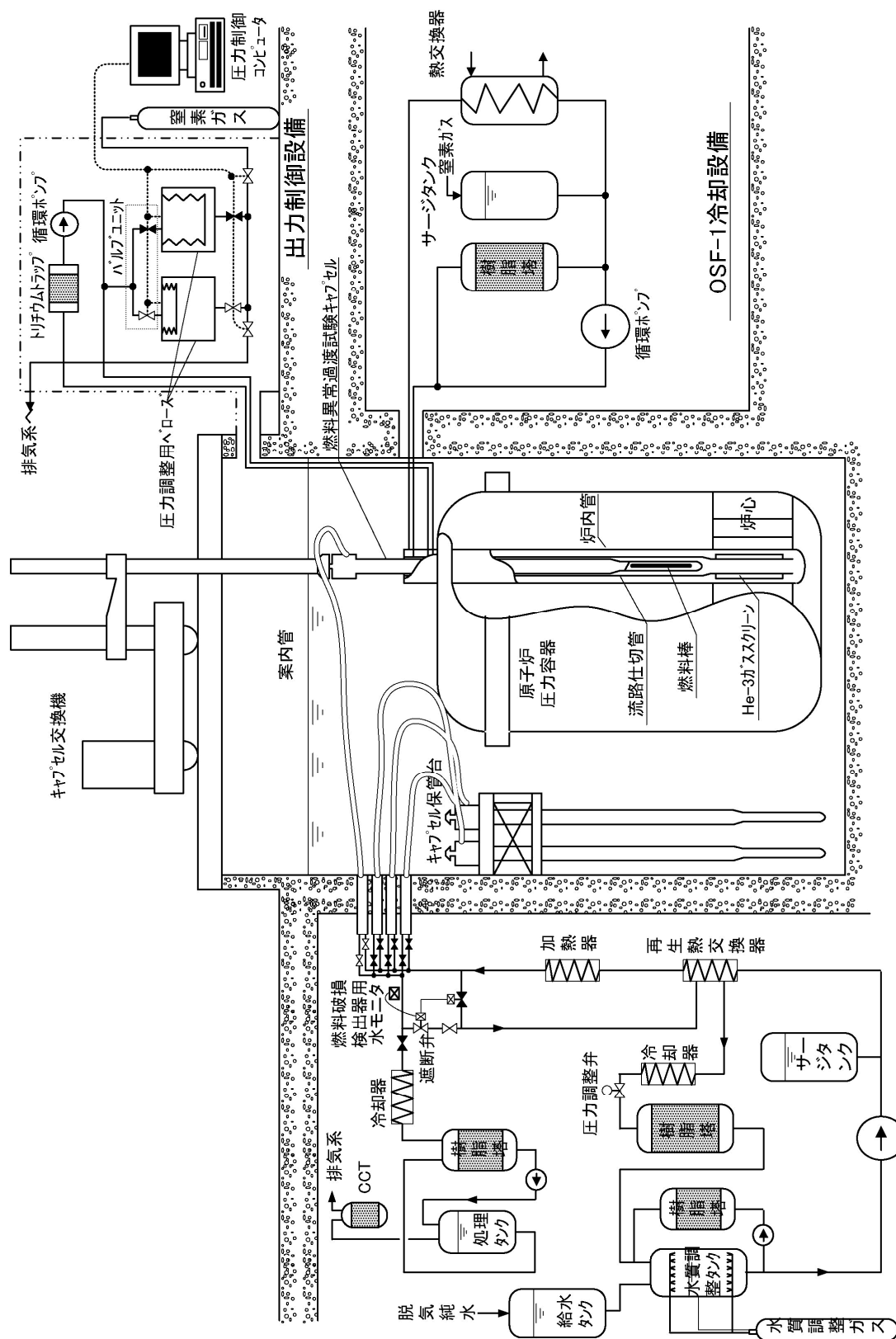


Fig. 1-1 出力急昇試験設備の全体構成

給水ポンプ
水環境調整設備

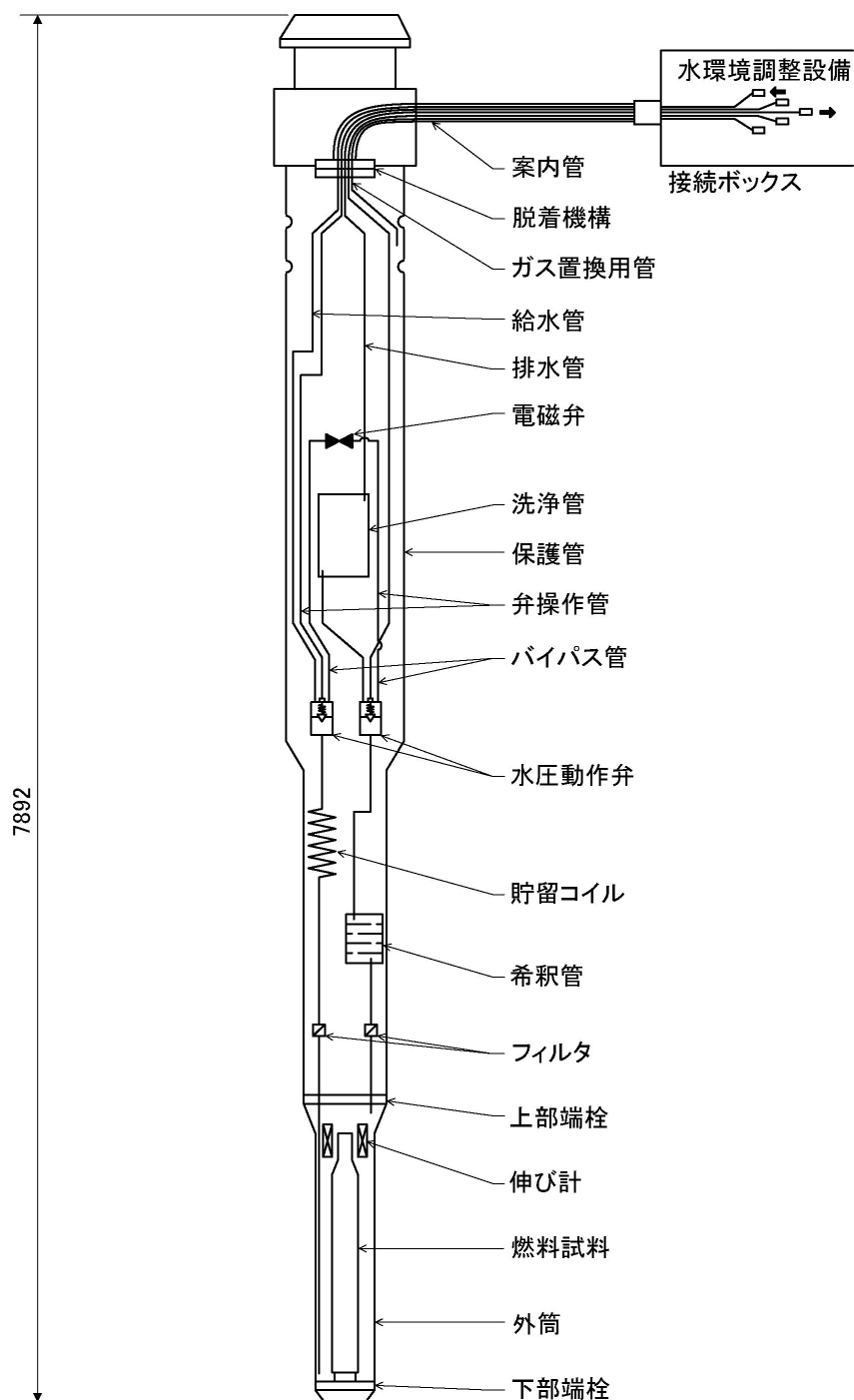


Fig. 1-2 燃料異常過渡試験キャプセル構成図

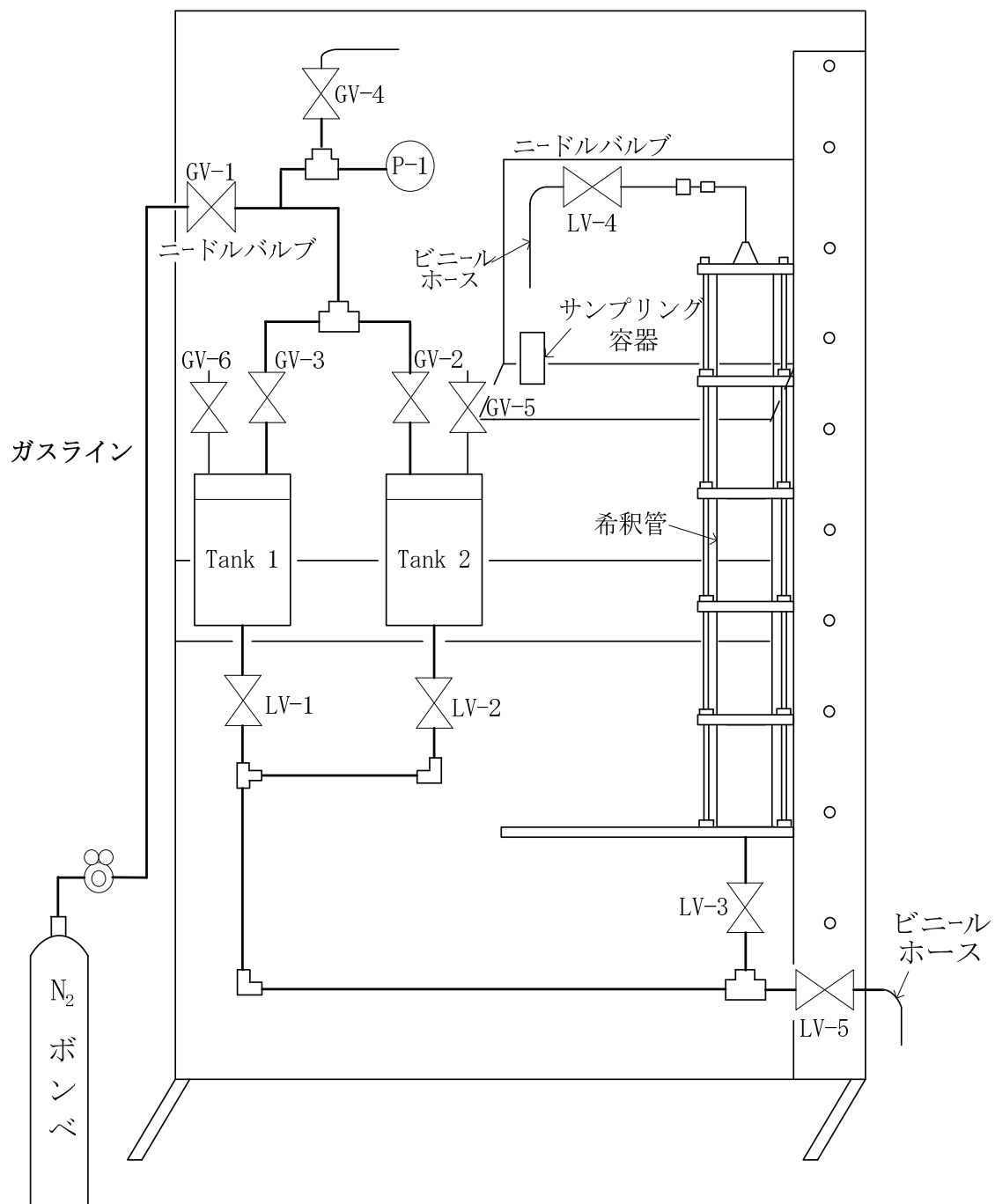


