

2.2 ろ過器の性能評価に関する実験

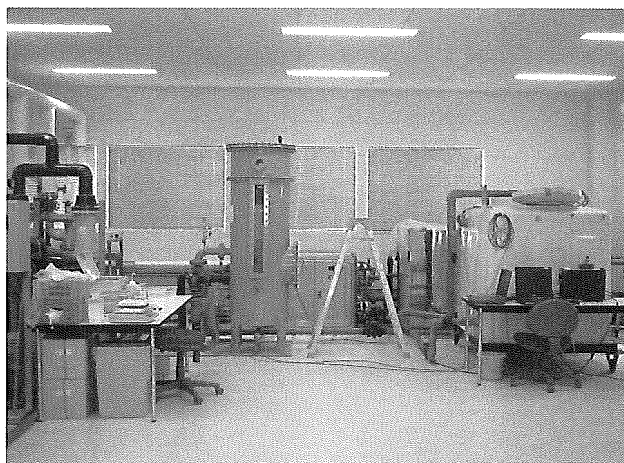
2.2.1 実験の目的および方法

(1) 実験の目的

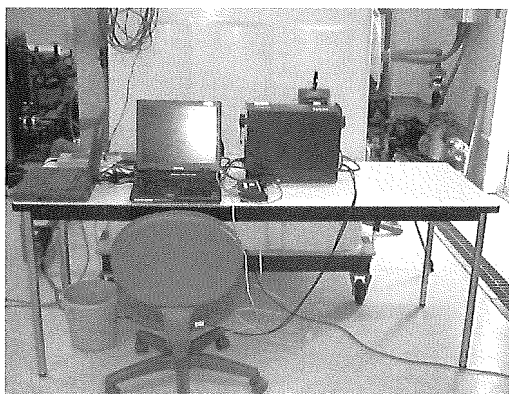
ろ過器は種々の条件によりろ過・逆洗能力が変化することが分かっており、砂式ろ過器に対する水温 25℃におけるろ過速度及びろ過層の厚みについての影響は、空気調和・衛生工学安全委員会「浴場施設におけるレジオネラ属菌対策小委員会」で実施した実験結果が報告されている¹⁾。

本実験では、報告された条件下で同等の実験を行い、条件因子の一つである温度を変えることでろ過器の性能を検証した。又、性能実験の検証を行うにあたって、以下の2つの項目について重点的に検証を行う。

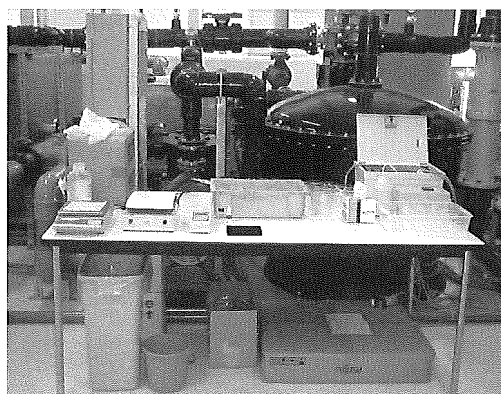
- 循環ろ過におけるろ過器の性能
- ろ過器の逆洗性能



実験装置



実験風景

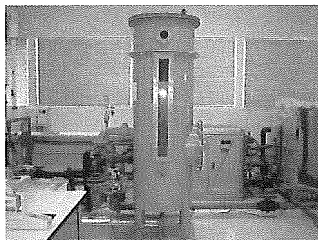


実験風景

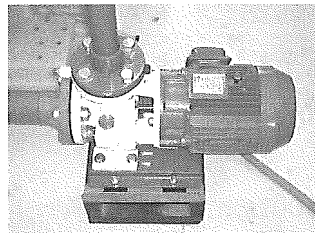
(2) 実験用機器

実験に用いた主な機器の仕様を以下に示す。

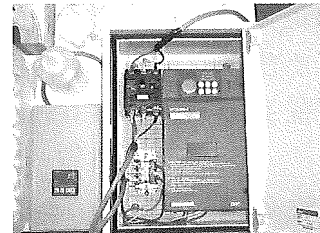
1. ろ過器 : 胴径 600mm, 胴高さ 1800mm, 観察窓付鋼板製 砂式ろ過器
2. 循環ポンプ : 型式 50×40FSFDN62.2A, 2.2kw エバラ製
3. インバータ : 型式 FR-F720-3.7k 三菱電機製
4. 電磁流量計 : 型式 ADMAG, 口径 50A 横河製
5. 超音波流量計 : 型式 FLB1002 富士電気製
6. 圧力センサー : 型式 GC61, 長野計器製
7. 温度センサー : 型式 S1-K 東邦電子製
8. 濁度計 : 型式 2100P HACK 社製
9. 熱交換器 : 型式 S8040 ショウエイ製
10. ボイラ : 型式 ST600K エバラボイラ製
11. 原水タンク : 2000×1000×1200H
12. 排水タンク : 1000×1000×1000H
13. 補給水タンク : 5000×2000×2000H



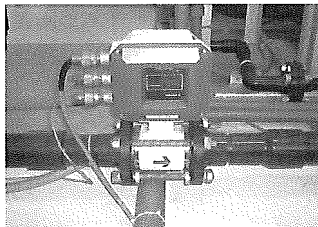
ろ過器



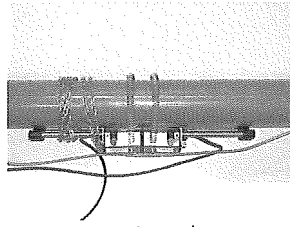
ポンプ



インバータ



電磁流量計

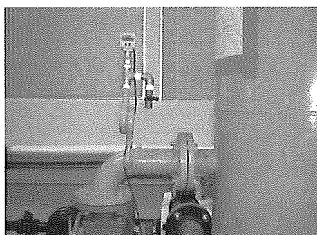


センサー部



本体部

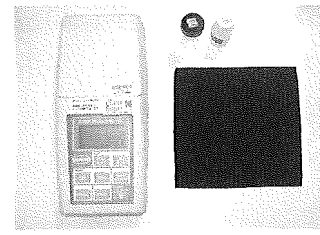
超音波流量計



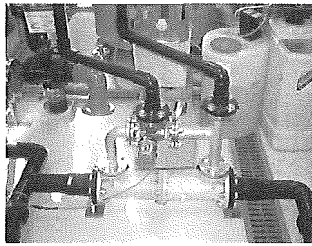
圧力センサー



温度センサー



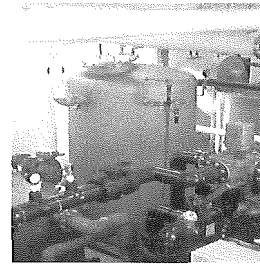
濁度計



熱交換器



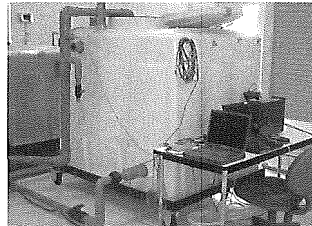
本体
ボイラ



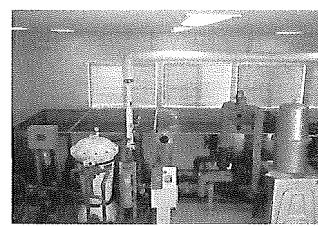
貯湯タンク



原水タンク



排水タンク



補給水タンク

(3) ろ過層および支持層

支持層及びろ過層の各粒径と仕様を以下に示す。

1. 支持層 1：粒径 7～13mm, 厚さ 200mm, 商品名スーパーシリカ s No.5
日本原料製
2. 支持層 2：粒径 3.5～7mm, 厚さ 200mm, 商品名スーパーシリカ s No.4
日本原料製
3. 支持層 3：粒径 0.9mm, 厚さ 150mm, 商品名スーパーシリカ s No.3
日本原料製
4. ろ過層：粒径 0.6mm, 厚さ 300～600mm, スーパーシリカ s No.2
日本原料製

(4) 実験方法

濁度 7NTU (濁度約 5 度) 温度 40℃ に保った試験水を、ろ過循環及び逆洗時の流量 (LV 値) とろ過層厚を変え、下記の条件下によりろ過器の浄化性能を検証した。

実験条件

- LV 値：下記の 5 種類とする。
20m/h (95L/min) , 30m/h (140L/min) , 40m/h (190L/min) ,
50m/h (240L/min) , 60m/h (285L/min)
- ろ過層厚：300, 400, 500, 600mm の 4 種類とする。

