

Cryptosporidium parvum は単色の紫外線に対して高い感受性を示すことが確認された。254nm は可視光の中で微生物に最も有用であることが示されており、この波長の近辺が中圧ランプによる不活化の際にも大きな役割を占めていると考えられる。

また、MS2 が *Cryptosporidium* より紫外線に対して耐性を持つとの結果が得られた。両者を比較すると、MS2 は、全体の大きさ及びゲノムの大きさが小さく、紫外線照射の対象とはなりにくい可能性が考えられる。事実、水系の腸内微生物の中でも紫外線耐性の強い微生物であり、大腸菌ファージ MS2 は、紫外線消毒の処理性能を評価するのに有用な微生物であるといえる。(No.35)

従来、紫外線消毒は高濁度時においては、濁質による妨害のため、効率の悪い方法と考えられてきていた。さらに、太陽光による光回復による問題も取り上げられていた。近年は、従来の低圧、中圧ランプを異なる広範囲にて高いエネルギーを照射するフラッシュタイプ(例：パルスキセノンランプ)が開発されてきている。本研究では、2種類の大腸菌ファージと3種類の大腸菌に関して、低圧ランプとパルスキセノン(PXe)ランプによる不活化効率の違いに関して検討を行う。パルスキセノンランプでは、光回復が生じず、また、高濁度時においてもテーリングが無いことが確認された。(No.36)

254nm の紫外線を照射した場合、*Encephalitozoon intestinalis*, *Encephalitozoon cuniculi*, *Encephalitozoon hellm* の芽胞は 3.2log の不活化を行うのに、それぞれ、60,140,190J/m² の紫外線量が必要であった。この不活化機構は、紫外線量を測定する際に用い、DNA 回復欠損のある *Bacillus subtilis* 株の内生孢子のそれと類似している。これより、*Encephalitozoon* 種も低線量にて不活化され、紫外線感受性の高い *B.subtilis* 株は、紫外線装置の性能を評価する際の有用な微生物であるといえる。(No.37)

本研究は、*Cryptosporidium parvum* の低圧及び中圧ランプ(1~3mJ/cm²)による不活化及び回復能について検討をおこなった。リン酸塩バッファに懸濁させた *Cryptosporidium parvum* に、紫外線照射を、ベンチスケールにておこなった。オーシストの懸濁液は、5℃若しくは25℃で UV 照射後、120時間、明条件、暗条件で培養した。

Cryptosporidium parvum の感染性は、HCT-8 を用いた細胞培養感染法及び抗体染色法により、計測した。低圧、中圧ランプともに、明暗条件での回復は見られなかった。(No.40)

胃腸炎の原因となる食物や水系感染症ウイルスのほとんどはノロウイルスである。培養方法の欠如は使用される培養ウイルスを変換回路と不活性化の内部において増加する。本論文における不活性化は、腸内イヌ科カリシウイルス群 no.48 (CaCV)、呼吸器ネコ科カリシウイルス群 F9 (FeCV)、FeCV・CaCV と PCR における減少の単位の不活性化と相互関連のあるノロウイルスを対象としている。浮遊しているウイルスの不活性化は 0℃~100℃までの範囲における温度と経過時間が関係する。0~150mJ/cm² の範囲における UV-B 照射は不活性化の要因となり、両方のウイルスに対し、34mJ/cm² の強度において 3D (D=1 log₁₀) で減少する。70%濃度エタノールによる不活性化は効率的でなく、30分経過して 3D の割合の減少であった。塩化水素溶液は 300ppm 以上でやっと効果が現れる。FeCV は

CaCV に対し、pH3 以下あるいは pH7 以上において高い安定性を示す。すべての処理に対し、RNA ウィルスが発見されることは、不活性化を減少させる。ノロウィルスは動物カリシウィルス群より敏感であることはなく、過小な pH 及び過大な pH に対しては強く抵抗した。全体的に、両方の動物ウィルス群は熱や UV-B を照射した際、エタノールや次亜塩素酸塩で培養した際において同様な反応形態を示した。低い pH における CaCV の低い安定性は典型的な腸内ウィルス（あるいはカリシウィルス）の反応を示してはいない。エタノールや高次亜塩素酸塩の濃縮による反応は、ノロウィルス群及びウィルスのない安全な水に伴い、媒介物の除去に対し表面的なウィルスの不活性化が必要であることを示している。(No.61)

ウィルス様粒子 (Virus-Like Particles, 以後 VLPs と略称) について、病原ウィルス (ロタウィルス) のサロゲート物質としての評価を行った。VLPs に緑色蛍光蛋白を付加した GFP-VLPs と異種 RNA を含んだセドウィルスの安定性をフローサイトメトリー法及び PCR により確認した。20℃1ヶ月、海水条件下においてロタウィルス、GFP-VLPs 間には大きな違いは生じなかったが、セドウィルスは大きな減少傾向を示した。

飲料水、遊離塩素 1.0mg/L の条件下においてはロタウィルスに対して GFP-VLPs 及びセドウィルスが高い耐性を示した。0.2mg/L では経過時間 30 分までは、三者に大きな違いは認められなかったが、以後ロタウィルスが大きく減少した。

Ct 値による評価においては、GFP-VLPs 及びセドウィルスの除去率 90% の状況下において、ロタウィルスは 99.99% 除去されることがわかった。GFP-VLPs 及びセドウィルスは紫外線照射 (以後 UV 照射と略称) における耐性がロタウィルスに比べ高い。2 者のうちセドウィルスの方が UV 照射による影響がはっきりしており、90% の除去率に対して、ロタウィルスは 99.99% 除去されることになる。

これらのサロゲート物質は、病原ウィルスを導入できない実環境において、ウィルス除去効果の正当な評価手法として新たな可能性をもっている。(No.63)

adenovirus serotype 2 の高出色低圧ランプ、塩素、クロラミンによるベンチスケールでの不活化実験を実施した。本実験では、laboratory-grade water 若しくは、アンモニアを添加した天然水を用い、塩素/クロラミン処理の前段、若しくは、後段に紫外線を照射した。adenovirus serotype 2 の不活化率は、細胞培養法により計測した。遊離塩素 CT 1.22mg-min/L の条件では、3.72log の不活化、preformed chloramine CT 264.5 mg-min/L の条件では、1.2log の不活化、sequential chloramine CT 40.5 mg-min/L の条件では、1log の不活化、UV 40mJ/cm² の条件では、1log の不活化がなされた。sequential chloramine CT 40.5 mg-min/L の後段に、紫外線を 40mJ/cm² 照射することで、4log までの不活化が可能であった。これより、Adenovirus のような紫外線耐性を有する微生物に対しては、消毒剤の組み合わせが有効であることが分かる。(No.73)

(4)紫外線消毒効果の確認(生物線量計等)