Fig. 4 - 1 希釈係数測定試験装置

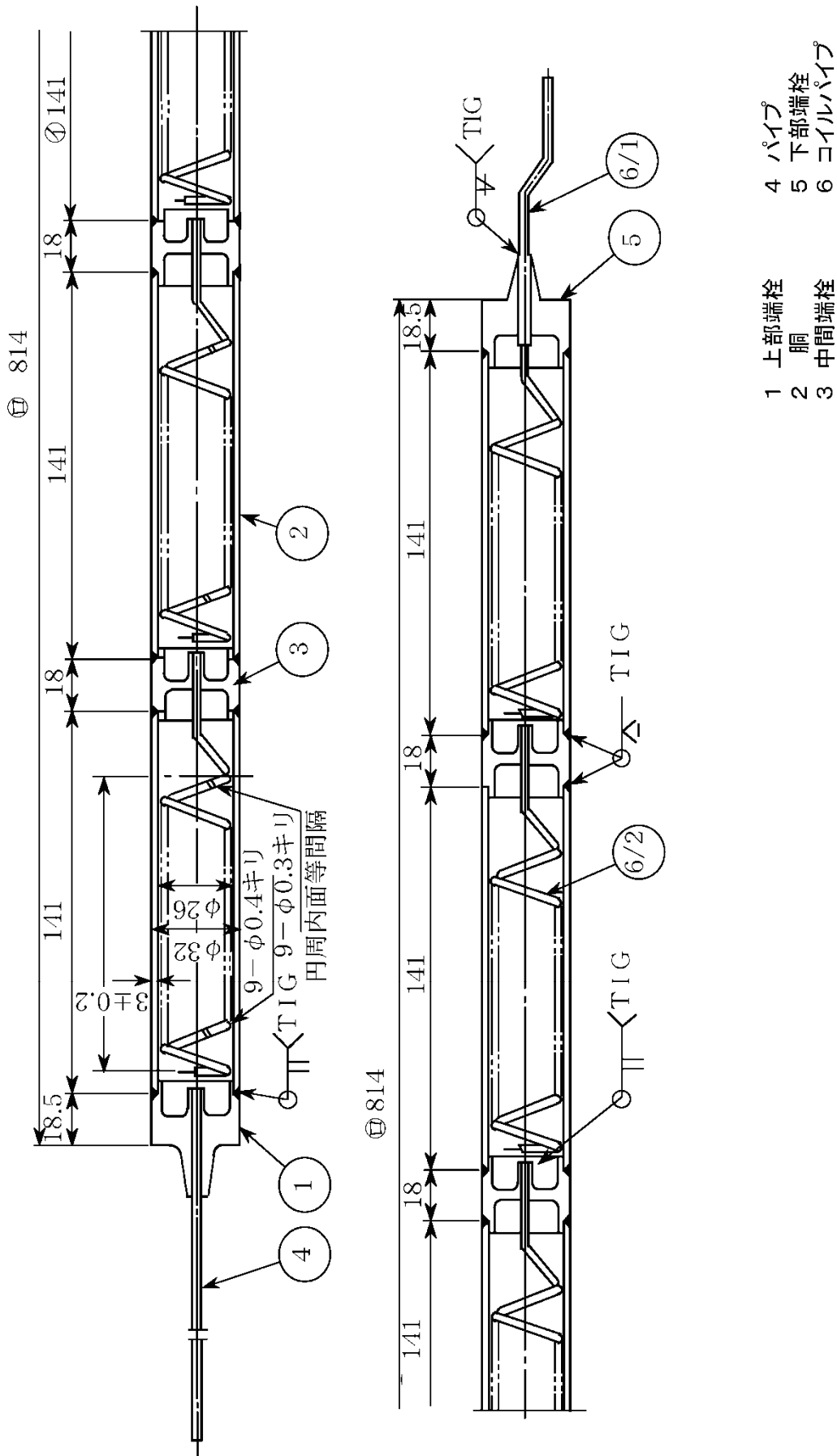


Fig. 4-2 希釈管の構造図

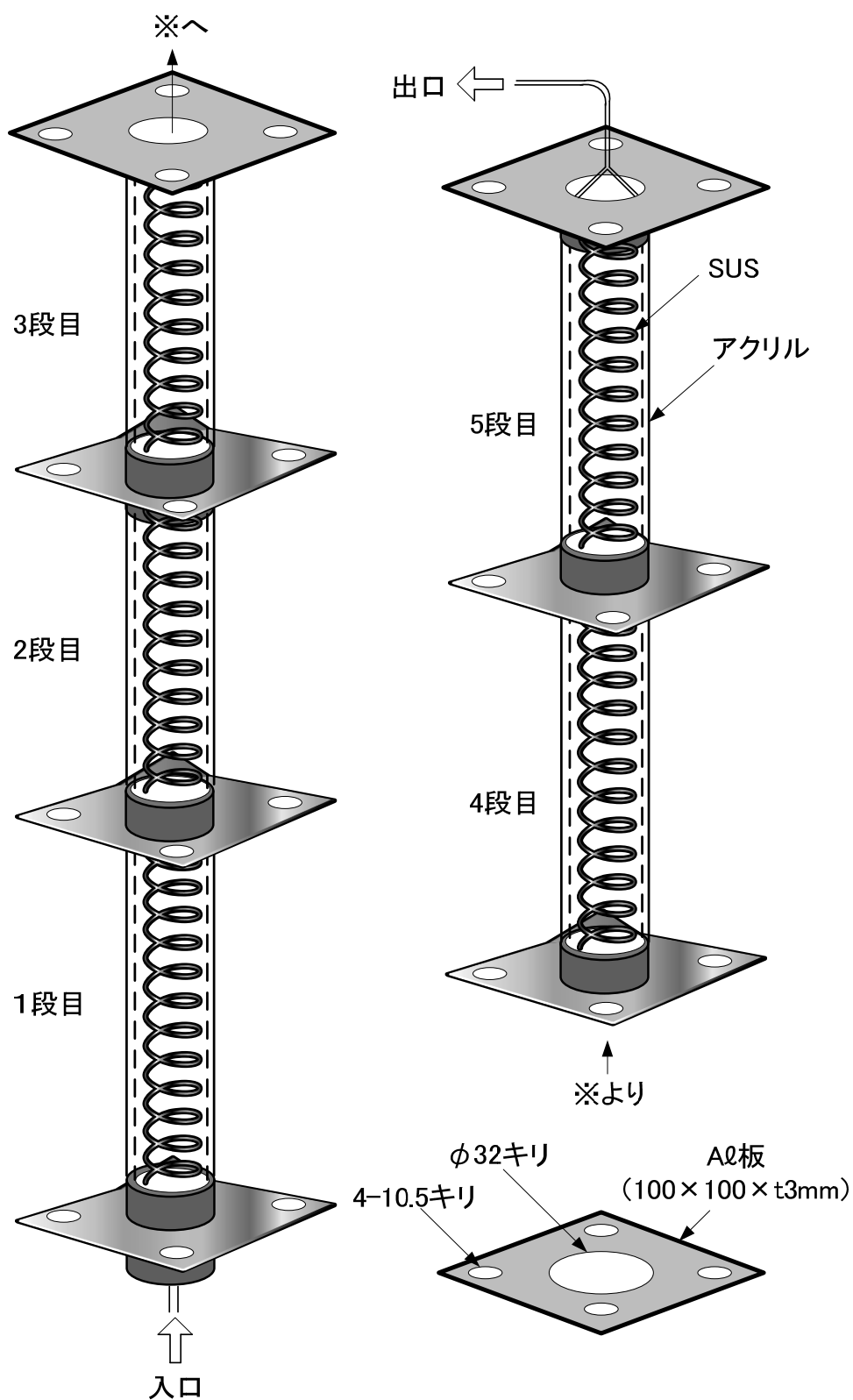
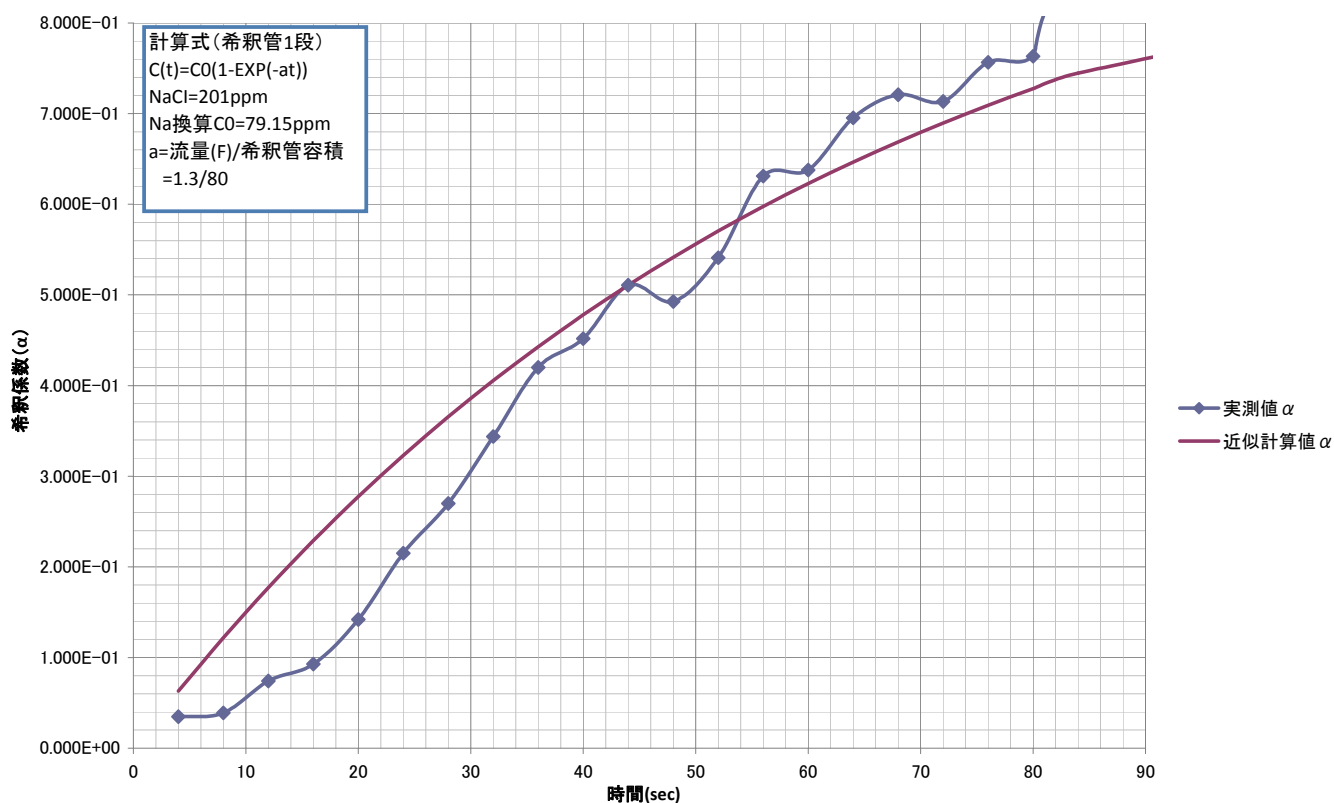