ろ過性能の判定は、ろ過器への流入水とろ過器からの流出水の濁度を計測／比較することで行った。

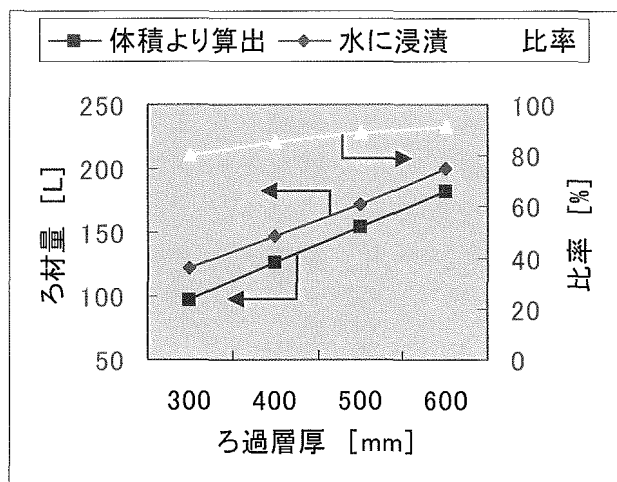
(5) ろ過層厚の決定方法

ろ過層厚 300, 400, 500, 600mm を基準に以下の式から体積より算出したろ材量と実際にろ材を水に浸漬させたろ材量との量的比較を行った結果を図 2.2.1 に示す。

$$\text{ろ材量(L)} = \frac{\text{ろ過器半径(mm)}^2 \times \pi \times \text{ろ過層厚(mm)}}{10^6} + 12.5(\text{L})$$

なお、上式の 12.5L はろ過器の胴体に設けられている点検口部分の体積である。ろ過層厚はろ過循環を 30 分間行い、LV20 で逆洗を 5 分間行った。その後、ポンプを停止し静止状態でろ過材の厚みを計測することで決定した。

ろ材は、どの層厚に関しても水に浸漬したろ材がろ過器の体積より算出した計算値より多く積量されている。図中に示した比率は、水に浸漬したろ材量に対するろ過器体積よりで算出したろ材量の割合を次式によって算出した。



$$\text{比率} = \frac{\text{体積計算より算出したろ材量}}{\text{水に浸漬したろ材量}}$$

体積計算より算出したろ材量は、水に浸漬したものに比べ 1~2 割程度少なく、これを体積計算で使用した上式より算出すると、18L(64mm)~24L(86mm)少なくなる。

(6) 実験手順

実験手順を以下に示す。

1) ろ過層の洗浄を下記の手順で行う。

- ① LV40 で逆洗を 10 分間行う
- ② LV30 で逆洗を 5 分間行う
- ③ LV20 で逆洗を 5 分間行う
- ④ 逆洗完了後逆洗水が入口濁度 > 出口濁度であることを確認
- ⑤ 五方弁を洗浄工程として、出口圧力 0.05Mpa、LV30 で 5 分間洗浄

図 2.2.1 体積計算及び水に浸漬したろ材量の比較

2) 逆洗濁度測定 (カオリン無添加)

- ① ろ過器を運転し循環水 (試験水) を 40℃ に昇温する
- ② 逆洗運転開始、LV 値 20,30,40 で逆洗し、各 LV 値において 1 分間隔で 12 回採水し、測定する。

ただし、観察窓より内部を観察して、支持層とろ過層が混合することの無いように注意し、混合する直前で LV 値を調整する。

- 3) 原水タンク内試験水の濁度調整
 - ① 原水タンクに試験水 1L を貯水し、ろ過循環を行って水温を 40℃ に昇温する
 - ② 原水タンク内の試験水にカオリンを添加して、十分攪拌し、濃度 7NTU (濁度 5) に調整するとともに、ろ過器出口圧力を 0.05Mpa に調整する。
- 4) ろ過循環における濁度測定
 - ① 運転開始後 1 分後にろ過器入口および出口で採水し、測定する。
 - ② 以後経過時間 60 分までは 5 分間隔で、60 分以後は 10 分間隔の測定を行う。
 - ③ 上記測定を LV20,30,40,50,60 において行う。
- 5) 装置の洗浄
 - ① 原水タンク内の試験水を完全に排水する。
 - ② ろ過器五方弁を排水モードに設定して、5 分間運転し、ろ過器および配管内の洗浄を行う。
 - ③ 原水タンク内、配管内など実験装置内循環水の濁度が 0.5NTU であることを確認する。
- 6) 逆洗時における濁度測定
 - ① 原水タンクに試験水 1L を貯水し、ろ過循環を行って水温を 40℃ に昇温する
 - ② 原水タンク内の試験水にカオリンを添加して、十分攪拌し、濃度 7NTU (濁度 5) に調整するとともに、ろ過器出口圧力を 0.05Mpa に調整する。
 - ③ ろ過運転を 100 分間行い、原水をろ過する。
 - ④ 逆洗運転を開始し、1 分経過後に採水測定し、移行 1 分間隔で 12 分まで測定する。
 - ⑤ 上記測定を LV20,30,40 において行う。
 - ⑥ ただし 2) 同様に、支持層とろ過層が混合することの無いように注意し、混合する直前で LV 値を調整する。

(7) 実験装置

実験装置の系統図を次頁に示す。

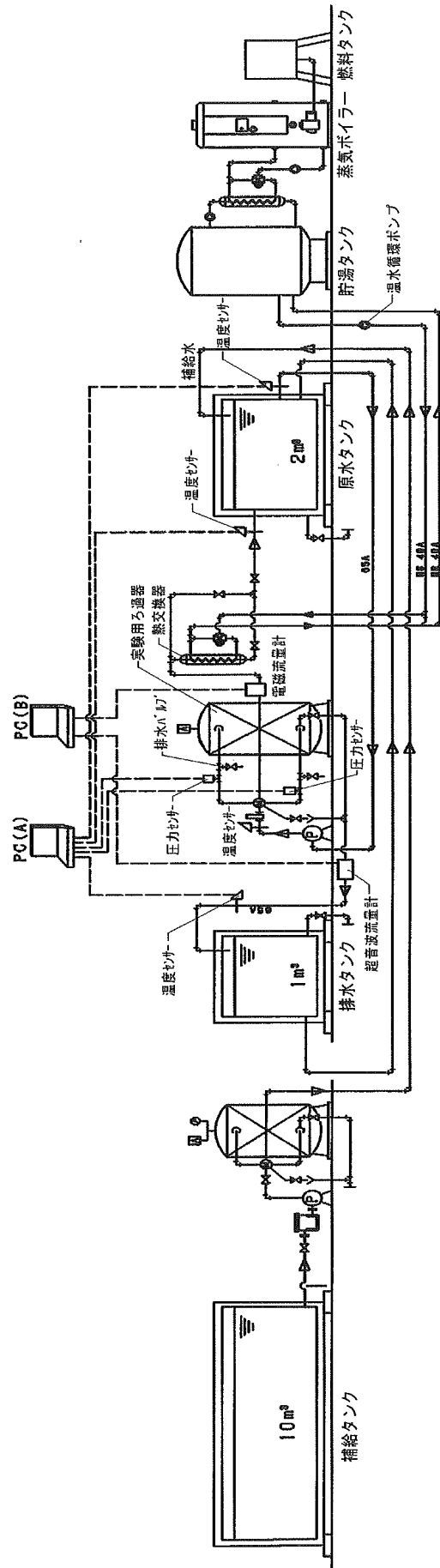
2.2.2 循環ろ過時におけるろ過性能実験

(1) 濁度残留率の算出

ろ過層厚を 300、400、500、600mm 4 種類として、各ろ過層厚において連続 100 分間循環ろ過して実験手順に従って測定した濁度変化測定値を基に、実験開始後概ね 1 回転 (以下ターン) 終了時の測定値から、その後 4 ターン終了時の測定値までの範囲について近似曲線を設定した結果を図 2.2.2~2.2.5 に示す。

上記近似曲線を利用してろ過器入口基準濁度を 4.0NTU とし、各種設定条件におけるターン数別の原水タンク内の濁度残留率を図 2.2.6 (ろ過層厚基準) と図 2.2.7 (LV 別基準) に示す。濁度残留率は、以下の式により算出した。

$$\text{濁度残留率} = \frac{(\text{ろ過器出口濁度} - \text{原水濁度})}{(\text{ろ過器入口基準濁度} - \text{原水濁度})}$$