No.32、39、44

近年、計算流体力学が、紫外線装置線量の分布を予測できる、最善かつ唯一の方法と言われている。本研究では、様々な装置における紫外線照射線量分布を予測し、不活化が一次反応であると仮定し、文献により得た不活化定数を用いて *Cryptosporidium*、*E.Coli*、

rotavirus、MS2バクテリアファージ、の不活化率の推定を行った。また、2相性の紫外線の用量-応答曲線を用いて、廃水中の糞便性大腸菌群の不活化の推定を行った。バイオアッセイ法を用いて、装置を評価する場合、評価を行う微生物と実験で用いた微生物が同じような不活化機構を有するかどうかには注意を払わねば、必要紫外線照射量を見誤る可能性もあることが確認され、改良したバイオアッセイ手法を適用する必要がある。(No.32)

B. anthracis Sterne の胞子は、*Bacillus subtilis* の標識株に一般的に使用される株よりも254nmのUVに対して3~4倍の耐性を有しているということが文献レビューで明らかにされている。この報告を確かめるために、*B. anthracis Sterne* の胞子を単離し、UVによる不活化の実験が、*B. subtilis* の2種類の標識株 WN624 と ATCC 6633 を用いて実施したところ、*B. subtilis* の胞子に対して効果的である標準UV処理が、*B. anthracis* の胞子の不活化に対しても十分効果があるということと、標準 *B. subtilis* の株の胞子が、*Bacillus anthracis* の胞子のUV不活化に対する biosimetry モデルとして確実に使用できるということを示している。(No.39)

細菌やウイルスを4log不活化するには、低圧ランプ(253.7nm)で400J/m²の紫外線量が必要であるが、副生成物の問題が生じるため、240~290nmの広波長域での紫外線照射が注目されている。4logの不活化には、装置内の全ての水に対して、均質に400J/cm²以上の紫外線を照射する必要があり、照射面や流れ方式により性能が変化する可能性があるため、計算と実際の性能が異なる場合がある、そのため、400J/m²で4logの不活化の性能を評価するには、紫外線耐性が既知の細菌を用いた生物線量計を用いる必要がある安全な紫外線消毒は、流量調整と標準化された紫外線センサーにより、紫外線量を監視する必要があり、最低必要紫外線量を下回らないようにする必要がある(No. 44)

(5)クリプトスポリジウム不活化とUV波長に関する文献 No.10, 16, 17, 33

216,230,242,255,263,271,280,290nmのUV波長に関して *Cryptosporidium*、MS-2大腸菌ファージの不活化実験を行った。*Cryptosporidium* は、250-270nmで不活化効率が高い結果が得られたが、MS-2大腸菌ファージでは、220nm以下及び260-270nmのUV波長が効果的との結果が得られた。この殺菌効率の差異は、*C.parvum* の2重螺旋DNAとMS-2大腸菌ファージとMS-2の単鎖RNAの核酸のUV吸収効率の差異によるとの仮説が立てられるが、詳細な検討が必要であると思われる。(No.10)

大腸菌群(*Citrobacter diversus*、*citrobacter freundii*、*Klebsiella pneumoniae*)、バクテリアファージの254nm、280nm、301nmにおけるUVへの感度を測定した結果、280nmにおける不活化効率は各種大差が無かった。301nmにおける不活化効率は種類によってばらつきがあったが、不活化効率としては大きくない。本研究より、1種類のバクテリアや細菌の不活化効率より、他の種の不活化効率の予想が可能になる可能性が示唆された。(No.16)

230,240,256,261,270,280,290nmのUV波長に関して *Cryptosporidium* の不活化実験を行い、250~275nmの波長域においては、2mJ/cm²にて2logの不活化が可能であり、この範囲の波

長は、他の波長に比べ、不活化効率が高いことが分かる。また、多色型の中圧ランプと254nmの淡色型の低圧ランプについては、不活化効率に大差ないことが確認された。

(No.17)

Cryptosporidium parvum の不活化に関して、210～295nmの波長の中圧水銀ランプが効果があることが知られている。本研究では、各波長毎に $2\text{mJ}/\text{cm}^2$ の紫外線照射を行った結果、250～275nmの波長に関しては $2\log_{10}$ 程度の不活化効果が得られたが、その他の波長域に関しては、 $2\log_{10}$ の効果が得られなかった。(No.33)

(6)紫外線消毒シュミレーション

No.34、50

紫外線照射装置内における照射量は照射強度と照射時間の積により求められる。しかし、実際には、短絡流等の影響があるので、理論値よりは、少ない値しか得られない。実際に有効な紫外線量を求めるには、詳細な装置内の流動を把握する必要がある。

紫外線の理論消毒モデル(CoDiM)により、様々なタイプの紫外線照射装置が検討され、実際の結果との比較検討が行われている。(No.34)

CFD(コンピュータによる流体力学)手法は、異なるレベルの水質を使用することにより、異なる配置・水理条件・エネルギー水位複数の反応槽の比較を行うことができる。技術者によると、プロトタイプとテストによる費用を削減するため、性能に対する詳細情報は、CFDによりプロトタイプ以上に最適にすることとなる。この観点からは、従来より多くの設計評価を行うことができる。結果として、技術者は最適化設計を高レベルで行い、短絡的思考を排除し、水頭の縮小化、全エネルギーの削減、経験的理論を用いたものより効果的な消毒システムを構築することができる。(No.50)

(7)内毒素の不活化

No.38

脱イオン水に様々な濃度の内毒素を注入し、中圧UVランプから紫外線を照射してこの内毒素の不活化を評価した。内毒素は実験条件下($100\sim 600\text{mJ}/\text{cm}^2$)で行われたUVに比例して不活化することが明らかにされた。不活化の割合は、照射線量 mJ/cm^2 当たり $\sim 0.55\text{endotoxin unit}/\text{ml}$ であった。(No.38)

(8)紫外線消毒による臭素酸減少に関する文献

No.42

飲料水の中圧ランプによる照射による臭素酸の生成能に関して研究を実施した。2種類の水源からの水に対して $20\mu\text{g}/\text{L}$ の臭素酸を添加し、76L/分のパイロット実験装置にて、最大 $718\text{mJ}/\text{cm}^2$ の紫外線を照射した。片方の水では、臭素酸の減少は確認されなかったが、高線量 ($696\text{mJ}/\text{cm}^2$) の条件下のもう片方の水では19%までの臭素酸の除去が確認された。両原水の水質の違いは、硝酸濃度(4及び $0.1\text{mgN}/\text{L}$) と、DOC(4.1及び $3.1\text{mgC}/\text{L}$)であった。(No.42)

(9)小規模水道における紫外線消毒

No.48

アメリカの産業は連邦、州及び地方の行政機関によって統制されている。規制に応じて水道事業はしばしば大きなコスト負担を負うこととなる。安全飲料水法（SDWA）の規制を受けている 170,000 の公共水道事業のうち、小規模水道は最も難しい要求を受けている。

給水人口が 500～3,300 人と定義された小規模水道は、一般的に少ない顧客をベースとしており、基幹施設の改良に対して州の資本投資が少ない。

しかし、資本の少ない小規模水道でも、大きな地方自治体と同様に、需要者に対して安全な飲料水を造り供給する責任がある。一般に、小規模水道事業者は、より大きな飲料水処理施設で一般的に使用されている浄水技術をスケールダウンして採用している。しかし全てのシステムが同様ではなく、大規模な事業者のシステムを小規模化することが、効果的で経済的とはいえない。大規模な技術力を持たない小規模事業者にとって効果的な消毒方法の選択肢の一つとして UV 消毒がある。(No.48)