Fig. 4-3 希釈管詳細図

Fig.6-1 1段・流量 1.3cm³/s における実測値と近似計算値との希釈係数比較Table. 6-1 希釈管 1 段の流量 1.3 cm³/s データ (Fig. 6-1)

NaCl濃度 (201 ppm)

サンプルNo.	経過時間(s)	希釈係数(α)	近似計算値 α (t)	Na 実測値 (ppm)
1	4	3.485E-02	6.293E-02	2.760E+00
2	8	3.903E-02	1.219E-01	3.091E+00
3	12	7.422E-02	1.772E-01	5.878E+00
4	16	9.281E-02	2.289E-01	7.350E+00
5	20	1.418E-01	2.775E-01	1.123E+01
6	24	2.151E-01	3.229E-01	1.703E+01
7	28	2.699E-01	3.656E-01	2.137E+01
8	32	3.439E-01	4.055E-01	2.723E+01
9	36	4.200E-01	4.429E-01	3.326E+01
10	40	4.516E-01	4.780E-01	3.576E+01
11	44	5.108E-01	5.108E-01	4.045E+01
12	48	4.927E-01	5.416E-01	3.902E+01
13	52	5.409E-01	5.704E-01	4.283E+01
14	56	6.310E-01	5.975E-01	4.997E+01
15	60	6.377E-01	6.228E-01	5.05E+01
16	64	6.954E-01	6.465E-01	5.507E+01
17	68	7.208E-01	6.688E-01	5.708E+01
18	72	7.135E-01	6.896E-01	5.65E+01
19	76	7.567E-01	7.092E-01	5.992E+01
20	80	7.632E-01	7.275E-01	6.044E+01
21	84	8.430E-01	7.446E-01	6.676E+01
22	148	8.948E-01	9.097E-01	7.086E+01

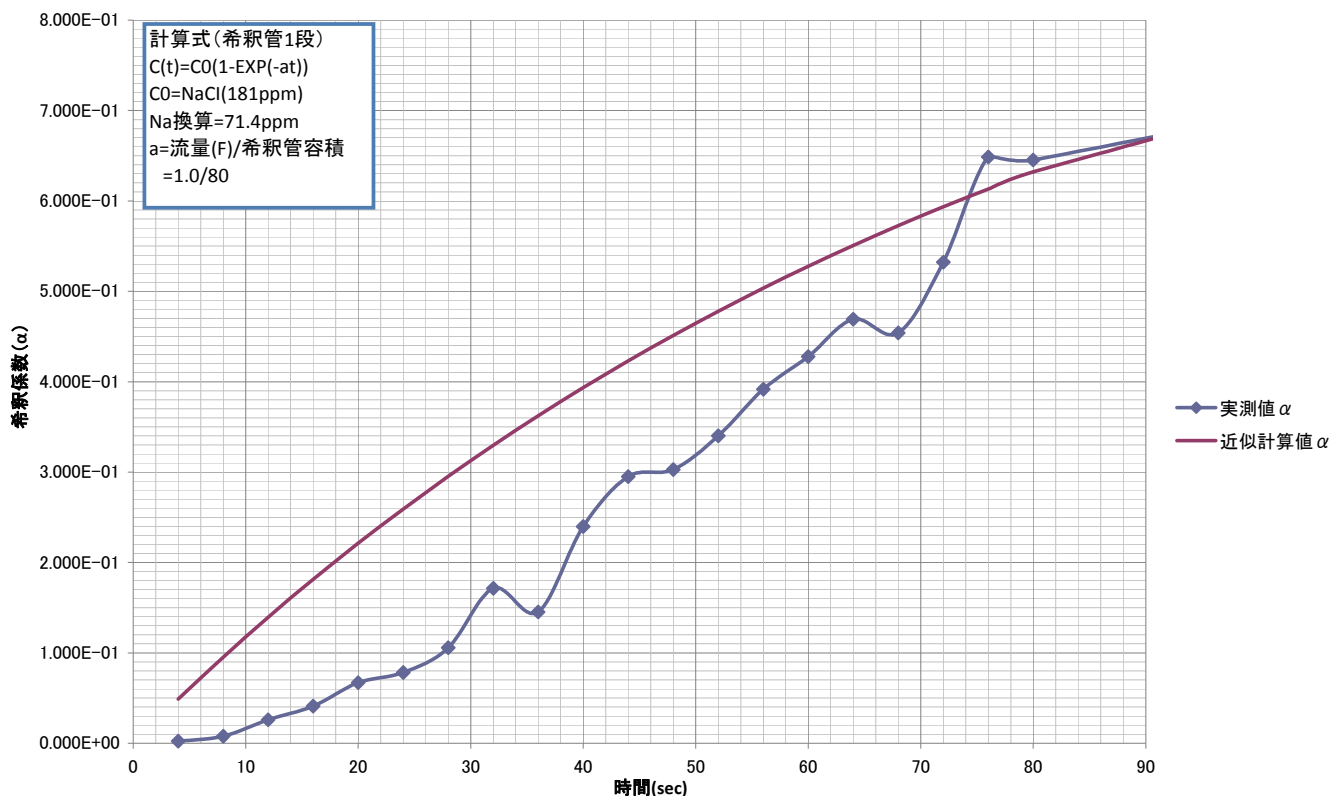


Fig.6-2 1 段・流量 1.3cm³/s における実測値と近似計算値との希釈係数比較

Table. 6-2 希釈管 1 段の流量 1.0 cm³/s データ (Fig. 6-2)

NaCl濃度 (181 ppm)

サンプルNo.	経過時間 (s)	希釈係数 (α)	近似計算値 α (t)	Na 実測値 (ppm)
1	4	2.156E-03	4.877E-02	1.541E-01
2	8	7.787E-03	9.516E-02	5.564E-01
3	12	2.581E-02	1.393E-01	1.844E+00
4	16	4.109E-02	1.813E-01	2.936E+00
5	20	6.708E-02	2.212E-01	4.793E+00
6	24	7.832E-02	2.592E-01	5.596E+00
7	28	1.056E-01	2.953E-01	7.546E+00
8	32	1.714E-01	3.297E-01	1.225E+01
9	36	1.453E-01	3.624E-01	1.038E+01
10	40	2.397E-01	3.935E-01	1.713E+01
11	44	2.949E-01	4.231E-01	2.107E+01
12	48	3.026E-01	4.512E-01	2.162E+01
13	52	3.401E-01	4.780E-01	2.430E+01
14	56	3.916E-01	5.034E-01	2.798E+01
15	60	4.278E-01	5.276E-01	3.057E+01
16	64	4.691E-01	5.507E-01	3.351E+01
17	68	4.539E-01	5.726E-01	3.243E+01
18	72	5.321E-01	5.934E-01	3.802E+01
19	76	6.486E-01	6.133E-01	4.634E+01
20	80	6.452E-01	6.321E-01	4.610E+01
21	144	8.048E-01	8.504E-01	5.750E+01