実験装置の系統図

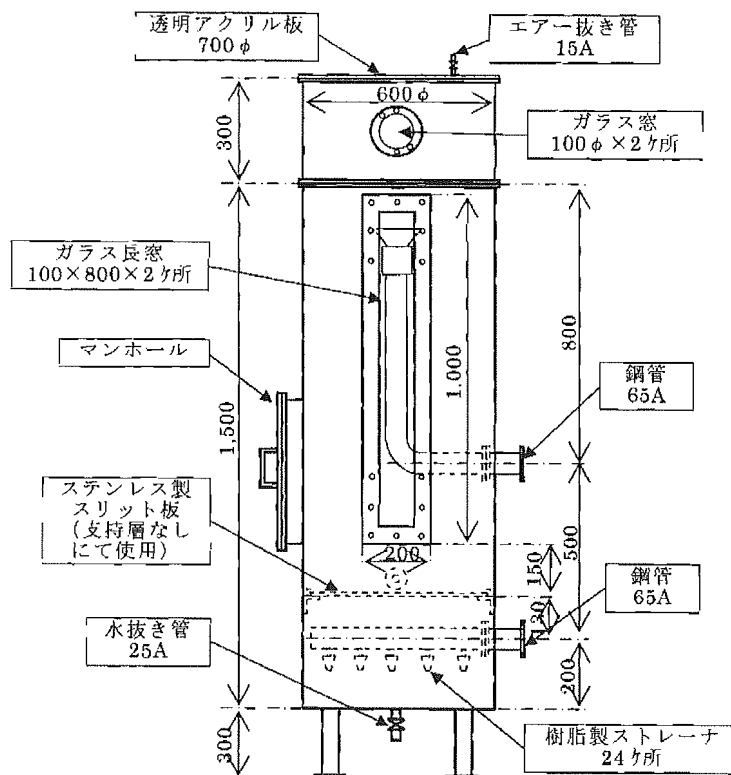
(2) ろ過層厚およびLV値の差異による濁度残留率

- ① LV 値別の濁度残留率を比較すると、LV が遅いほど濁度残留率が低い値を示している。(図 2.2.6)
- ② ろ過層厚別で濁度残留率を比較すると、ろ過層厚さ 300~500 mm の場合はどの LV 値においてもろ過層厚による差異は見られないが、ろ過層厚 600 mm の場合には、濁度残留率が他に比べて低い値を示す傾向を示しており、この傾向は LV が早いほど顕著となっている。
- ③ 濁度変化の挙動に関しては、初期時の濁度変化が最も大きく、時間が経過するにつれてこの濁度変化は小さくなる。従って、比較的初期時の濁度減少量でろ過器のろ過性能は決定される。
- ④ 入口・出口の初期濁度差を LV 値別に比較すると LV 値が低い程、入口・出口間の濁度差は大きい。
- ⑤ ろ過層厚・LV 値に関係なく、濁度残留率はターン数が増加すると共に低下している。

(3) 水温の変化に伴う濁度残留率

本実験は水温 40℃ に維持して行ったが、水温 25℃ による実験（空気調和・衛生工学会実験）と比較した結果を図 2.2.8 に示す。

水温 25℃ と比較して、どの LV においても水温 40℃ における濁度残留率のほうが低い値を示している。また、ろ過層厚さに濁度残留率も水温 40℃ の法が低い値を示しており、ろ過層厚 600 mm の場合が最も顕著に表している。



実験用ろ過器

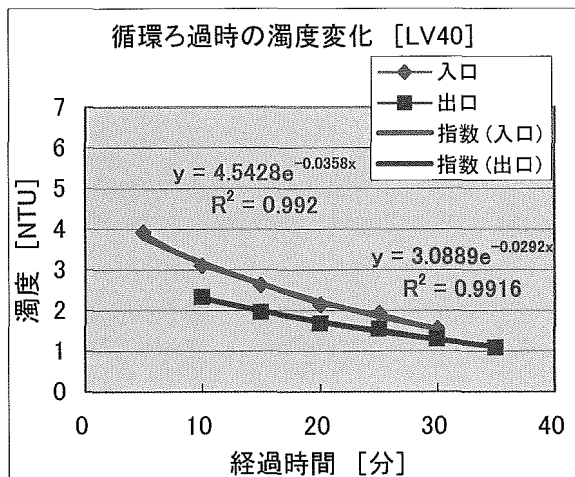
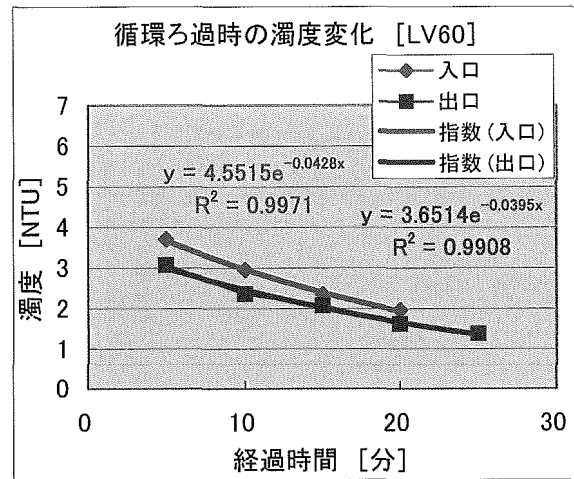
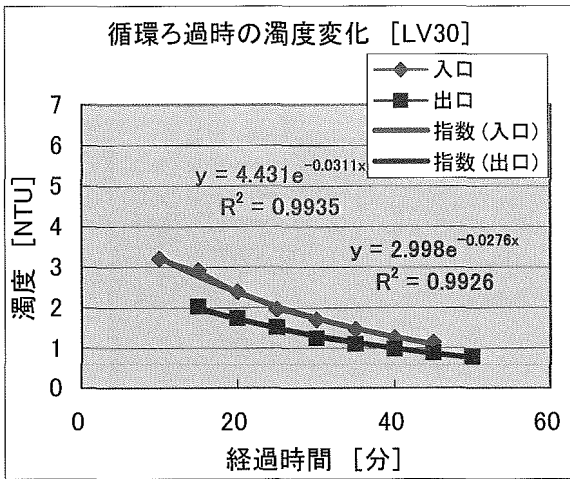
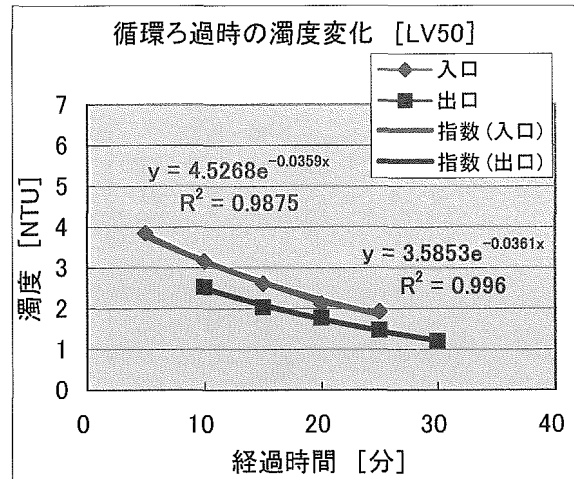
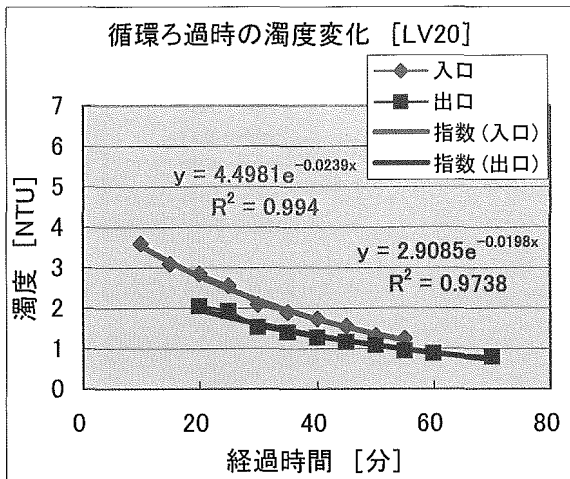