(10)従来の紫外線システムとの比較

No.49

従来の UV システムはシングル UV ランプまたは管の中に格納された形での集合ランプとして設計されており、各ランプは防水の石英ガラス製のカバーで覆われている。また、石英カバーは設計温度で操作されるよう、流水からランプを保護するために用いられている。これらの従来の UV システムの設計は、維持管理が難しい点があり、いろいろ見直されている。現在の UV システムは、設計の転換により、チューブの外側の代わりに石英管の内側にポンプで水を注入する。さらに石英管は外から空気で覆われている。

また、高 UV 線量が、楕円形の反射鏡で連結された二つのランプを用いることにより得られることが発見された。(No.49)

(11)銀による相乗効果

No.52

ウィルスの不活化のために使用される UV 照射と銀の間に UV 照射による消毒効果を高める相乗効果が見られた。UV 強度が $40\text{mJ}/\text{cm}^2$ の時、UV 照射と銀の相乗効果は、銀が低濃度（ $10\ \mu\text{g}/\text{liter}$ - $P<0.0615$ ）の時でも見られた。同じ UV 強度で、銀濃度が $0.1\text{mg}/\text{liter}$ の時、MS-2 の不活化は $3.5\ \text{logs}$ (99.97%) に達した。同条件で、無銀の場合の MS-2 の不活化は $1.8\ \text{logs}$ (98.42%) であり、銀添加を行うことにより顕著な改善が観察された。UV 照射と銀の相乗効果をモデル化するために改良 Click-Watson 反応式を使用した。MS-2 の不活化が $4\ \text{logs}$ (99.99%) の場合、希釈係数(n)は 0.31 であった。この結果から、UV 強度の変動は銀濃度の変動に比例し、MS-2 の不活化に強い影響を与えることを示す。(No.52)

(12)UV 装置の運転操作に関する文献

No.11、65

最近の研究では、UV が *Cryptosporidium oocysts* の不活化のために効果的であることを示している。UV 消毒は膜やオゾンに替わる費用効果が大きいと考えられる。しかし、実施に当たって、操作や維持管理上の必要条件、信頼性、副生成物の生成、制御の必要条件、建設上の問題、コストや他の処理技術との比較等の解決されていない多くの問題が残っている。Carollo 社は現在、表流水浄水場で *Cryptosporidium* の不活化に対する UV 消毒の実施に付帯する実際的な問題を調査するため、AWWARF/EPRI/ECW Tailored Collaboration プロジェクトを行っている。

3種の異なるUV反応槽の形状、3種類のランプのタイプ（中圧、低圧、低圧－高出力）について、6ヶ月インターバルで2回以上テストを行った。UVの照射線量は40mJ/cm²であった。

初期のデータによれば、この線量は *Cryptosporidium oocysts* を 4-log 不活化する。

UV反応槽の能力は、電力消費量に基づき毎日監視され、UVセンサーの光輝（輝度）の読みとり、ランプ照射時間、UV装置通過による圧力低下及びワイパーが性状に作動しているかどうかをチェックしている。

4つのUV装置は、200gpmで40mJ/cm²又はそれ以上のUV線量を照射し、2～4ヶ月テストされ、低圧－高出力系では200gpmで供給されたユニットごとに不活化に関して最も効果的に実施した。低圧と低圧－高出力ランプ出力に関する温度の影響は、寒い季節に適用して考えなければならない。4つの異なる装置の光輝センサーの性能は、大きく変化し、UV線量を監視する上での精度と信頼性に大きな課題を残している。これは消毒に対するUV技術を満足させる上で最も困難で、重要な問題となりそうである。(No.11)

紫外線ランプのファウリングに関する研究を St.Eustache Que の排水処理施設にて実施した。この施設では一般排水を生物ろ過により、生物処理を行っている。また、夏場には、りん除去のため、アルミを使用している。Trojan UV 3000の実験施設は2本の紫外線ランプを有する3系列のモジュールからなる。これらモジュールは、邪魔板により仕切られ、他の系列とは、それぞれ独立している。1系列のモジュールにて紫外線を照射した際、他の系列は、電源 off(OFF)及び、可視光のみの照射 (VIS) のそれぞれに設定を行った。トレーサー実験による分散係数は、約 0.01 であった。有機物、無機物、生物的要因によるランプのファウリングに関して検討した。(No.65)

(13) UV照射への濁度の影響に関する文献 No.13, No.18, 57

廃水中においては、固液界面上において、照射UVが遮断されない場合のみ、対象微生物は不活化が可能となるので、装置設計においては、対象水中の微粒子数が一つの設計要因となる。(No.13)

水道水を脱塩処理した水(type1)と脱塩水道水に溶解性物質(TDS)500mg/L、濁度 10NTU、全有機炭素(TOC)2.5mg/L以上添加した水(type3)の水に対して、200nm～400nm付近に波長を有する白色パルス光を用い、どちらの水質に関しても、EPAガイドライン中にあるバクテリアの7log不活化、ウイルスの4log不活化、原虫類の3log不活化が、可能であることが確認された。(No.18)

3次処理水中の7μm以上の懸濁物質が増加するに従い、不活化速度は減少する傾向にある。最低限約800J/m²の紫外線量が、カリフォルニアにおける排水の大腸菌に関する再利用基準を満たすためには、必要であるといわれている。(No.57)

(14) UV施設の導入状況に関する文献 No.19

UVによる浄水処理施設は、Ft.Benton, Montana 以外、北アメリカにはなかったが、近年、増加の傾向にあり、建設中、計画中のものを含めると、2～1,800million-gallons/day(1gallon = 3.785 L)のUVによる浄水処理施設が存在する。Calgon Carbon 社がカナダやアメリカ等において、低線量のUVによる *Cryptosporidium* の不活化に関し、特許を取得し、1000 ガロンにつき、0.0.15 \$の特許料を徴収するとしており、他の浄水処理方法に比較したUV処理装置のコストメリットを損なう可能性がある。

(15) DNAの光、暗回復に関する文献

No.21、53

大腸菌とクリプトスポリジウムのUV不活化、光回復、暗修復は核内感受性部位(ESS)の試験により研究されてきた。この研究により微生物の染色体のDNAの中にUVにより誘発されたピリミジン二量体を測定することができた。UVにより不活化された大腸菌の99.9%において、UV照射線量と、大腸菌のDNA中に誘発されたピリミジン二量体の数の間に高い相関性が認められた。大腸菌のコロニー生成能もDNAのピリミジン二量体の数と高い相関性があった。このことはESS試験がコロニー形成能の測定に用いられてきた従来法と同等の方法であることを示している。大腸菌は、UV照射により99.9%が不活化された後に蛍光線を照射されると、UVにより誘発されたDNA中のピリミジン二量体は、連続的に修復され、コロニー形成能は徐々に回復した。しかし、UV不活化後、暗状態に放置すると、大腸菌はピリミジン二量体の修復とコロニー形成能の回復のいずれも示さなかった。クリプトスポリジウムは、UV不活化後蛍光線を照射されたとき、DNA中のUVにより誘発されたピリミジン二量体が連続的に修復されるが、動物への感染性の回復は認められなかった。UV不活化後に暗状態に置かれた場合、クリプトスポリジウムもピリミジン二量体の修復にもかかわらず、感染性の回復は示さなかった。したがって、クリプトスポリジウムの感染性は、染色体DNAのピリミジン二量体の修復後でさえも、光再活性化または暗回復のいずれによっても回復しなかった。(No.21)