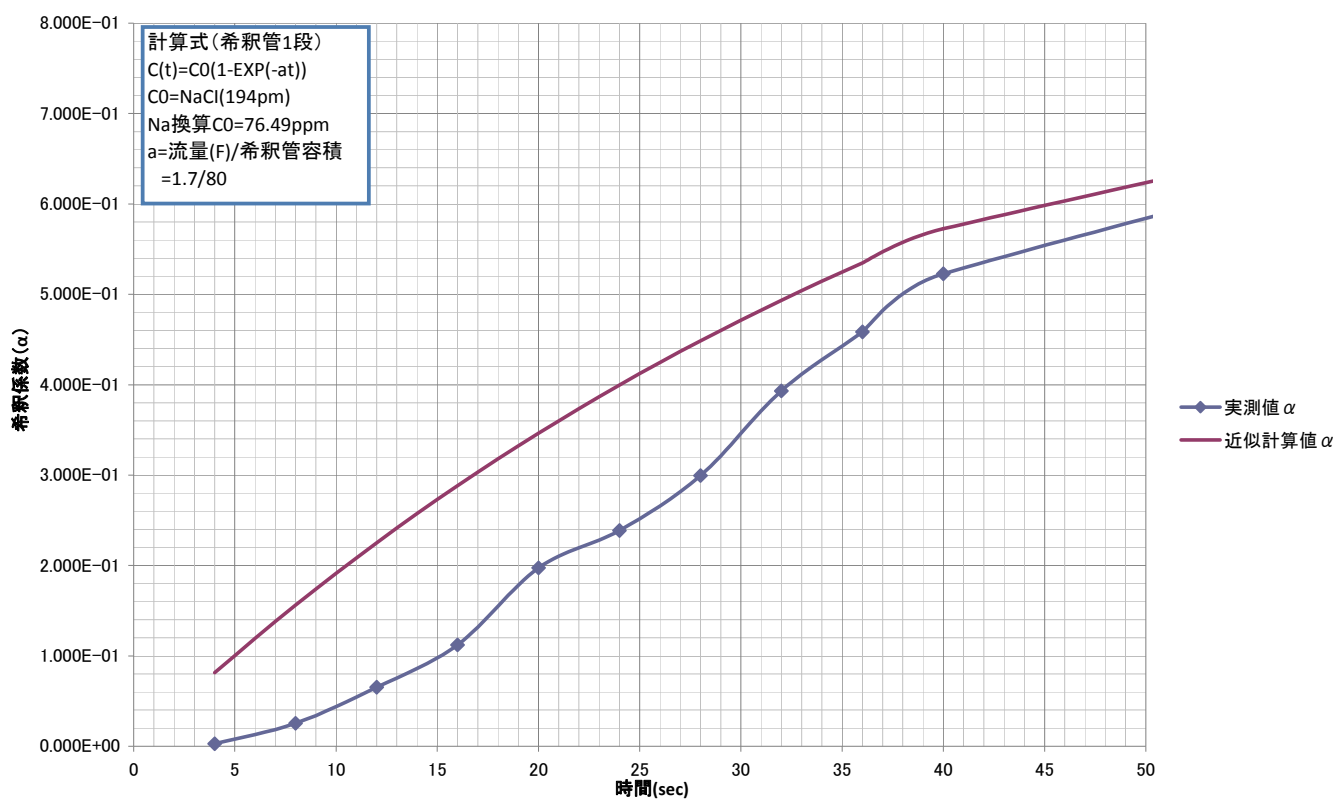
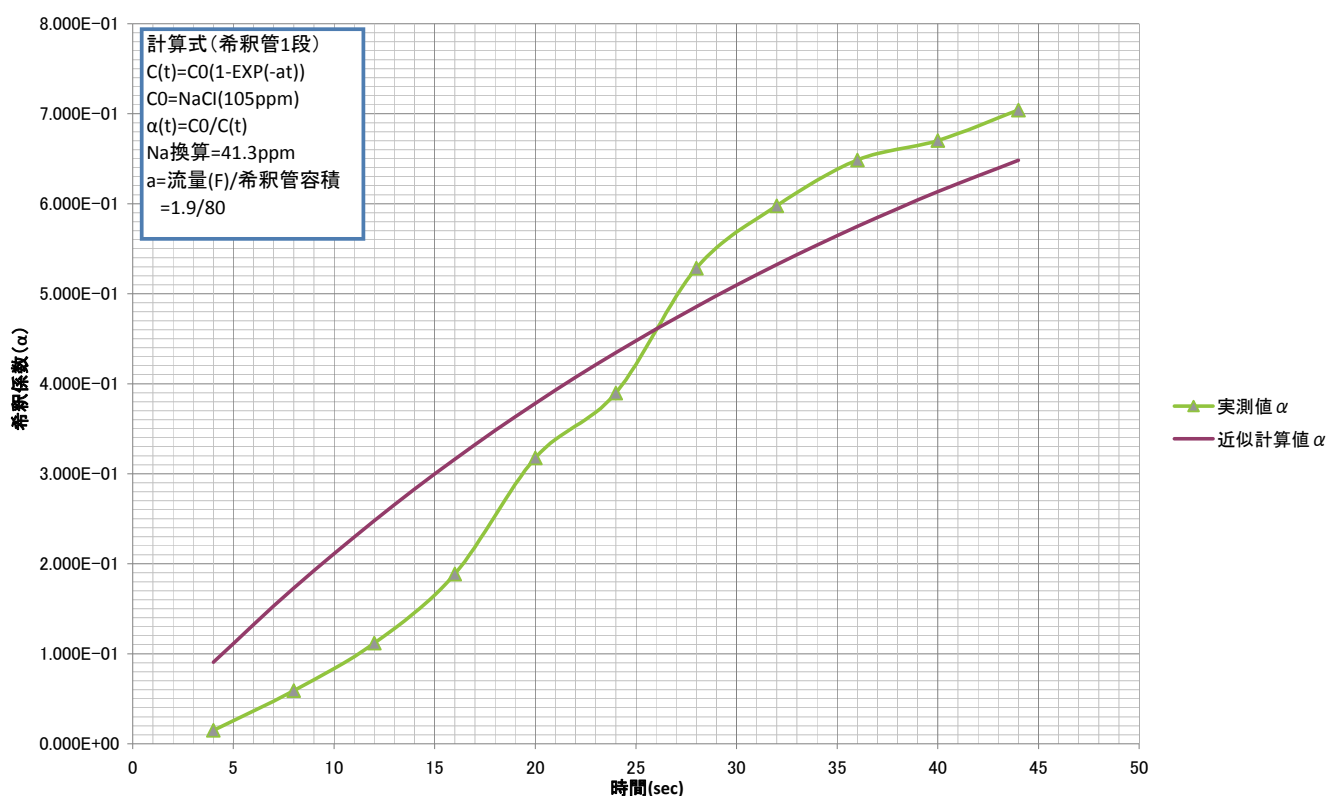


Fig.6-3 1段・流量 1.7cm³/s における実測値と近似計算値との希釈係数比較

Table. 6-3 希釈管1段の流量 1.7 cm³/s データ (Fig. 6-3)

NaCl濃度 (194 ppm)

サンプルNo.	経過時間(s)	希釈係数(α)	近似計算値 α (t)	Na 実測値 (ppm)
1	4	2.628E-03	8.758E-01	2.010E-01
2	8	2.540E-02	1.563E-01	1.943E+00
3	12	6.516E-02	2.251E-01	4.984E+00
4	16	1.120E-01	2.882E-01	8.569E+00
5	20	1.973E-01	3.462E-01	1.509E+01
6	24	2.368E-01	3.995E-01	1.811E+01
7	28	2.995E-01	4.484E-01	2.291E+01
8	32	3.931E-01	4.934E-01	3.007E+01
9	36	4.585E-01	5.347E-01	3.507E+01
10	40	5.228E-01	5.726E-01	3.999E+01
11	104	8.982E-01	8.903E-01	6.870E+01

Fig.6-4 1 段・流量 1.9cm³/s における実測値と近似計算値との希釈係数比較Table. 6-4 希釈管 1 段の流量 1.9 cm³/s データ (Fig. 6-4)

NaCl濃度 (105 ppm)

サンプルNo.	経過時間(s)	希釈係数 (α)	近似計算値 α (t)	Na 実測 値 (ppm)
1	4	1.052E-02	9.063E-02	6.208E-01
2	8	5.895E-01	1.730E-01	2.436E+00
3	12	1.119E-01	2.480E-01	4.626E+00
4	16	1.886E-01	3.161E-01	7.792E+00
5	20	3.176E-01	3.781E-01	1.312E+01
6	24	3.897E-01	4.345E-01	1.610E+01
7	28	5.284E-01	4.857E-01	2.183E+01
8	32	5.976E-01	5.323E-01	2.470E+01
9	36	6.484E-01	5.747E-01	2.679E+01
10	40	6.703E-01	6.133E-01	2.770E+01
11	44	7.041E-01	6.438E-01	2.909E+01

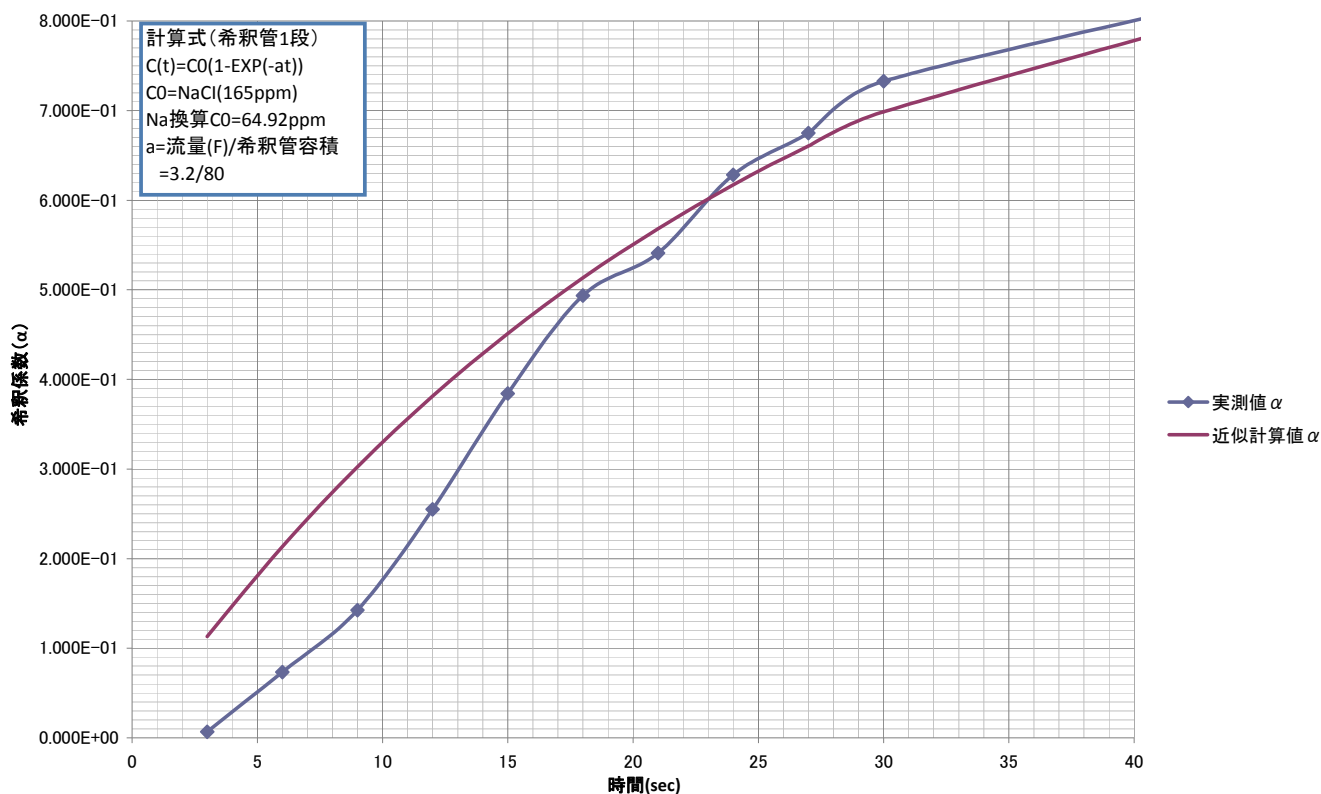


Fig.6-5 1 段・流量 3.2cm³/s における実測値と近似計算値との希釈係数比較

Table. 6-5 希釈管 1 段の流量 3.2 cm³/s データ (Fig. 6-5)