図2.2.2 ろ過層 300mm [40℃]循環ろ過時の濁度変化

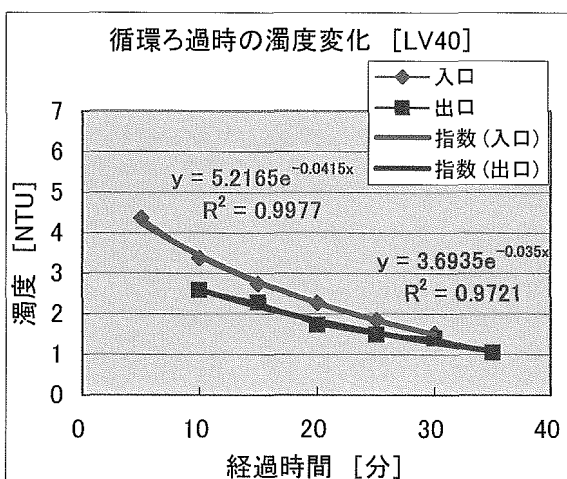
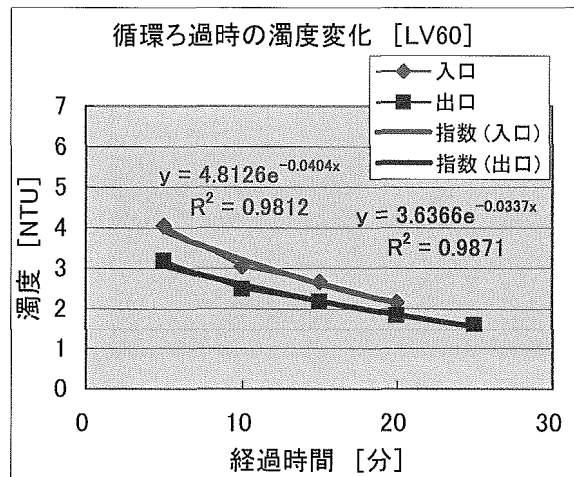
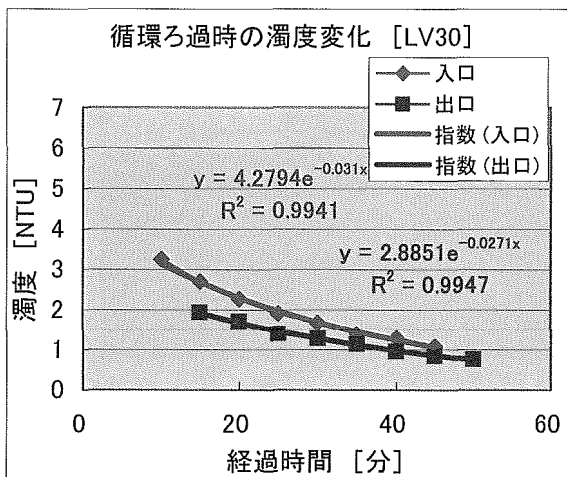
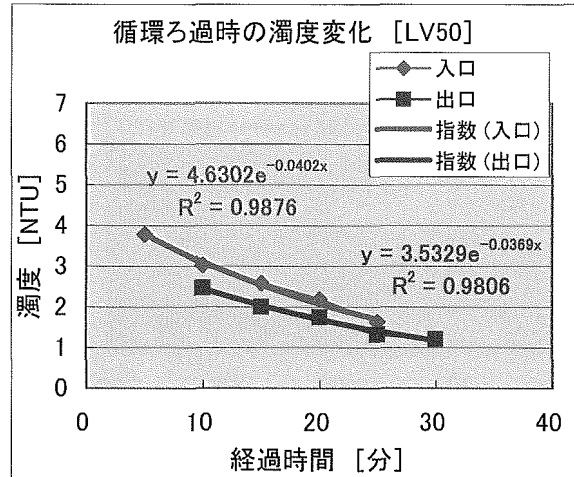
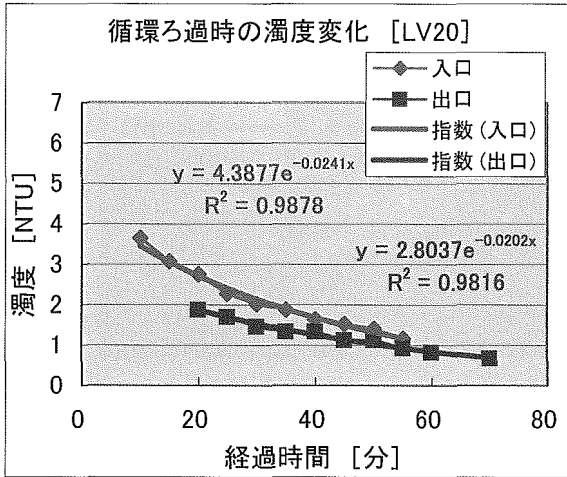


図2. 2. 3 ろ過層 400mm [40℃]循環ろ過時の濁度変化

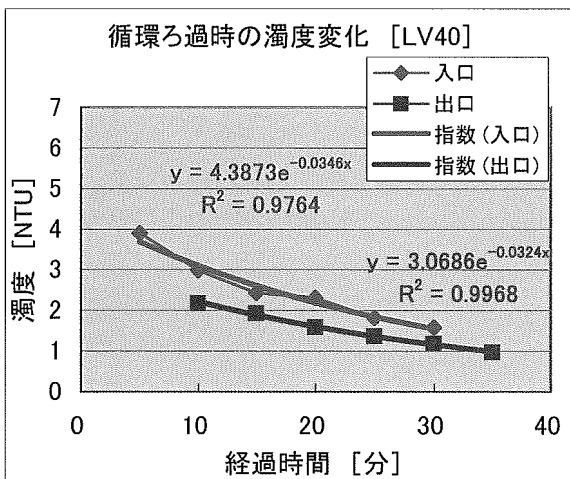
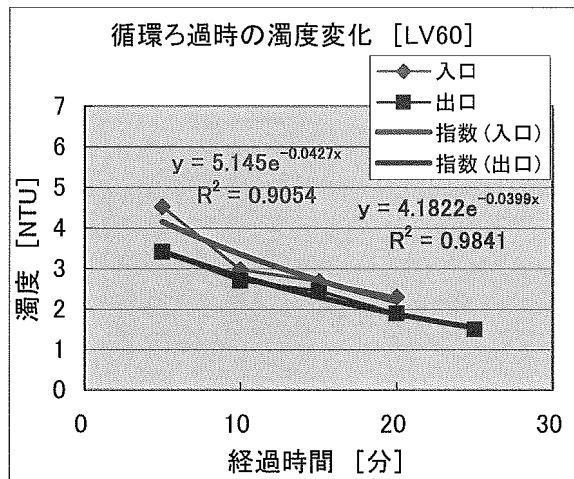
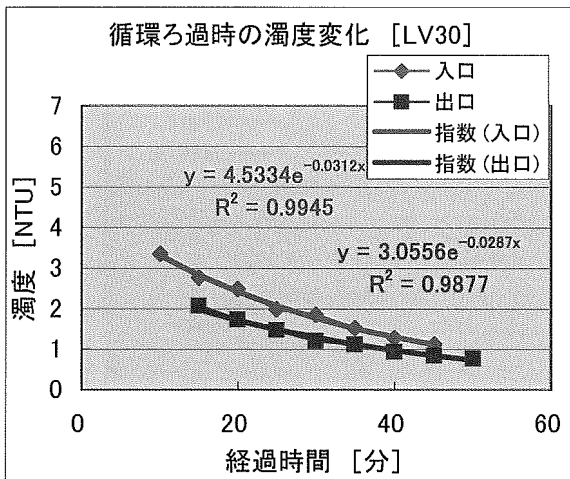
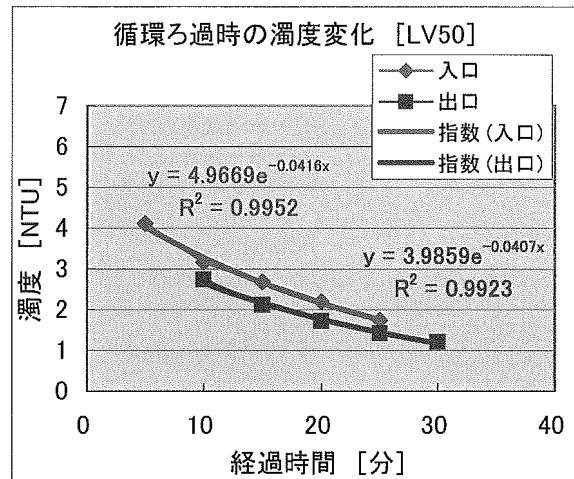
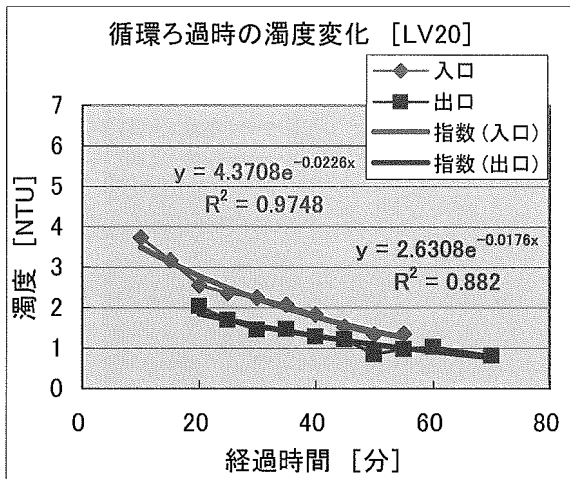