本研究では、実験室で培養された非病原性の実験用大腸菌株に対して、低圧及び中圧の紫外線照射実験を行った後、大腸菌の回復性について分析した。検体に対しては、中圧にて紫外線強度 5, 8, 10 mJ/cm², 低圧にて紫外線強度 3, 5, 8, 10 mJ/cm² の照射を行った。さらに照射後は、検体を 37℃の再活性光線下または暗室という環境で培養し、照射後 4 時間を経過するまで観測を行った。

実験の結果、大腸菌は低圧紫外線に耐えて回復するが、中圧紫外線に対する回復は認められなかった。しかし中圧においても、紫外線強度を 3 mJ/cm² まで低下させたケースについては、ついに大腸菌の回復が確認された。

本研究は、飲料水処理に用いられる中圧照射と低圧照射との違いにより、細菌の回復率が変化することを、明確に実証したものである。(No.53)

(16)紫外線消毒施設の設計に関して

No.59

新しいDBPの基準(臭素酸イオン 10 μg/L)を満足させるためには、オゾン注入量を最小限にし、臭素酸発生量を抑える必要がある。表流水を取水している浄水場では、消毒レベル

を現状のまま維持する必要があるため、本件に関して、関心を抱いているケースが多い。そのため、代替消毒剤として紫外線消毒を評価する必要があるため、本研究では、水質(アトラジン、BOOC、亜硝酸塩、等)の観点からみた中圧ランプの影響を評価し、紫外線消毒設備をGACの前段、もしくは、後段のどちらに設置すべきかに関して、検討を行なっている。本研究にて示している結果によると、クリプトの不活化が必要とされる条件では、問題にならない差である。(No.59)

(17)エアロゾルを用いた紫外線消毒

No.60

今日、世界中で空気中の細菌を不活化するための紫外線滅菌照射実験が、様々な環境条件の設定下で行われている。システムの差異と実験条件によって、結果が大きく変わる可能性があることが一般的に認識されている。

本研究では、懸濁溶液の成分がエアロゾル径と *Serratia marcescens* に対する紫外線滅菌照射に影響することを実験によって確認する。我々の研究室に設置した実験装置にて、*S. marcescens* は次の溶液中に懸濁させ、紫外線滅菌照射を行う。(1)超純水(2)リン酸緩衝液(3)ウシ胎仔血清、(4)リン酸緩衝生理食塩水(0.8%塩化ナトリウム)、(5)人工唾液(リン酸緩衝生理食塩水と10%ウシ胎仔血清)。(No.60)

(18) 配管内の生物膜と紫外線消毒

No.62

二つの配水システムモデルを並行して運転し、配水システム中の生物膜や微生物群集構成へのUV消毒の影響を調べた。一つのシステムではUVランプの照射を受け、もう一つのシステムでは対照実験として、UV照射がない以外は同じ条件とした。UV照射下の生物膜は、対照実験と比較し、水理的滞留時間を12時間から2時間へ減少させることによる栄養物質の利用しやすさの増加に対して、より敏感であった(すなわち従属栄養微生物の定常時密度がより大きく増加した)。しかしながら、UV処理は生物膜の微生物群集に対して常に一定の効果があるわけではなく、HPC密度を制御する過程は、生物膜を構成する微生物中の特定の菌株に対して独立であることを示している。微粒子による遮蔽は、UV感受性をもつ微生物の生存に貢献している証拠があった。この仮説は、ある一つの実験でUV照射下の生物膜群集と対照実験系とで高い類似性があることだけでなく、UVシステムにおけるUV感受性をもつ微生物が存在することと一致している。日和見感染性病原体の細菌への侵入現象を仮想するため、生物膜群集が定常状態に達した後、それぞれの系に日和見感染性病原体を加えたところ、日和見感染性病原体はUV処理によって影響を受けないが、そのかわり従属栄養微生物の生物膜密度と相関が見られた。(No.62)

(19) 水質が紫外線消毒に及ぼす影響

No.67、

アルミフロックと関連してMS-2大腸菌ファージの紫外線による不活化能力を評価した。ベンチスケールの実験を、MS-2をウイルスのサロゲート物質として、紫外線消毒前に、カオリン土粒子により凝集した場合及びウイルスの塊として集合した場合、に対して実験を行った。本実験は、微粒子サイズ、ウイルスの集合状態、濁度等が浄水処理に準じるよう実験条件の設定を行なった。また、3番目として、PBS溶液にMS-2を入れたコントロール実験を行った、フロック微粒子とウイルスの塊により、ウイルスは紫外線を阻害されていること

が示された。本要因による 1.1log の不活化減少が確認された。ウイルスの結合状態は、透過型電子顕微鏡を用いて、測定した。(No.67)

(20) 規格

No.72、74

近年、飲料水への紫外線の適用はヨーロッパのみでなく、全世界で増加傾向にある。1997年から2005年度までに、全世界で、紫外線消毒施設の導入数はやく10～30%増加するとされている。一方、塩素消毒は、87%～55%まで減少すると予想されている。紫外線消毒の特徴として、①薬剤の添加がない②反応時間が短く、反応槽が必要ない③pH、温度に依存しない④不活化に特化した消毒メカニズム⑤寄生動物への有用性(*Cryptosporidium*)が挙げられる。

これ以外に、紫外線照射量を直接計測、若しくは、計算することが出来ないことも明らかになってきている。これは、流体中の紫外線照射が、紫外線出力、水の流れ、紫外線透過率、水利特性等の影響を複雑に受けているためである。

そのため、紫外線消毒の効率を計測する標準のルールを作成が必要になる。すでに Austrian Standards Institute(1996,2001,2003)、US-EPA(2003,draft)、DVGW(1998,2004)が規定されている。

上記3つの手法において、通常、紫外線消毒施設の性能を評価するにあたり、生物線量計を利用している。(No.72)

2003年6月に紫外線消毒ガイドライン(UVDGM)(案)がEPAより発表された。UVDGMに基づき、Clayton Country Water Authority(CCWA)社は、Freeman Road Plantにおいて、紫外線消毒施設の構成及び妥当性を検証した。Tier2の分析によると、Tier1に比べ、紫外線の安全率と要求紫外線量が12%減少した。(No.74)

第4編

凝集沈澱・急速ろ過の運転管理技術の開発

凝集沈澱・急速ろ過の運転管理技術の開発に関する研究

財団法人水道技術研究センター 藤原 正弘

研究要旨

本研究は、水道原水を汚染する可能性のあるクリプトスポリジウム等感染性原虫類に対する除去技術の開発を行うものである。実験の結果、凝集沈澱処理においては、原水水質に応じて凝集剤の種類、凝集剤注入率、凝集 pH、急速混和池を適切に設定することで、クリプトスポリジウム代替粒子の処理性をより向上できることが確認された。また、急速ろ過処理においては、凝集剤によるろ材被覆が、ろ過処理水質の改善や捨水時間の短縮手段として大いに期待できることが示唆された。