NaCl濃度 (165 ppm)

サンプルNo.	経過時間(s)	希釈係数(α)	近似計算値 α (t)	Na 実測値 (ppm)
1	3	6.811E-03	1.131E-01	4.422E-01
2	6	7.341E-02	2.134E-01	4.766E+00
3	9	1.425E-01	3.023E-01	9.250E+00
4	12	2.550E-01	3.812E-01	1.655E+01
5	15	3.844E-01	4.512E-01	2.495E+01
6	18	4.935E-01	5.132E-01	3.204E+01
7	21	5.411E-01	5.683E-01	3.513E+01
8	24	6.283E-01	6.171E-01	4.079E+01
9	27	6.750E-01	6.604E-01	4.382E+01
10	30	7.330E-01	6.988E-01	4.759E+01
11	53	8.829E-01	8.800E-01	5.732E+01

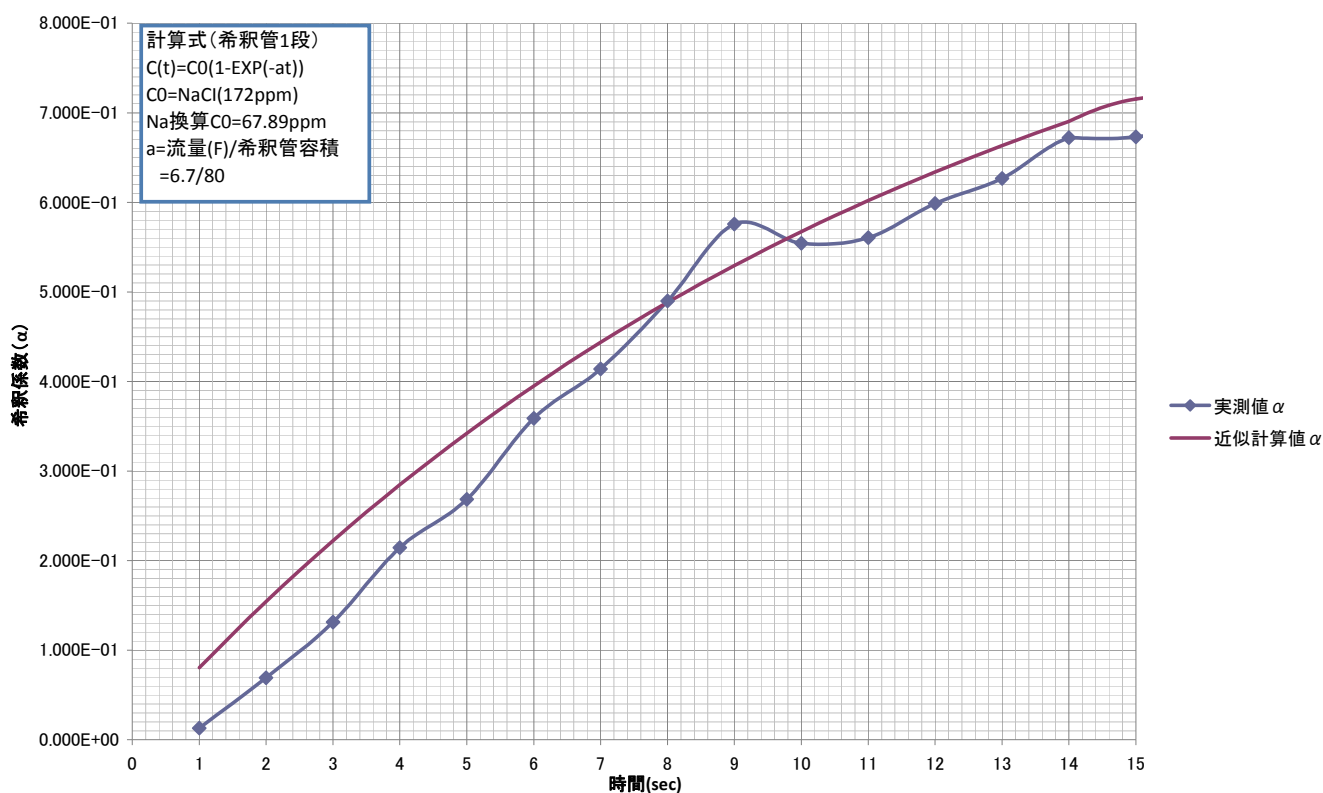


Fig.6-6 1 段・流量 6.7cm³/s における実測値と近似計算値との希釈係数比較

Table. 6-6 希釈管 1 段の流量 6.7 cm³/s データ (Fig. 6-6)

NaCl濃度 (172ppm)

サンプルNo.	経過時間(s)	希釈係数(α)	近似計算値 α(t)	Na 実測値 (ppm)
1	1	1.294E-02	8.034E-02	8.758E-01
2	2	6.924E-02	1.542E-01	4.687E+00
3	3	1.314E-01	2.222E-01	8.896E+00
4	4	2.146E-01	2.847E-01	1.453E+01
5	5	2.683E-01	3.421E-01	1.816E+01
6	6	3.587E-01	3.950E-01	2.428E+01
7	7	4.140E-01	4.436E-01	2.802E+01
8	8	4.898E-01	4.883E-01	3.315E+01
9	9	5.759E-01	5.294E-01	3.899E+01
10	10	5.544E-01	5.672E-01	3.753E+01
11	11	5.606E-01	6.020E-01	3.794E+01
12	12	5.988E-01	6.340E-01	4.053E+01
13	13	6.268E-01	6.634E-01	4.263E+01
14	14	6.721E-01	6.904E-01	4.550E+01
15	15	6.731E-01	7.153E-01	4.556E+01
16	36	8.724E-01	9.510E-01	5.906E+01

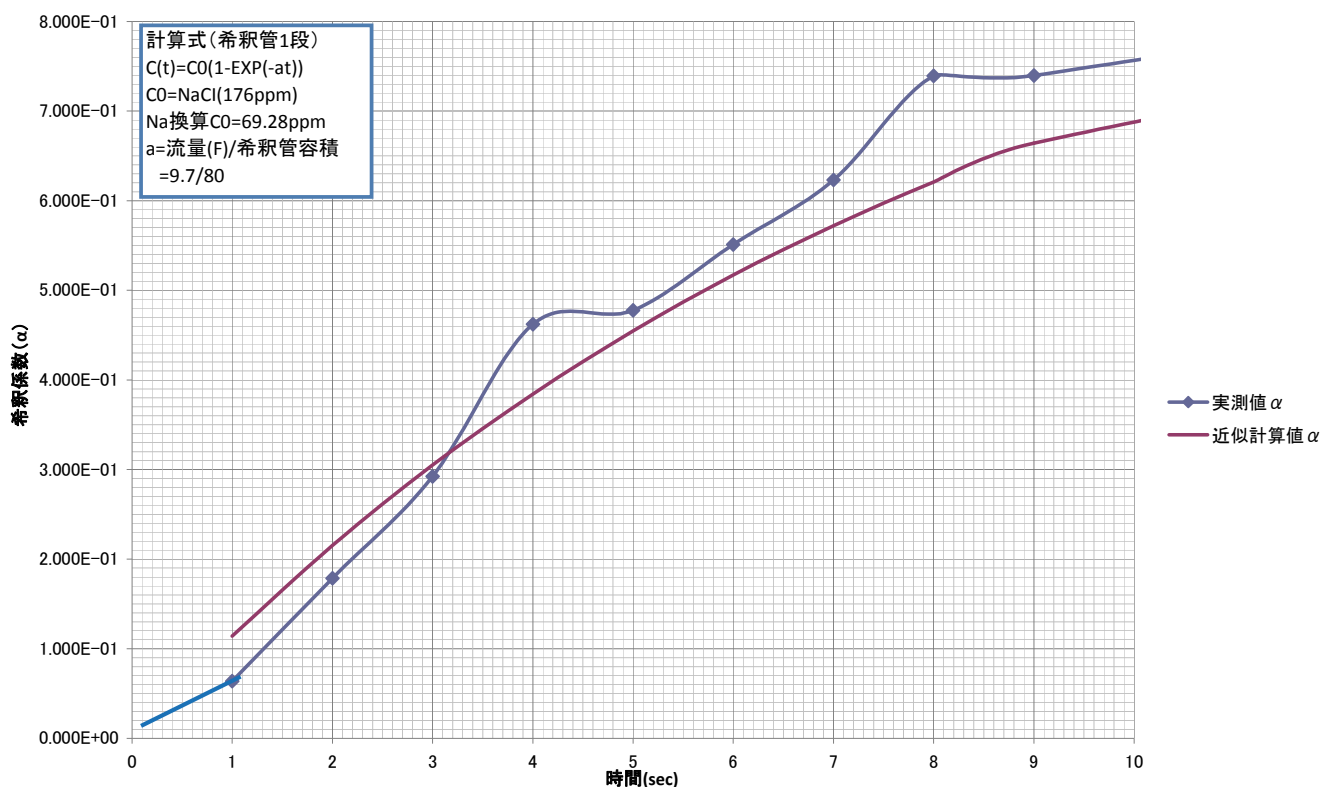


Fig.6-7 1 段・流量 9.7cm³/s における実測値と近似計算値との希釈係数比較

Table. 6-7 希釈管 1 段の流量 9.7 cm³/s データ (Fig. 6-7)

NaCl濃度 (176 ppm)

サンプルNo.	経過時間(s)	希釈係数(α)	近似計算値 α (t)	Na 実測値 (ppm)
1	1	6.387E-02	1.142E+01	4.425E+00
2	2	1.786E-01	2.153E+01	1.237E+01
3	3	2.922E-01	3.049E+01	2.024E+01
4	4	4.621E-01	3.843E+01	3.202E+01
5	5	4.776E-01	4.546E+01	3.309E+01
6	6	5.511E-01	5.169E+01	3.818E+01
7	7	6.230E-01	5.721E+01	4.316E+01
8	8	7.391E-01	6.209E+01	5.121E+01
9	9	7.397E-01	6.642E+01	5.125E+01
10	20	9.365E-01	9.115E+01	6.488E+01