図2.2.4 ろ過層 500mm [40℃]循環ろ過時の濁度変化

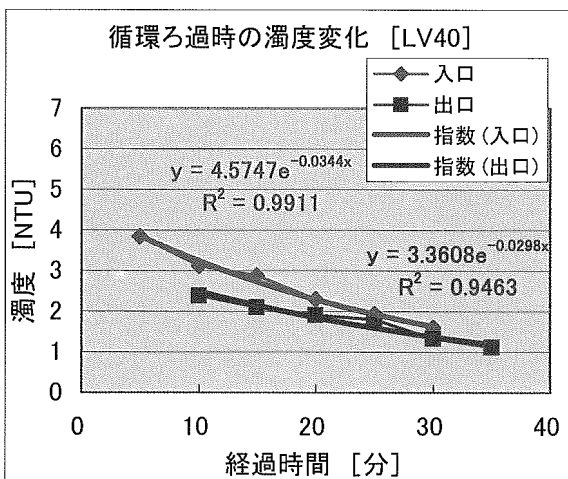
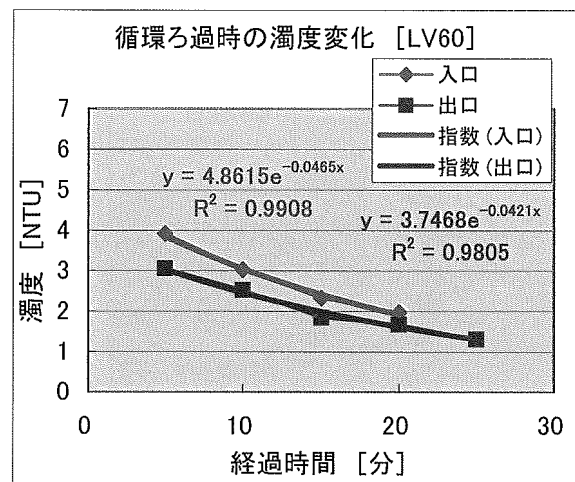
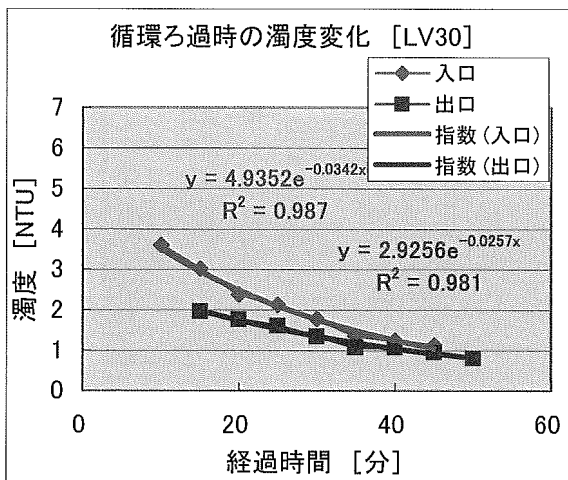
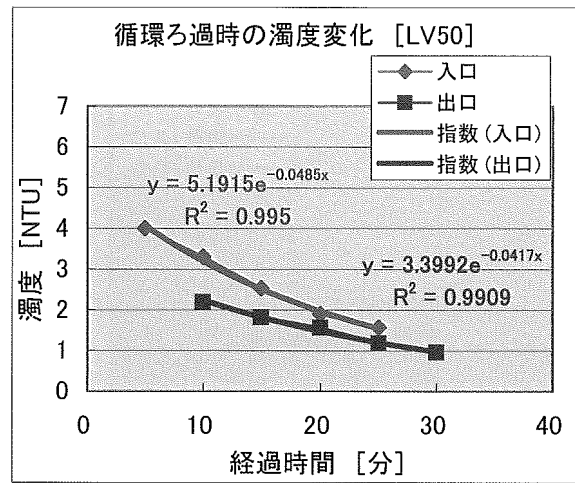
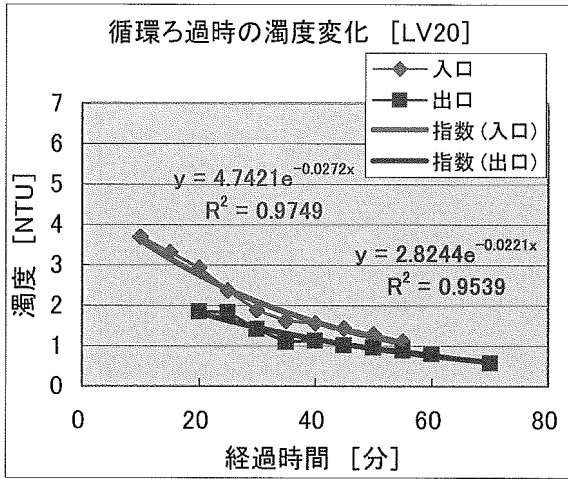


図2.2.5 ろ過層 600mm [40℃]循環ろ過時の濁度変化

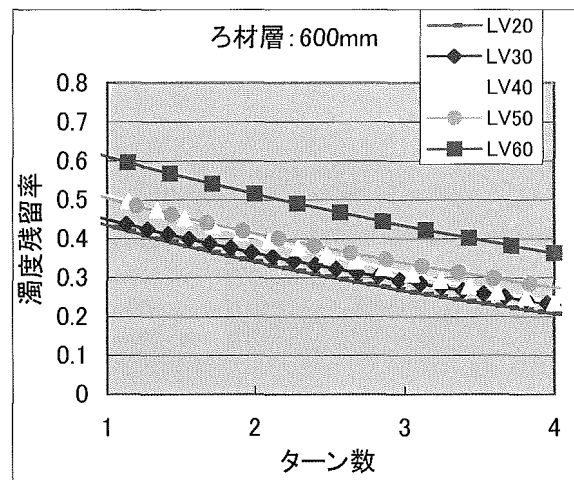
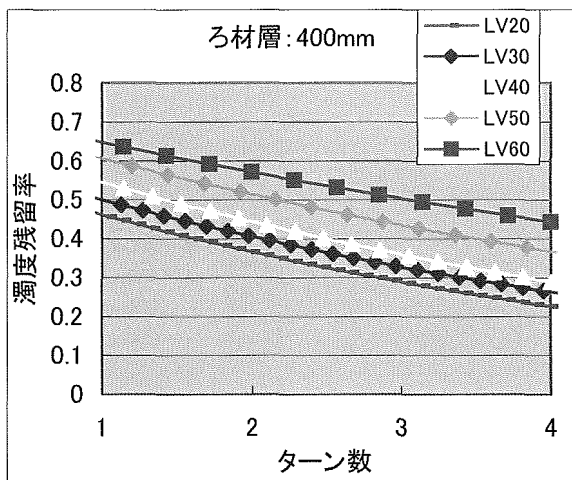
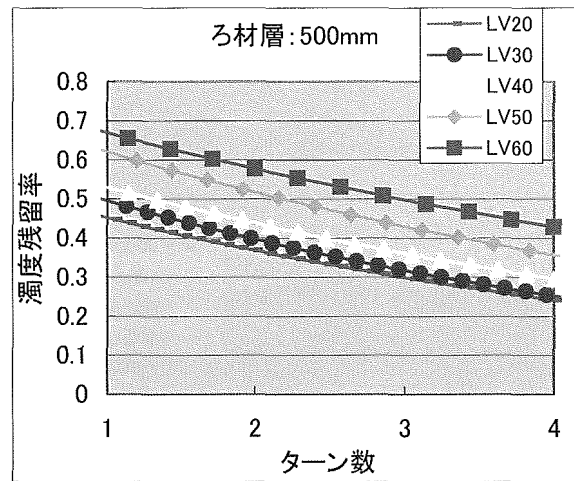
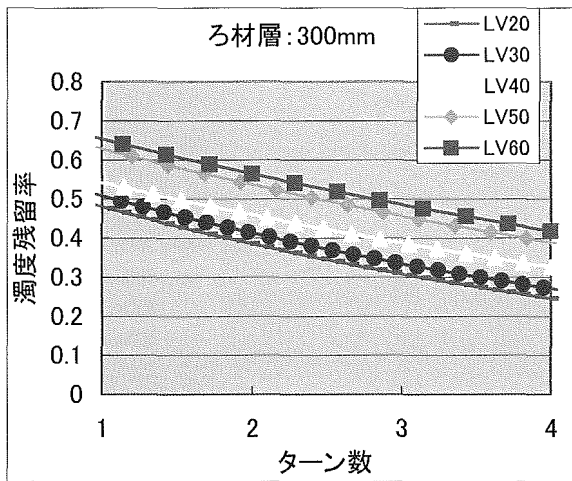