1. 研究目的

Cryptosporidium parvum に代表される原虫類による汚染のおそれがある水道水源から取水している水道事業体においては、浄水処理により原虫類を物理的にかつ効果的に除去することが現在最も必要な対策とされている。適切に管理された急速ろ過システムによる *C. parvum* オーシストの除去率は、一般的に 2~3 log₁₀ 程度であることが知られている。しかしながら、万が一の汚染を考えた場合、*C. parvum* オーシストの除去率をより高めることができる運転管理技術を保有し実践できることが、国民が安心して利用できる安全な水道を確保する上では重要である。

本研究では急速ろ過システムにおける *C. parvum* オーシスト等の粒子の安定的な除去を目的として、凝集沈澱処理における使用凝集剤の検討、急速ろ過処理における運転操作上の工夫等により、微粒子の除去性を向上させるための運転管理技術の開発を行う。

(1) 凝集沈澱プロセスにおける運転管理技術の開発

1) 鉄系および有機高分子凝集剤を含む各種凝集剤の処理性評価

凝集沈澱工程における *C. parvum* オーシスト除去能力の向上を目的として、従来のアルミ系凝集剤以外の凝集剤（塩化第二鉄、有機高分子凝集剤等）を含む各種凝集剤の処理性を評価する。

2) PAC 処理における凝集操作条件の比較検討

国内で一般的に広く使用されている PAC による凝集沈澱処理を対象に、薬品注入条件（凝集剤注入率、pH）、急速攪拌条件（攪拌強度）が *C. parvum* オーシストの除去性に与える影響について比較検討を行う。

(2) 急速ろ過プロセスにおける運転管理技術の開発

1) ろ層構成の比較検討

従来一般的に用いられている単層ろ層の他に、2 層、3 層構成のろ層について、パイロットプラント実験により *C. parvum* オーシスト除去能力の比較検討を行う。

2) ろ剤の凝集剤被覆に関する検討

ろ過池流入水（凝集沈澱処理水）に凝集剤を添加することによる再凝集の効果や凝集

剤を添加した水により逆洗を行うことによるろ材の凝集剤被覆効果について、それらの効果の検証を行う。

2. 研究方法

2.1 実験原水

横浜市水道局西谷浄水場の原水(相模湖系表流水)に、粒径、比重、ゼータ電位を *C. parvum* オーシストに類似させた代替トレーサー粒子を 1000 個/mL となるように添加し、実験原水とした。

C. parvum オーシスト代替トレーサーの性状を表-2.1 に示す。

表-2.1 クリプト代替トレーサー粒子の仕様

材質	PMMA (ポリメチルメタアクリレート)
粒子径	5.0±0.5 μm
真密度	1.19 g/cm ³
かさ密度	0.3~0.4 g/cm ³ (粉体時)
ゼータ電位	-29 mV (pH 6.6)
色	青 (UV 励起蛍光下)

2.2 実験プラント

実験プラントは 2 段の急速攪拌、3 段の緩速攪拌を含む凝集沈澱池、再凝集混和槽および急速ろ過塔から構成される。各設備の主要な仕様は以下の通りである。

- ・原水槽
 - : 有効容量 0.44 m³
 - 数 量 1 槽
 - 滞留時間 3.8 min (Q = 84 m³/日 × 2 系列分の時)
- ・急速攪拌槽
 - : 形 式 縦型タービン翼式攪拌槽
 - 数 量 2 段 × 2 系列
 - 有効容量 0.14 m³ × 2 段
 - 滞留時間 2.4 min × 2 段 (Q = 84 m³/日の時)
 - G 値 215 s⁻¹
 - G T 値 61,920
- ・緩速攪拌槽
 - : 形 式 横型パドル翼式攪拌槽
 - 数 量 3 段 × 2 系列
 - 有効容量 0.96 m³ × 3 段
 - 滞留時間 16.5 min × 3 段 (Q = 84 m³/日の時)
 - G 値 55 s⁻¹ (1 段目)
 - 11 s⁻¹ (2 段目)
 - 2 s⁻¹ (3 段目)
 - G T 値 67,320
- ・傾斜板沈澱槽
 - : 形 式 横流式傾斜板沈澱槽
 - 数 量 1 槽 × 2 系列

有効容量 8.05 m³
 滞留時間 138 min (Q = 84 m³/日の時)

- ・再凝集攪拌槽 : 形式 縦型タービン翼式攪拌槽
 数量 2槽
 有効容量 0.032 m³×2段
 滞留時間 2.5 min×2段 (Q = 18.5 m³/日の時)
- ・急速ろ過塔 : 形式 重力式円筒形ろ過塔
 数量 8塔
 形状寸法 φ0.3 m×4.0 mH