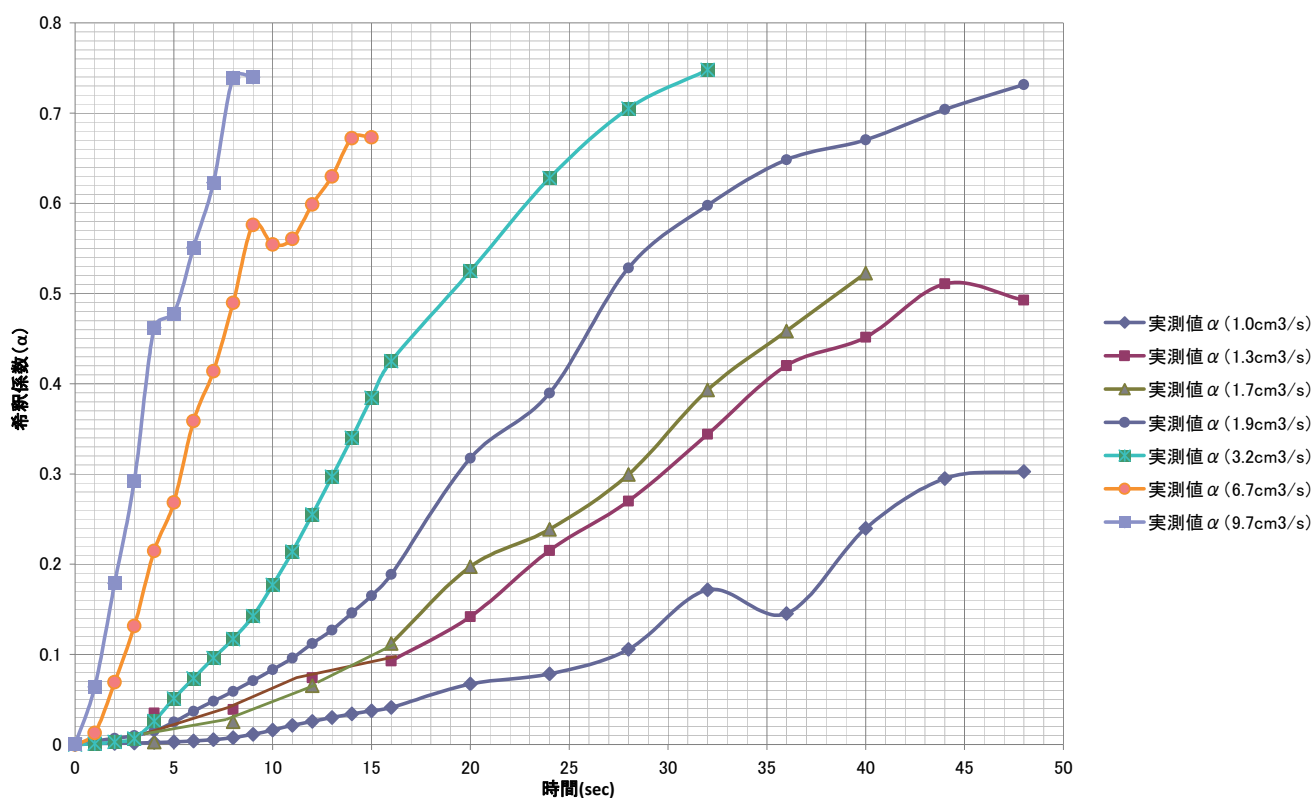
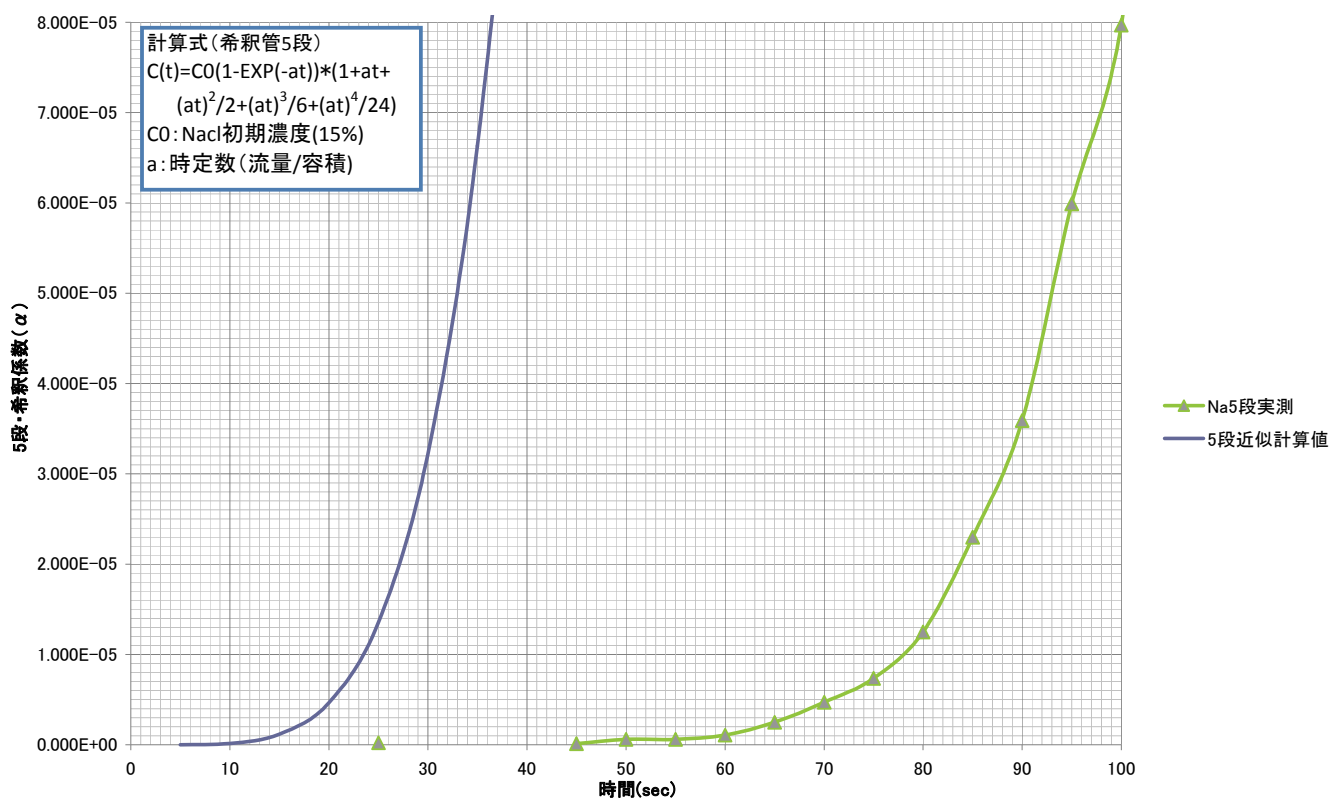


Fig.6-8 1 段・各流量における希釈係数比較

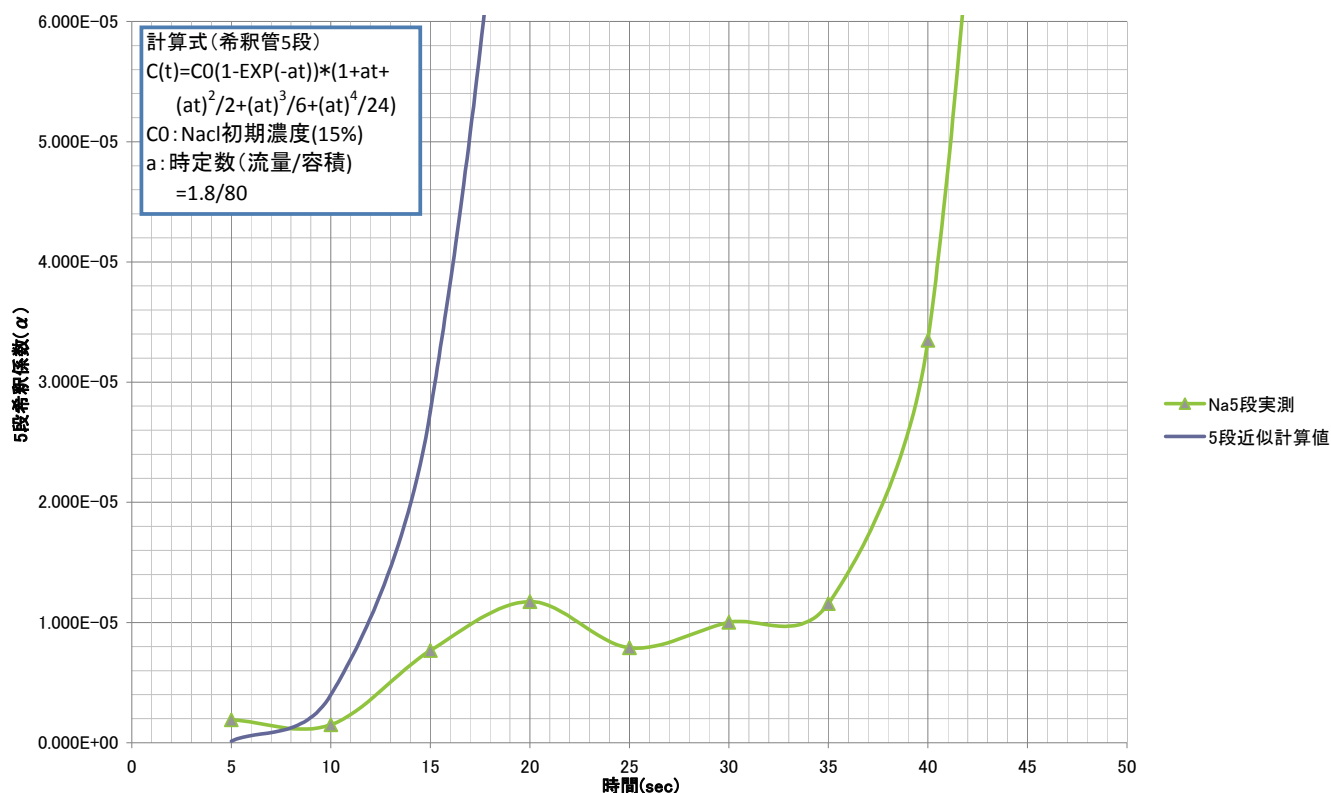
Table. 6-8 各流量における希釈係数比較 (Fig. 6-8)