図2. 2. 6 ろ過層厚による濁度残留率変化

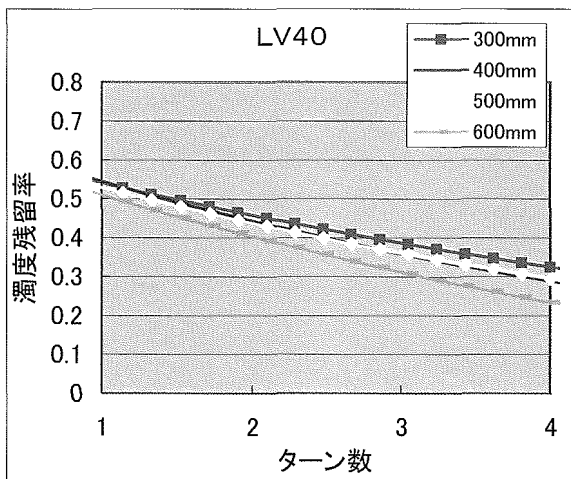
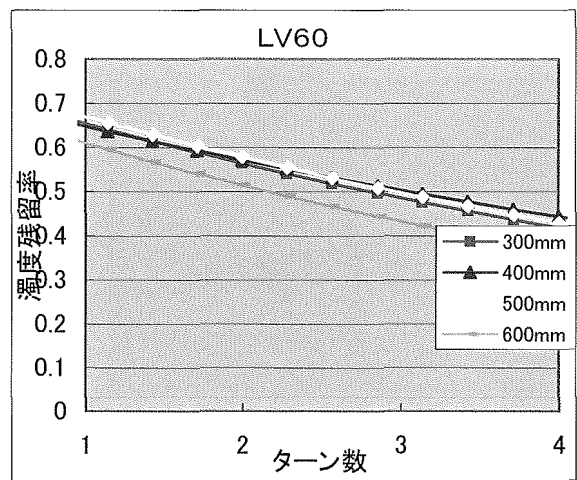
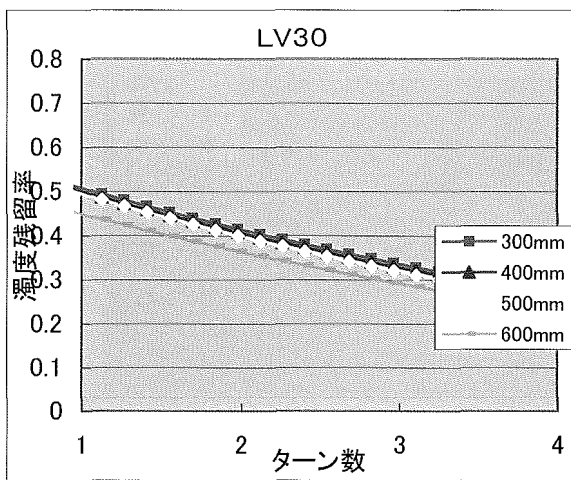
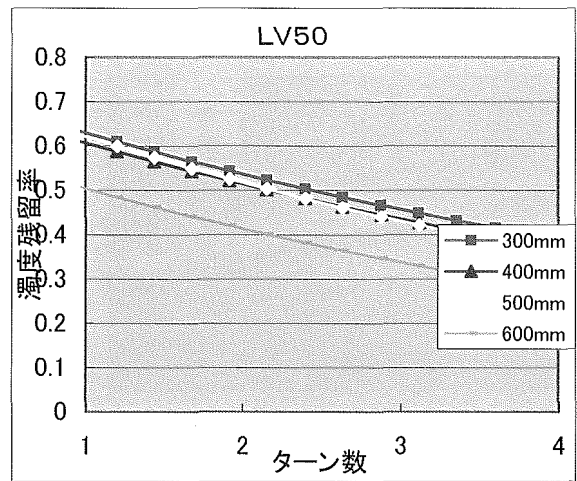
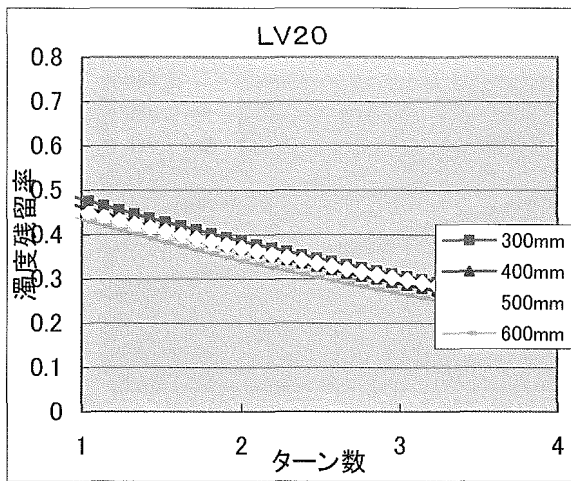


図2.2.7 LV値による濁度残留率の変化

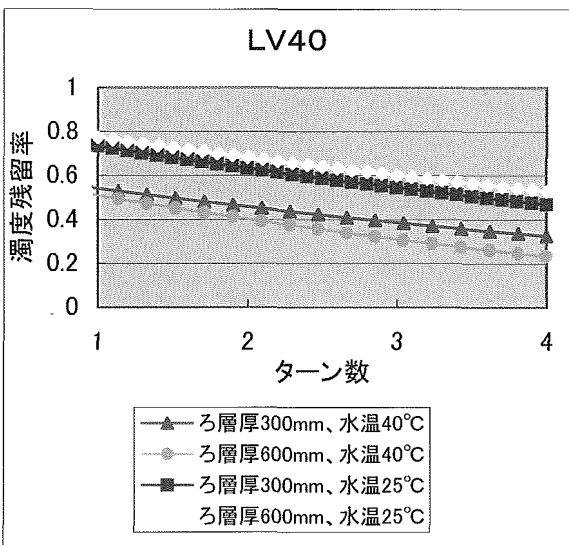
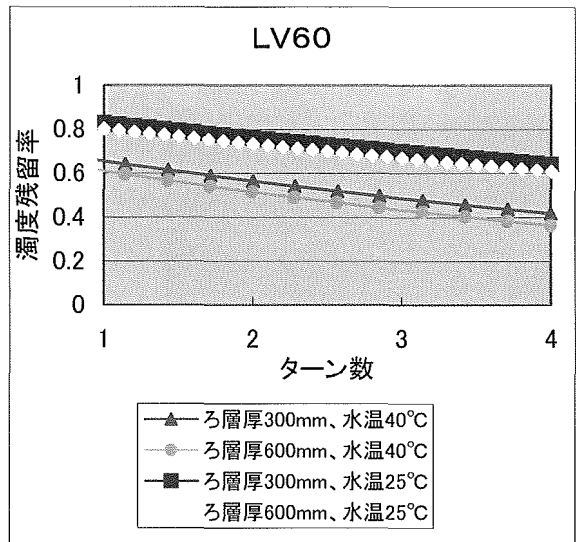
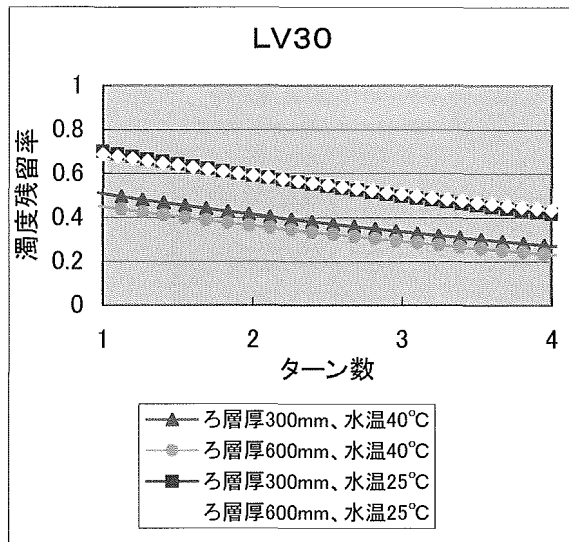
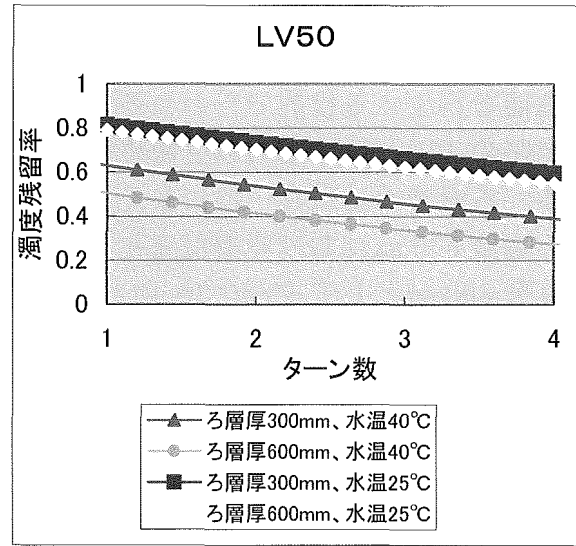
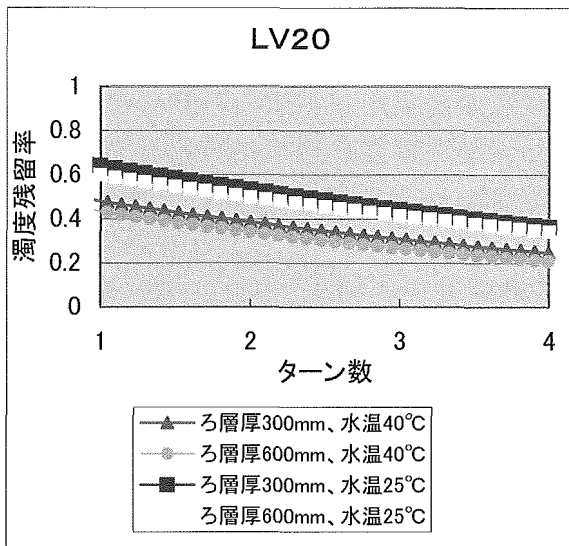


図2.2.8 水温による濁度残留率比較

2.2.3 逆洗性能検証実験

ろ過器の逆洗は、ろ過によって閉塞・汚染されたるろ材を攪拌・洗浄することによってろ過器の性能を再生する目的で行われる。本実験では逆洗の効果を左右するろ層の攪拌状態を、逆洗時の LV とろ過層の厚さを変化させて観察し、逆洗効果が適切に行われる条件を検証する。ろ過層厚は現在一般に多く用いられている 400 mm と 600 mm について実験した。

(1) ろ過層 600 mm における濁度変化

ろ過層を 600 mm として LV20,30,40 における濁度の時間変化を図 2.2.9 に示す。図より

- ① LV 値が大きくなるほど逆洗初期の濁度は高い傾向を示しており、逆洗の効果は LV が早いほど効果が大きいことを示している。
- ② 逆洗開始後、4 分後には濁度が原水濁度近くまで減少しており、その後はほぼ横ばい状態を示しており、原水濁度に達するには 6 分間を要している。この結果は、逆洗効果が得られるまでには最低 4 分以上の逆洗運転が必要であることを示している。