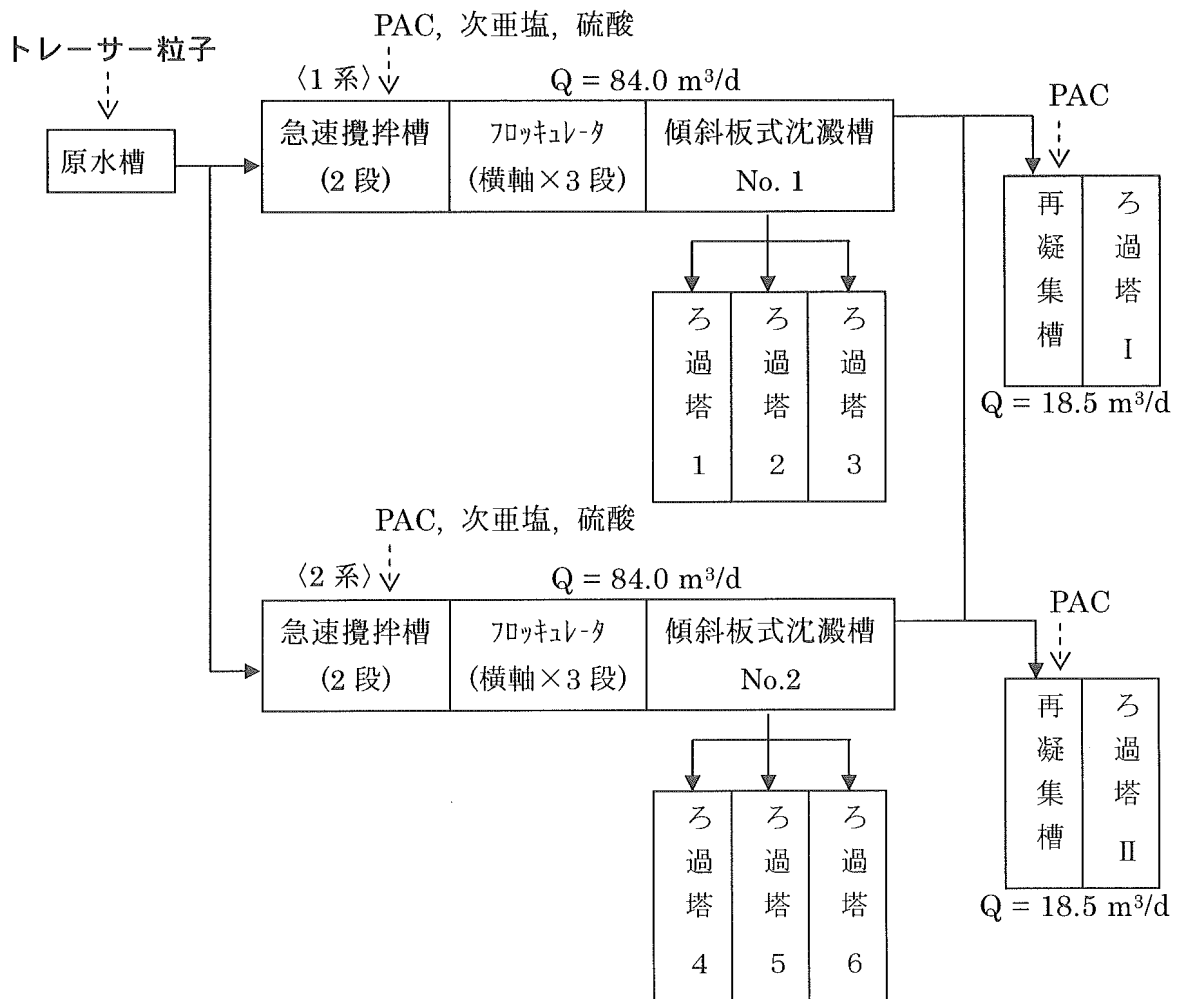


図-2.1 実験プラントの概略フロー

2.3 急速ろ過塔のろ層条件

1, 2系共、急速ろ過塔のろ層構成は下表の通りとした。

表-2.2 急速ろ過塔のろ層構成

	単層	2層	3層
	[けい砂] 層厚=600 mm 有効径=0.6 mm	[上層:アンスライト] 層厚=300 mm 有効径=1.4 mm	[上層:アンスライト] 層厚=420 mm 有効径=1.4 mm
		[下層:けい砂] 層厚=500 mm 有効径=0.6 mm	[中層:けい砂] 層厚=230 mm 有効径=0.6 mm
			[下層:カ-ネット] 層厚=110 mm 90%通過径=1.6 mm
ろ過塔 No.			
1, 4	○		
2, 5		○	
3, 6			○
I, II	○(実験条件による)	○(実験条件による)	

3. 凝集沈澱プロセスにおける運転管理技術の開発

3. 1 塩化第二鉄および有機高分子凝集剤の評価

(1) 実験条件

1) 使用凝集剤

- ・ PAC：市販品 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 10\%$)
- ・ 硫酸ばんど：市販品 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 10\%$)
- ・ 塩化第二鉄：市販品 ($\text{FeCl}_3 = 38\%$)
- ・ ポリシリカ鉄 (PSI)：メーカーサンプル
- ・ 有機高分子凝集剤 (ポリアクリルアミド系)：メーカーサンプル

表-3.1 有機高分子凝集剤の仕様

種類 (イオン性)	銘柄	分子量	粘度 (0.1%)	残留モノマー濃度
ノニオン	NP800PWS	1,300万	105 mPa·s	<50 ppm
弱アニオン	AP410PWS	1,500万	320 mPa·s	<50 ppm

メーカー：ダイヤニトリックス (株)

2) 沈澱池薬注条件

以下の3テーマの実験について、それぞれ薬注条件を設定した。

a) 凝集剤の比較検討

1系：比較系

実験期間を区切って凝集剤の種類と注入率を変化させた。実験は水温が概ね 15℃ 以上の高水温期と 15℃ 以下となる低水温期の2期間で実施した。各期間の凝集剤注入条件を表-3.1, 3.2 に示す。

PAC に高分子凝集剤を併用する場合は、PAC 注入率の低減効果をねらいとして、PAC 注入率を2系の80%とした。

2系：PAC 単独処理

西谷浄水場における PAC の実注入率に合わせ、対照系とした。

表-3.1 凝集沈澱処理条件 (高水温期)

No.	1系		2系	実験期間
1	PAC [28]	+弱アニオン [0.05]	PAC [35]	8/5~8/21
2	塩鉄 [30]		PAC [30]	8/21~8/25
3	塩鉄 [30]	+弱アニオン [0.05]	PAC [30]	8/27~9/1
4	塩鉄 [30]	+ノニオン [0.05]	PAC [30]	9/3~9/8
5	PSI [172]		PAC [30]	9/18~9/29
6	硫酸ばんど [30~35]	+弱アニオン [0.05~0.01]	PAC [25]	11/6~11/15
7	硫酸ばんど [35]		PAC [25]	11/15~11/18

[]内：注入率、単位 mg/L

表-3.2 凝集沈澱処理条件 (低水温期)

No.	1系		2系	実験期間
1	PAC [20]	+弱アニオン [0.05]	PAC [25]	11/22~11/29
2	PAC [20]	+アニオン [0.05]	PAC [25]	12/3~12/11
3	PAC [25]	+アニオン [0.05]	PAC [25]	12/12~12/13
4	PAC [25]	+アニオン [0.1]	PAC [25]	12/16~12/17
5	塩鉄 [30]	+弱アニオン [0.05]	PAC [25]	1/9~1/10
6	塩鉄 [25]	+弱アニオン [0.05]	PAC [25]	1/14~1/24
7	PAC [25]	+弱アニオン [0.05]	PAC [25]	1/28~1/30
8	塩鉄 [30]		PAC [30]	2/10~2/17
9	塩鉄 [30]	+アニオン [0.05]	PAC [30]	2/18~3/4
10	塩鉄 [35]	+アニオン [0.05]	PAC [35]	3/4~3/7

[]内：注入率、単位 mg/L

b) 高分子凝集剤注入率の検討

1系：比較系

高分子凝集剤の注入率を表-3.3の通り、順次変化させた。

PAC注入率は2系と同量とした。

2系：PAC単独処理

a)と同じ。

表-3.3 凝集沈澱処理条件

No.	1系		2系
1	PAC [30]	+弱アニオン [0.05]	PAC [30]
2	PAC [30]	+弱アニオン [0.1]	PAC [30]
3	PAC [30]	+弱アニオン [0.2]	PAC [30]
4	PAC [30]	+弱アニオン [0.5]	PAC [30]

[]内：注入率、単位 mg/L

(2) 実験結果

1) 凝集剤の比較検討

図-3.1~3.6に、各凝集剤条件におけるトレーサー除去率 (\log_{10}) の平均値を凝集沈澱処理、急速ろ過処理、凝集沈澱+急速ろ過処理トータルの各工程に分けて示す。なお、急速ろ過工程における除去率の評価には、ろ過時間中終始安定した除去 (ろ過終期の漏出が見られない) が行われる単層ろ過 (LV=150 m/d) のデータのみを用いた。