希釈係数実測値

経過 時間(s)	希釈係数 C0/C(t) (1.0cm³/s)	希釈係数 C0/C(t) (1.3cm³/s)	希釈係数 C0/C(t) (1.7cm³/s)	希釈係数 C0/C(t) (1.9cm³/s)	希釈係数 C0/C(t) (3.2cm³/s)	希釈係数 C0/C(t) (6.7cm³/s)	希釈係数 C0/C(t) (9.7cm³/s)
1	2.160E-03			4.000E-03	1.000E-03	1.294E-02	6.387E-02
2	3.600E-03			7.000E-03	3.000E-03	6.924E-02	1.786E-01
3	5.000E-03			1.000E-02	6.811E-03	1.314E-01	2.922E-01
4	6.400E-03	9.400E-02	2.628E-03	1.502E-02	2.600E-02	2.146E-01	4.621E-01
5	7.790E-03			2.500E-02	5.100E-02	2.683E-01	4.776E-01
6	8.600E-03			3.700E-02	7.341E-02	3.587E-01	5.511E-01
7	9.400E-02			4.800E-02	9.600E-02	4.140E-01	6.230E-01
8	1.020E-02	3.903E-02	2.540E-02	5.895E-02	1.170E-01	4.898E-01	7.391E-01
9	1.100E-02			7.100E-02	1.425E-01	5.760E-01	7.397E-01
10	1.700E-02			8.300E-02	1.770E-01	5.544E-01	
11	2.100E-02			9.600E-02	2.140E-01	5.606E-01	
12	2.581E-02	7.422E-02	6.516E-02	1.119E-01	2.550E-01	5.988E-01	
13	3.000E-02			1.270E-01	2.970E-01	6.298E-01	
14	3.400E-02			1.460E-01	3.400E-01	6.721E-01	
15	3.750E-02			1.650E-01	3.844E-01	6.731E-01	
16	4.109E-02	9.281E-02	1.120E-01	1.886E-01	4.250E-01		
20	6.708E-02	1.418E-01	1.973E-01	3.176E-01	5.250E-01		
24	7.832E-02	2.151E-01	2.386E-01	3.897E-01	6.280E-01		
28	1.056E-01	2.699E-01	2.995E-01	5.284E-01	7.050E-01		
32	1.714E-01	3.439E-01	3.931E-01	5.979E-01	7.480E-01		
36	1.453E-01	4.200E-01	4.584E-01	6.484E-01			
40	2.398E-01	4.516E-01	5.228E-01	6.703E-01			
44	2.950E-01	5.108E-01		7.041E-01			
48	3.026E-01	4.927E-01		7.315E-01			

Fig.6-9 5 段・流量 1cm³/s における実測値と近似計算値との希釈係数比較Table. 6.9 希釈管 5 段の流量 1.0 cm³/s データ (Fig. 6.9)
NaCl濃度 (150,000 ppm)

サンプルNo.	経過時間(s)	希釈係数(α)	近似計算値 α (t)	Na 実測値 (ppm)
1	5	2.300E-07	5.268E-09	9.850E-03
2	10		1.606E-07	
3	15		1.162E-06	
4	20		4.667E-06	
5	25		1.357E-05	
6	30		3.219E-05	
7	35		6.631E-05	
8	40	1.140E-07	1.232E-04	4.900E-03
9	45		2.117E-04	
10	50	6.010E-07	3.418E-04	2.573E-02
11	55	1.080E-06	5.248E-04	4.633E-02
12	60	2.500E-06	7.732E-04	1.070E-01
13	65	4.720E-06	1.100E-03	2.019E-01
14	70	7.350E-06	1.520E-03	3.147E-01
15	75	1.250E-05	2.046E-03	5.367E-01
16	80	2.300E-05	2.695E-03	9.861E-01
17	85	3.590E-05	3.481E-03	1.535E+00
18	90	5.990E-05	4.419E-03	2.564E+00
19	95	7.970E-05	5.525E-03	3.409E+00
20	100	1.260E-04	6.812E-03	5.411E+00
21	105	1.660E-04	8.296E-03	7.098E+00
22	110	2.510E-04	9.989E-03	1.073E+01
23	115	3.490E-04	1.191E-02	1.495E+01
24	120	4.940E-04	1.406E-02	2.114E+01
25	125	7.530E-04	1.646E-02	3.221E+01
26	130	9.260E-04	1.911E-02	3.965E+01
27	135	1.403E-03	2.203E-02	6.005E+01
28	140	1.729E-03	2.523E-02	7.400E+01

Fig.6-10 5 段・流量 1.8cm³/s における実測値と近似計算値との希釈係数比較Table. 6-10 希釈管 5 段の流量 1.8 cm³/s データ (Fig. 6-10)
NaCl濃度 (51, 684 ppm)

サンプルNo.	経過時間(s)	希釈係数(α)	近似計算値 α (t)	Na 濃度実測 (ppm)
1	5	1.918E-06	1.367E-07	1.000E-01
2	10	1.502E-06	3.986E-06	7.83E-02
3	15	7.673E-06	2.758E-05	4.00E-01
4	20	1.175E-05	1.059E-04	6.127E-01
5	25	7.905E-06	2.946E-04	4.121E-01
6	30	1.001E-05	6.685E-04	5.221E-01
7	35	1.157E-05	1.318E-03	6.033E-01
8	40	3.347E-05	2.344E-03	1.745E+00
9	45	1.310E-04	3.855E-03	6.829E+00
10	50	2.573E-04	5.960E-03	1.341E+00
11	55	5.909E-04	8.765E-03	3.080E+01
12	60	1.075E-03	1.237E-02	5.606E+01
13	65	1.936E-03	1.687E-02	1.009E+02
14	70	3.431E-03	2.233E-02	1.789E+02
15	75	5.878E-03	2.883E-02	3.064E+02
16	80	9.037E-03	3.641E-02	4.711E+02
17	85	1.350E-02	4.510E-02	7.039E+02
18	90	2.031E-02	5.494E-02	1.059E+03
19	95	3.007E-02	6.591E-02	1.568E+03

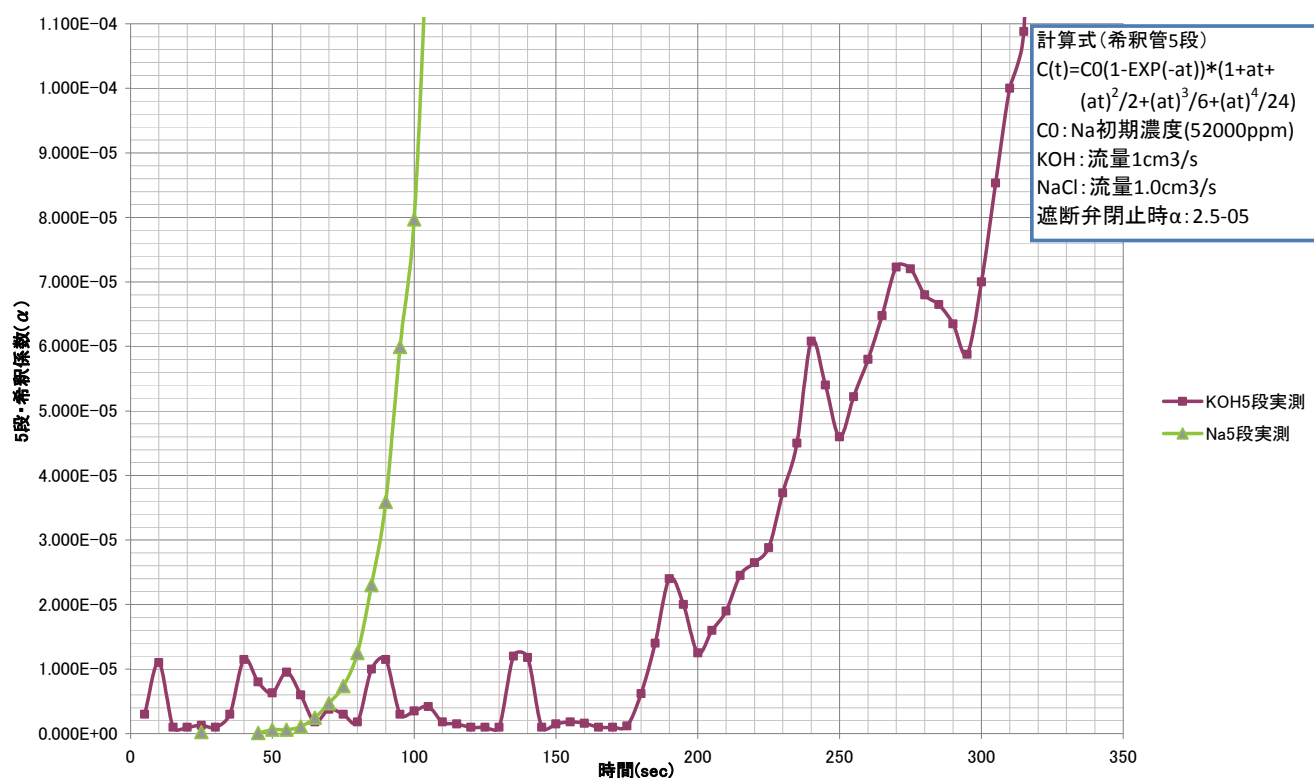
Fig.6-11 5段・流量 1 cm³/s における希釈係数比較 NaCl と KOH の比較

Table. 6-11 5 段の希釈係数 NaCl と KOH の比較

1.0cm³/s データ (Fig. 6-11)

サンプルNo.	経過時間 (s)	KOH 5 段希釈係数	Na 5 段希釈係数
1	5	3.000E-06	2.300E-07
2	10	1.100E-05	
3	15	1.000E-06	
4	20	1.000E-06	
5	25	1.300E-06	
6	30	1.000E-06	
7	35	3.000E-06	
8	40	1.150E-05	1.140E-07
9	45	8.000E-06	
10	50	6.300E-06	6.010E-07
11	55	9.500E-06	1.080E-06
12	60	6.000E-06	2.500E-06
13	65	1.800E-06	4.720E-06
14	70	3.800E-06	7.350E-06
15	75	3.000E-06	1.250E-05
16	80	1.800E-06	2.300E-05
17	85	1.000E-05	3.590E-05
18	90	1.150E-05	5.990E-05
19	95	3.000E-06	7.970E-05
20	100	3.500E-06	1.260E-04