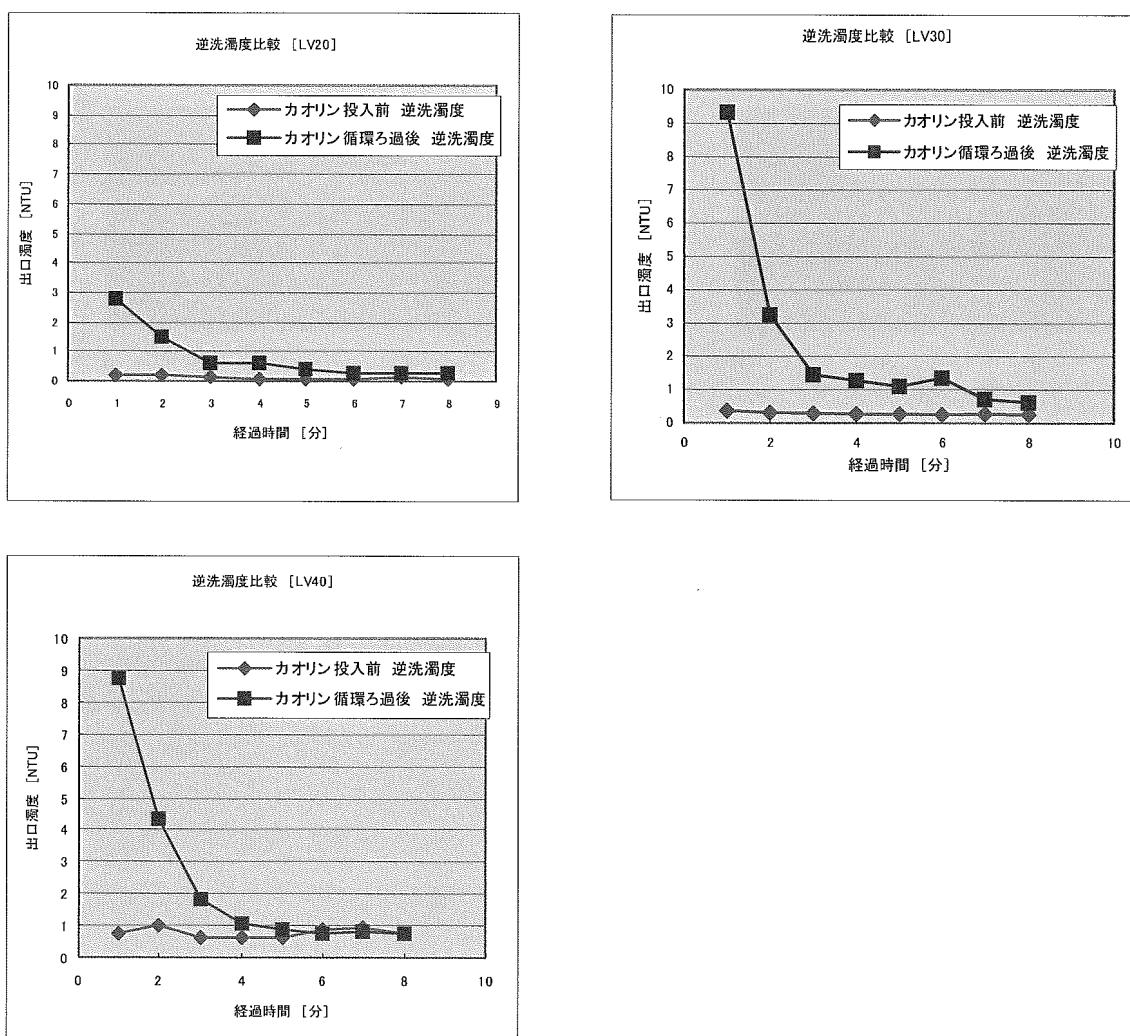


図 2.2.9 ろ過層 600mm における LV 値別濁度の時間変化

(2) ろ過層 400 mm における濁度変化

ろ過層を 400 mm として LV20,30,40 における濁度の時間変化を図 2.2.10 に示す。

図より

- ① ろ過層厚 600 mmと同様に、LV 値が大きくなるほど逆洗初期の濁度は高い傾向を示しており、逆洗の効果は LV が早いほど効果大きいことを示している。
- ② 逆洗開始後、4 分後には濁度が原水濁度近くまで減少しており、その後はほぼ横ばい状態を示しており、原水濁度に達するには 6 分間を要している。この結果は、逆洗効果が得られるまでには最低 4 分以上の逆洗運転が必要であることを示している。
- ③ 逆洗初期の濁度がろ過層 600 mmに比較して低い値を示しており、ろ過層厚 400 mmでは 600 mmに比較してろ過層の汚濁物捕捉が少ないことを示している。

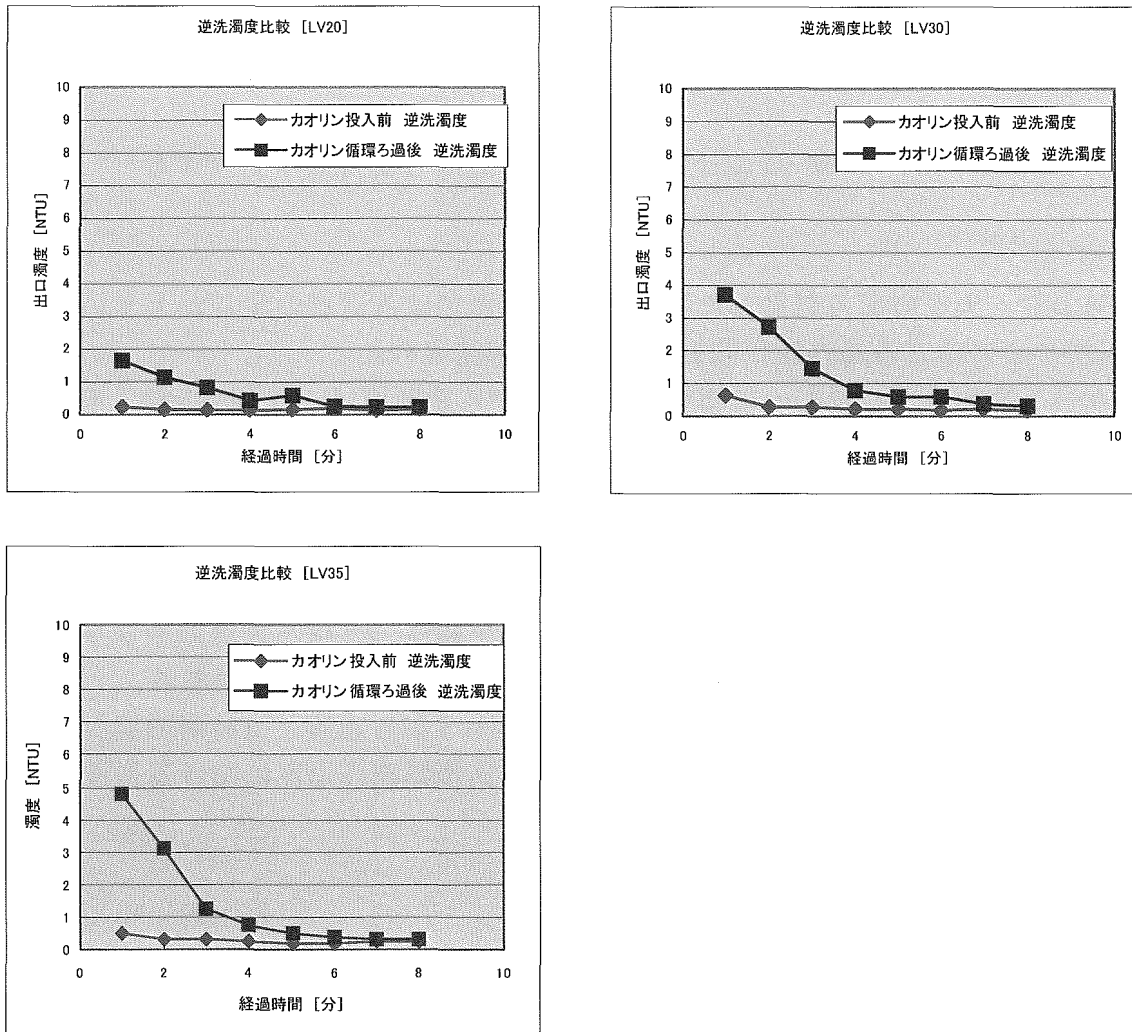


図 2.2.10 逆洗時によるろ過層 400mm・LV 値別濁度の時間変化

2.2.4 まとめ

(1) 実験結果のまとめ

実験によって得られた重要なポイントを以下に記す。

1) ろ過性能について

- ① LV 値が小さいほどろ過器内の濁度残留率が低い。
- ② ろ過層が厚いほど濁度残留率が低くなる傾向があり、この傾向は LV 値が大きいほど

顕著になる。

③ろ過運転開始初期の濁度減少量でろ過性能が決定される。

④ろ過層厚、LV 値に関係なくターン数が多いほど濁度残留率が減少する。

⑤水温 25℃と 40℃とを比較すると、ろ過層厚、LV 値に関係なく水温 40℃のほうが濁度残留率が低くなり、ろ過層厚 600 mmでは最も顕著に表れる。

2) 逆洗性能について

①LV 値が大きいほど逆洗効果が高い

②濁度は逆洗開始から 4 分間で急激に小さくなり、以降は極めてゆるい下降線をたどり 8 分経過程度で原水濃度程度になる。

③逆洗初期の濁度を比較すると、ろ過層 400 mmの場合は 600 mmよりも小さい値を示している。

④ろ過層厚 400 mmの場合 LV 値 35 以上になると、ろ過層と支持層が混合する

(2) 考 察

実験結果より、天然砂をろ材とした物理処理ろ過器ではろ過層の厚さが大きいほど、また LV 値が小さいほどろ過性能が向上することが確認された。

この結果から、物理処理ろ過器の適切な LV 値およびろ過層厚は、LV 値 40m/h、ろ過層厚 600 mmが妥当な数値と考えられ、現在一般に使用されているろ過器の LV 値とろ過層厚も概ねを上記の数値となっている製品が多い。したがって物理処理ろ過器の処理能力は、LV40として判定することとする評価基準を定めれば、ろ過能力の統一表示が可能となる。