また、各条件の平均値算出にあたり、必ずしもサンプル数が十分でない場合があるため、比較系と対照系の間で除去率に有意な差が生じているかどうかについて統計的手法により検定を行った。この結果を、表-3.4, 3.5に示す。検定はt検定により、有意水準を95%とした。

これらの結果をまとめると以下ようになる。

・高水温期においては、硫酸ばんど以外、何れの凝集剤を用いても、凝集沈澱処理で $1.5 \log_{10}$

程度、単層ろ過処理で 1.5~2.5 log₁₀ 程度のトレーサー除去が期待できることが分かった。この時、PAC と PAC 以外の無機凝集剤、あるいは無機凝集剤と高分子凝集剤併用の有無等の間で、処理性について有意な差は認められなかった。高水温は、一般的に凝集沈澱、ろ過処理にとって好条件であり、PAC 単独処理によっても十分な処理性能が発揮されたため、他凝集剤との明確な差が現れなかったものと考えられる。また、高分子凝集剤を併用する時の PAC 注入率を PAC 単独処理時の 80 %としたことも、要因の一つと考えられる。

- 低水温期においては、PAC を用いた凝集沈澱処理で約 1~1.5 log₁₀、単層ろ過処理で 2~3 log₁₀ 程度のトレーサー粒子除去が期待できることが分かった。また、高分子凝集剤併用の有無で処理性に有意な差が認められた。特に、PAC 単独処理に比べ塩化第二鉄と高分子凝集剤を併用した場合、凝集沈澱と単層ろ過の一連の処理の合計で 1 log₁₀ 程度、トレーサー粒子の処理性を向上させることができた。この要因として、①鉄系凝集剤によるフロック比重の増大、②高分子凝集剤の架橋作用によるフロックサイズおよび強度の増大、③原水中の被凝集粒子の表面電位やサイズと無機凝集剤水和物の荷電やサイズとの関係等が考えられるが、今回の実験では、これらの要因を特定したり、原水水質との相互関係を明らかにするには至らなかった。

表-3.4 除去率平均値の差の検定結果 (高水温期)

比較系凝集剤条件	<i>t</i>	<i>t</i> (m, 0.05)	有意差の有無
[凝集沈澱処理]			
PAC+弱アニオン	-0.698	2.447	なし
塩鉄	0.576	2.365	なし
塩鉄+弱アニオン	0.254	2.306	なし
塩鉄+アニオン	-1.279	2.179	なし
PSI	1.063	2.160	なし
硫酸ばんど+弱アニオン	-5.390	2.447	あり
[単層ろ過処理]			
PAC+弱アニオン	-1.134	2.447	なし
塩鉄	-0.354	2.228	なし
塩鉄+弱アニオン	1.549	2.262	なし
塩鉄+アニオン	-0.751	2.179	なし
PSI	0.293	2.160	なし
硫酸ばんど+弱アニオン	-2.905	2.228	あり
[凝集沈澱+単層ろ過処理]			
PAC+弱アニオン	-1.252	2.571	なし
塩鉄	-0.187	2.228	なし
塩鉄+弱アニオン	1.316	2.228	なし
塩鉄+アニオン	-1.025	2.179	なし
PSI	0.714	2.160	なし
硫酸ばんど+弱アニオン	-3.997	2.300	あり

表-3.5 除去率平均値の差の検定結果（低水温期）

比較系凝集剤条件	t	$t(m, 0.05)$	有意差の有無
[凝集沈澱処理]			
PAC20+弱アニオン0.05	-1.436	2.365	なし
PAC25+弱アニオン0.05	-19.051	12.706	あり
PAC20+アニオン0.05	-4.236	2.228	あり
PAC25+アニオン0.05	-0.866	12.706	なし
PAC25+アニオン0.1	-0.322	4.303	なし
塩鉄 30	4.456	2.306	あり
塩鉄 25+弱アニオン0.05	4.526	2.160	あり
塩鉄 30+弱アニオン0.05	6.182	12.706	なし
塩鉄 30+アニオン0.05	6.318	2.028	あり
塩鉄 35+アニオン0.05	2.624	2.160	あり
[単層ろ過処理]			
PAC20+弱アニオン0.05	-0.480	2.306	なし
PAC25+弱アニオン0.05	0.249	4.303	なし
PAC20+アニオン0.05	-2.222	2.179	あり
PAC25+アニオン0.05	-2.123	12.706	なし
PAC25+アニオン0.1	-2.455	12.706	なし
塩鉄 30	-1.972	2.447	なし
塩鉄 25+弱アニオン0.05	-0.734	2.228	なし
塩鉄 30+弱アニオン0.05	0.452	4.303	なし
塩鉄 30+アニオン0.05	3.678	2.052	あり
塩鉄 35+アニオン0.05	1.315	2.201	なし
[凝集沈澱+単層ろ過処理]			
PAC20+弱アニオン0.05	-0.655	2.306	なし
PAC25+弱アニオン0.05	-0.033	4.303	なし
PAC20+アニオン0.05	-3.060	2.179	あり
PAC25+アニオン0.05	-2.441	4.303	なし
PAC25+アニオン0.1	-2.664	12.706	なし
塩鉄 30	-0.356	2.447	なし
塩鉄 25+弱アニオン0.05	0.591	2.160	なし
塩鉄 30+弱アニオン0.05	1.051	4.303	なし
塩鉄 30+アニオン0.05	5.030	2.045	あり
塩鉄 35+アニオン0.05	2.006	2.160	なし