21	105	4.200E-06	1.660E-04
22	110	1.800E-06	2.510E-04
23	115	1.500E-06	3.490E-04
24	120	1.000E-06	4.940E-04
25	125	1.000E-06	7.530E-04
26	130	1.000E-06	9.260E-04
27	135	1.200E-05	1.403E-03
28	140	1.180E-05	1.729E-03
29	145	1.000E-06	
30	150	1.500E-06	
31	155	1.800E-06	
32	160	1.600E-06	5.404E-03
33	165	1.000E-06	
34	170	1.000E-06	
35	175	1.200E-06	
36	180	6.200E-06	
37	185	1.400E-05	1.654E-02
38	190	2.400E-05	
39	195	2.000E-05	
40	200	1.250E-05	
41	205	1.600E-05	
42	210	1.900E-05	4.104E-02
43	215	2.450E-05	
44	220	2.650E-05	
45	225	2.880E-05	
46	230	3.730E-05	
47	235	4.500E-05	
48	240	6.080E-05	
49	245	5.400E-05	
50	250	4.600E-05	
51	255	5.220E-05	8.765E-03
52	260	5.800E-05	1.629E-01
53	265	6.480E-05	
54	270	7.230E-05	
55	275	7.200E-05	
56	280	6.800E-05	
57	285	6.650E-05	
58	290	6.350E-05	
59	295	5.880E-05	
60	300	7.000E-05	
61	305	8.530E-05	
62	310	1.000E-04	3.424E-01
63	315	1.088E-04	
64	320	1.740E-04	

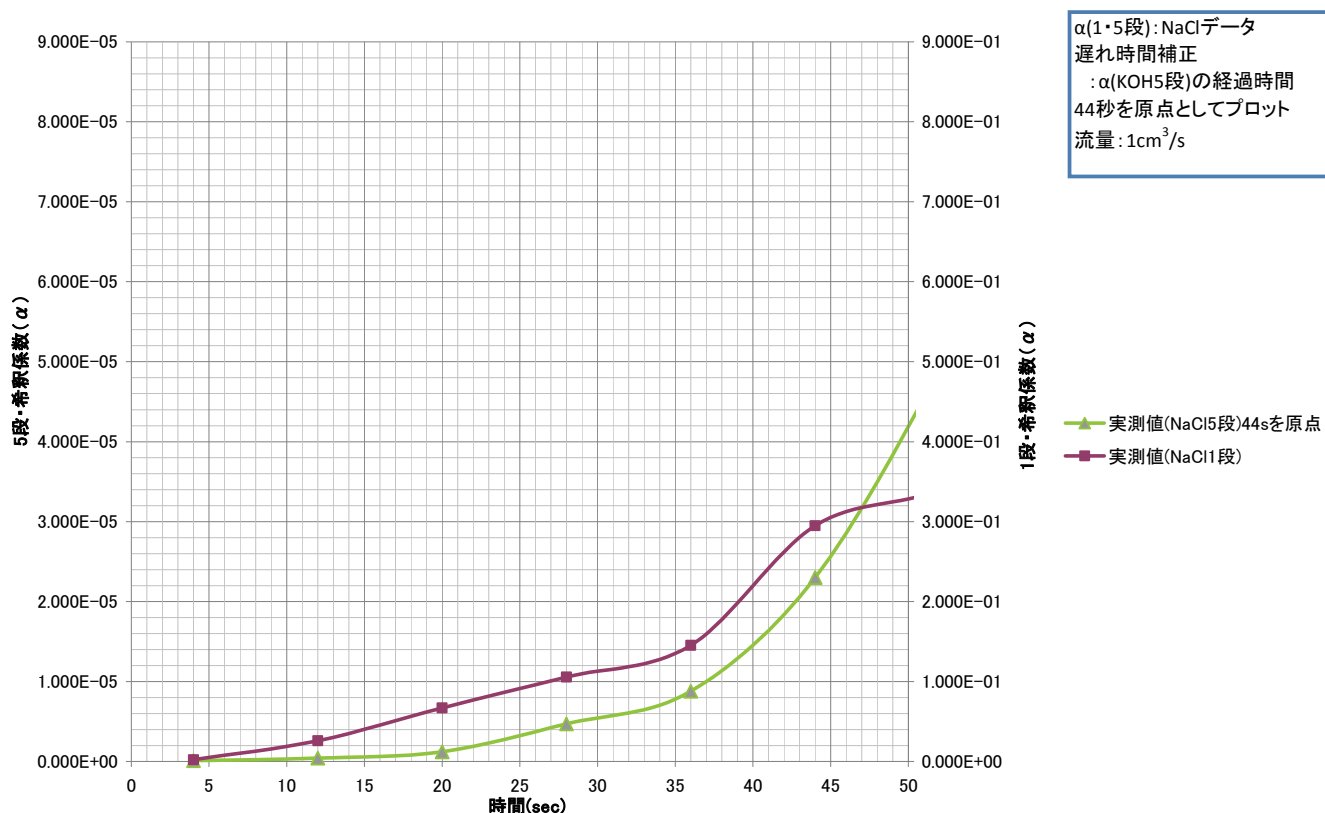


Fig.7-1 希釈管 1 段と 5 段における希釈係数の比較(流量 1cm³/s)

Table. 7-1 希釈管 1 段と 5 段における希釈係数の比較
流量 1.0 cm³/s データ (Fig. 7-1)

サンプル No.	経過 時間 (s)	希釈係数 (NaCl 1 段)	希釈係数 (NaCl 5 段) ※1
1	4	2.156E-03	1.145E-07
2	12	2.581E-02	4.200E-07
3	20	6.708E-02	1.200E-06
4	28	1.056E-01	4.700E-06
5	36	1.453E-01	8.800E-06
6	44	2.949E-01	2.300E-05
7	52	3.401E-01	4.900E-05
8	60	4.278E-01	8.000E-05
9	68	4.539E-01	1.600E-04
10	76	6.486E-01	2.850E-04
11	84		4.940E-04
12	92		8.500E-04
13	100		1.470E-03

※1: 経過時間 44 秒を原点としてプロット

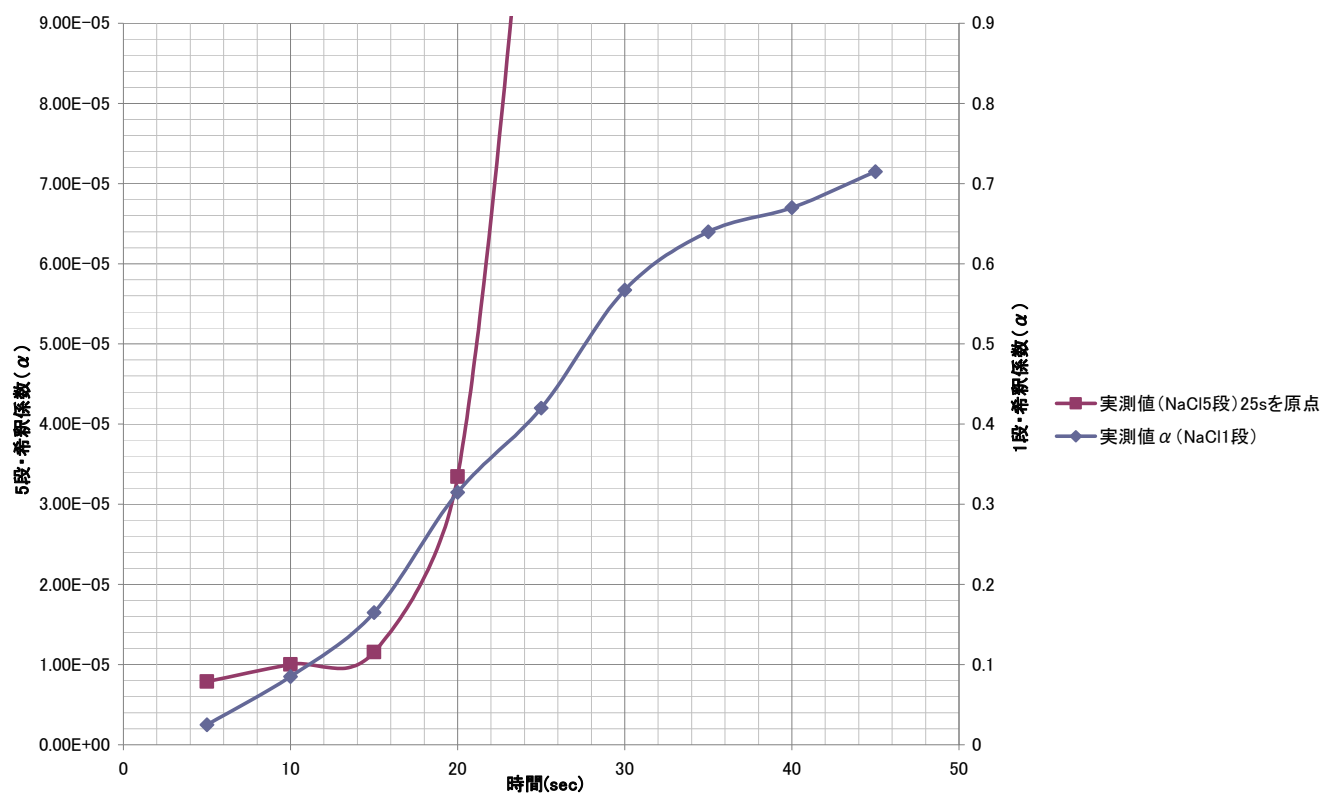


Fig.7-2 希釈管 1 段と 5 段における希釈係数の比較(流量 2cm³/s)

Table. 7-2 希釈管 1 段と 5 段における希釈係数の比較

流量 2.0 cm³/s データ (Fig. 7-2)

サンプル No.	経過 時間 (s)	希釈係数 (NaCl 1 段)	希釈係数 (NaCl 5 段) ※2
1	5	2.50E-02	7.90E-06
2	10	8.50E-02	1.00E-05
3	15	1.65E-01	1.16E-05
4	20	3.15E-01	3.35E-05
5	25	4.20E-01	1.31E-04
6	30	5.67E-01	2.57E-04
7	35	6.40E-01	5.91E-04
8	40	6.70E-01	1.08E-04
9	45	7.15E-01	1.94E-03
10	50		3.43E-03
11	55		5.88E-03
12	60		9.04E-03
13	65		1.35E-03
14	70		2.03E-02
15	75		3.01E-02

※2：経過時間 25 秒を原点としてプロット

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	数メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
電界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比誘電率 ^(b)	(数字の) 1	1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
光照射度	ルーメン	lm		K
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	cd sr ^(c)	m ² cd s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

- (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎平方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表面電位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁻¹ m ² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ⁻² m ² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm ²)2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St =1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトリ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ⁷ /4π)A m ⁻¹

- (c) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ≐1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J (「15℃」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