逆洗については、逆洗時の LV 値が大きいほどろ材の洗浄効果が大きくなるが、逆洗はろ過層と支持層が混合しない状態を保って行う必要があり、LV はろ過層厚やフリーボード（ろ過層表面と注入ホッパの縁までの距離）によって決定する必要がある。

本実験では、ろ過層厚 600 mmで LV=40、400 mmで LV=35 がろ過層と支持層の混合が起こらない流速であったことから、天然砂をろ材とする物理処理ろ過器における逆洗時の最適 LV 値として考えられる。

(担当者：小川正晃)

(研究協力者：山岸祐太 (ショウエイ)、中村勉、稲田朝夫、竹田喜一 (須賀工業)、
三宅麻由、武安美和、ハルン・ビン・スライマン (九州工業大学))

2.3 循環濾過式浴槽の生物浄化槽の細菌構成

2.3.1 目的

生物浄化槽を用いた循環濾過式浴槽は生物浄化槽がレジオネラ増殖の温床となるために、使用されなくなっている。そのかわりに物理浄化と塩素消毒の併用が行われている。しかし物理浄化はお湯を浄化する能力が高くないこと、塩素消毒は臭いや、トリハロメタンの発生が問題となっている。我々は、レジオネラの増殖を防ぎながら浄化能力の高い生物浄化槽を作製できないかと考えた。24時間風呂を製作する企業がほとんど撤退したあと、レジオネラの増殖を防ぎながら生物浄化槽を使い続けている企業（LT社とする）では、生物浄化槽のみの65℃処理、紫外線殺菌、食塩添加による次亜塩素酸の発生という3つの組み合わせにより、レジオネラの増殖を抑えつつお湯の生物浄化を行い、好成績をあげている。この場合、レジオネラは65℃で死滅するが熱に耐性の細菌叢が形成され、浄化能力を維持していると考えられる。そこでこの企業の生物浄化槽の濾材の細菌叢を調べ、安全な生物浄化槽を作製するための資料とすることをこの研究の目的とした。

2.3.2 方法

(1) 材料

24時間風呂を製造しているLT社の生物浄化槽の濾材を送付してもらい、攪拌後の循環湯を材料とした。

(2) 菌の分離

10~1,000倍に希釈した循環湯をLA培地に塗布して37または42℃で培養し、出現したコロニーの形態、色などの異なるコロニーをできるだけ多く分離してLA培地にて純培養した。

(3) DNAの抽出とPCR

分離菌からDNAを抽出し、16SrRNAのユニバーサルプライマーである8UAと1485Bを用いてPCRを行った。PCR産物を精製し、pGEM-T easy vectorとライゲーションして、*E.coli* DH5aをトランスフォーメーションした。増殖した*E.coli*からプラスミドをとり、シークエンサー(ベックマン社製CEQ2000XLDNAシークエンシングシステム)により塩基配列を解析した。

(4) ホモロジーサーチ

16SrRNAの塩基配列のホモロジー検索にはNCBIのデータを用い、属・種の推定を行った。

(5) 菌の耐熱性

約 10^6 CFU/mlの菌数に調節した浮游液をつくり、60℃の温浴槽に浸せきしたのちLA培地に塗布しCFUをカウントした。

(6) バイオフィーム形成

LB培地(液体)にて前培養した菌をLB培地にて10倍希釈し2mlをガラス製ビダール管に移して3日間静置培養した。肉眼にてガラス管壁のバイオフィーム形成を観察したのち0.25%クリスタル紫を500 μ l添加、15分室温に置いたのち菌液をのぞき、2mlの蒸留水にて2回洗浄、そのあと100%メタノールを2ml加えて3時間置きDD600にて吸光度を計測した。

2.3.3 結果

3回試料を送ってもらい分離培養、染色、同定を行った。その結果を表 2.3.1 に示す。

株番号 1~5 は 37℃培養、6~10 は 42℃で培養した。11~14 は 65℃熱処理直後の分離菌であり、まだ同定作業が終わっていない。同定作業が進んでいる 1~10 の株は *Bacillus* 属、*Brevibacillus* 属、*Paenibacillus* 属とグラム陽性菌が優勢であることがわかったが、水に生息するグラム陰性の *Sphingomonas*, *Caulobacter*, *Sphingopyxis* も検出された。これらの多くはバイオフィルムを形成し、そのうち芽胞を形成する *Bacillus* 属、*Paenibacillus* 属は熱に耐性を示した。一方、熱処理直後に送られてきた試料から分離された NO.11~14 の菌はいずれもグラム陰性菌であるがバイオフィルムを形成し、しかも熱に耐性を示した。

2.3.4 考察

レジオネラの増殖を許さない生物浄化槽の作製は塩素を使わずに循環濾過式浴槽が使われる点で期待がもたれている。今回の研究で、熱に耐性でバイオフィルムをつくる能力の高い細菌構成の一部が明らかにされたと考える。これらの細菌の浄化能力を定量化する方法を開発し、浄化能力の高い細菌を選択する必要がある。菌種とその性質が明らかになれば、熱処理に耐性で、レジオネラの増殖を許さず、しかも浄化能力の高い生物浄化槽の供給ができると考えている。

しかし、生物浄化槽は管理維持を怠ると、あらたな病原菌の増殖を許すことになる。今後、レジオネラ以外の病原菌の増殖抑制も考慮しつつ、安全な生物浄化槽の作製に向けて研究を続ける必要がある。

(担当者：吉田真一)

表2.3.1 分離菌株の同定結果

| 株番号 | 形態と配列 | 培地 | 培養温度 | コロニーの色 | Gram染色 | 芽胞 | 分離した菌の属と種の同定 | Biofilm | | 耐熱性 (60°C30分) 減少菌数 (log10) |
|-----|----------------|----|------|--------------|--------|----|--------------------------|---------|------|-------------------------------|
| | | | | | | | | 菌膜 | OD | |
| 1 | 連鎖は少ない、桿菌 | LA | 37°C | white | + | + | Bacillus subtilis | +++ | 2.41 | 2.60 |
| 2 | 連鎖は少ない、小さい桿菌 | LA | 37°C | yellow | - | - | Sphingomonas sp. | ++ | 3.02 | 3.14 |
| 3 | 短桿菌 | LA | 37°C | yellow | - | - | 不明 | + | 3.16 | 2.74 |
| 4 | 桿菌(両端細い) | LA | 37°C | white | - | - | Caulobacter sp. | + | 1.67 | 3.25 |
| 5 | 短い桿菌 | LA | 37°C | white | - | - | 不明 | - | 1.77 | 3.29 |
| 6 | 短い桿菌(両端丸い) | LA | 42°C | light yellow | + | + | Brevibacillus parabrevis | + | 1.48 | 2.70 |
| 7 | 小さい桿菌(両端濃く染まる) | LA | 42°C | yellow | - | - | Sphingopyxis alaskensis | + | 2.52 | 4.91 |
| 8 | 短い桿菌 | LA | 42°C | light yellow | + | + | Bacillus cereus | ++ | 1.53 | 0.34 |
| 9 | 短い桿菌 | LA | 42°C | transparent | + | + | Paenibacillus macerans | + | 1.68 | 0.17 |
| 10 | 長い連鎖桿菌 | LA | 42°C | white | + | + | Brevibacillus sp. | - | 0.5 | 3.05 |
| 11 | 長い桿菌 | LA | 42°C | white | + | + | | + | 1.78 | -0.10 |
| 12 | 短い桿菌(太い) | LA | 42°C | yellow | - | - | | + | 1.58 | -0.02 |
| 13 | 短い桿菌(両端濃く染まる) | LA | 42°C | transparent | - | - | | + | 2.93 | -0.25 |
| 14 | 短い桿菌 | LA | 42°C | yellow | - | - | | + | 1.9 | -0.29 |