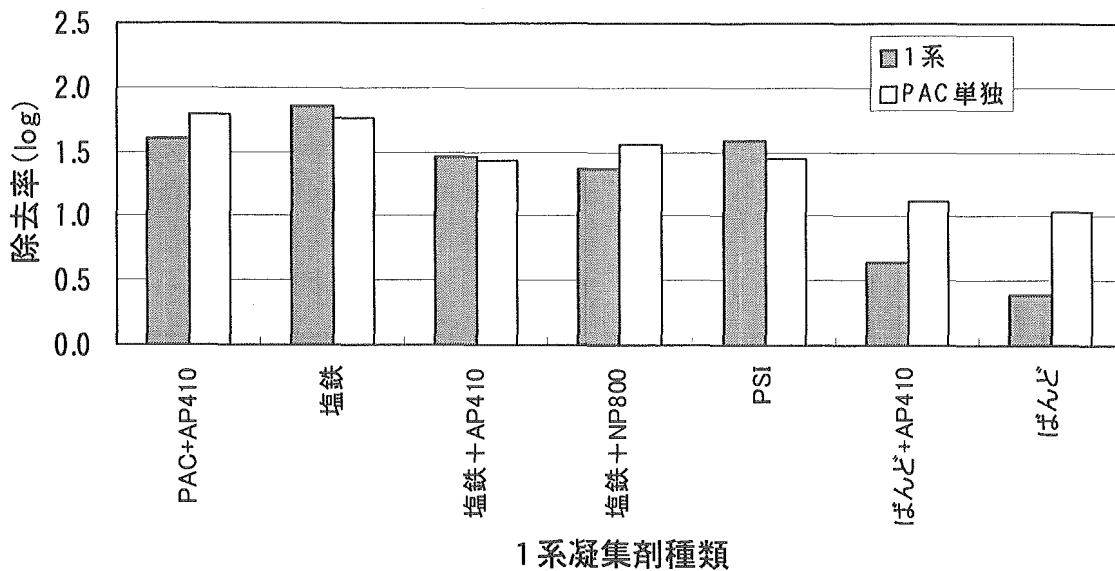


図-3.1 沈澱池におけるトレーサー除去率（高水温期）

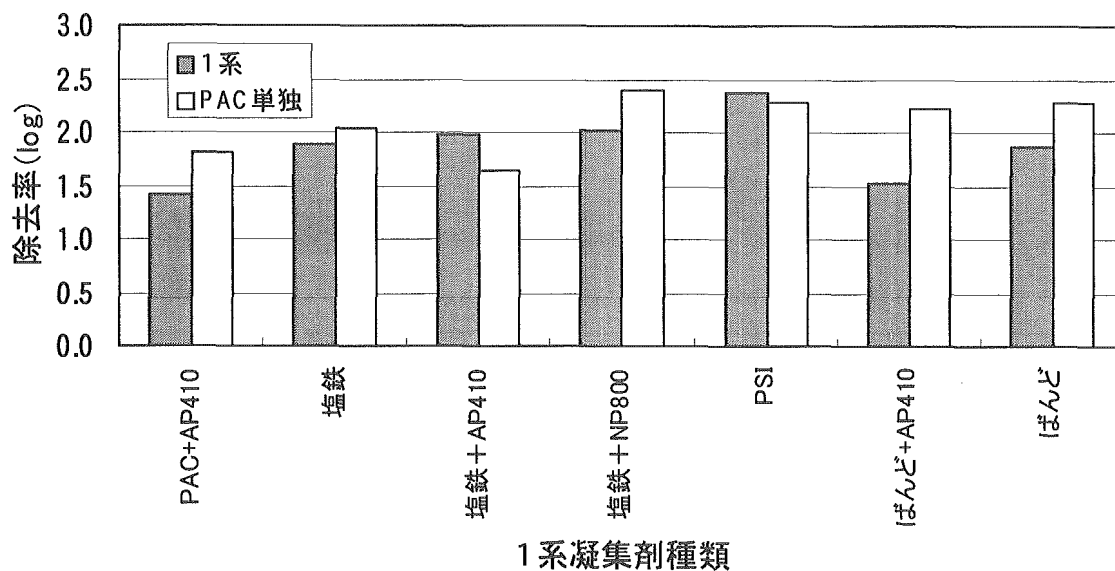


図-3.2 単層ろ過塔におけるトレーサー除去率（高水温期）

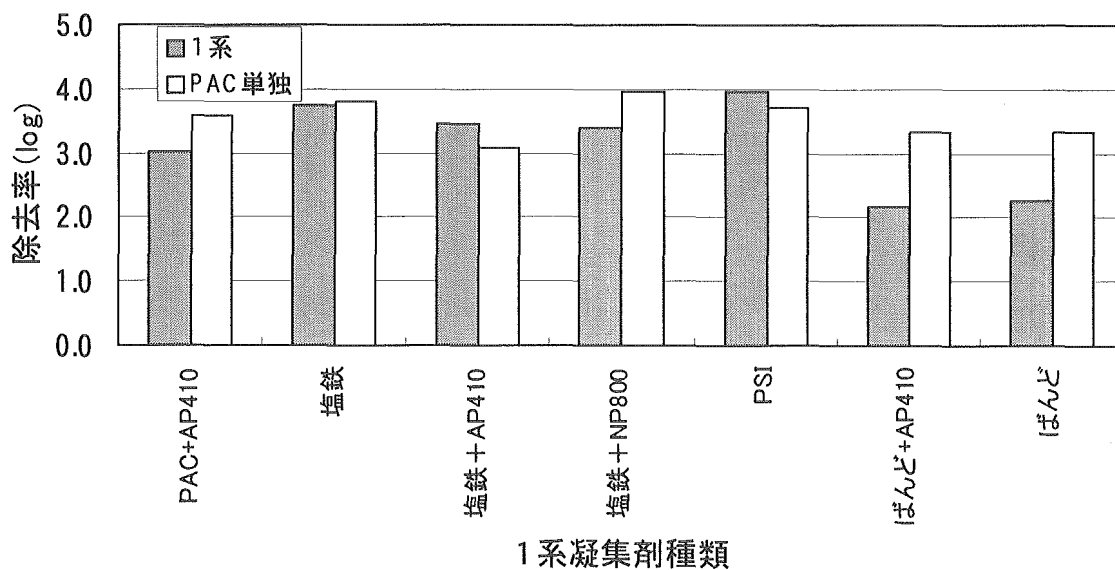


図-3.3 沈澱+ろ過におけるトレーサー除去率（高水温期）

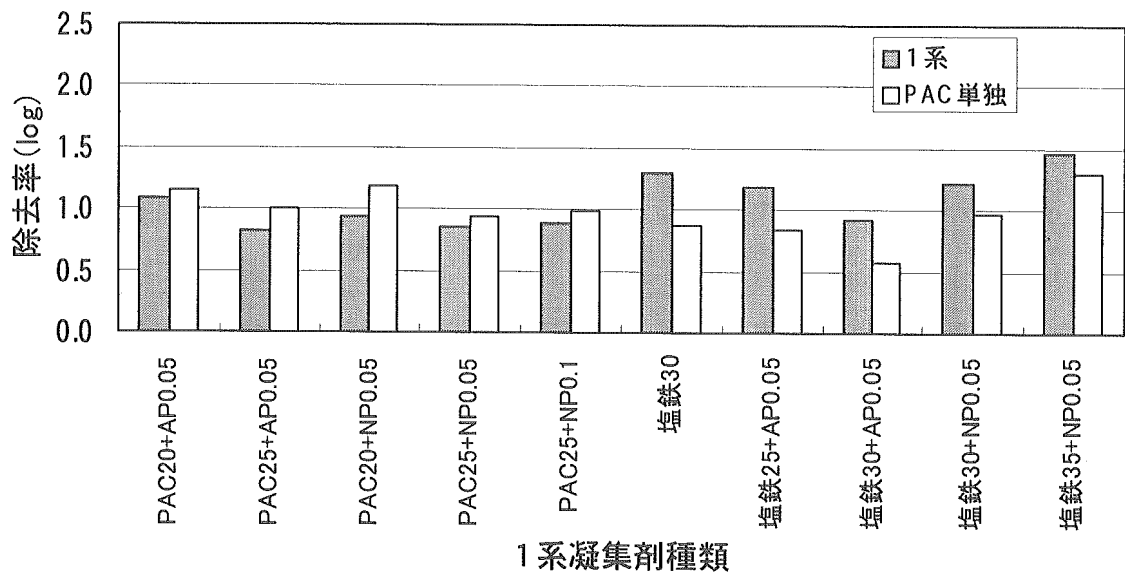


図-3.4 沈澱池におけるトレーサー除去率（低水温期）

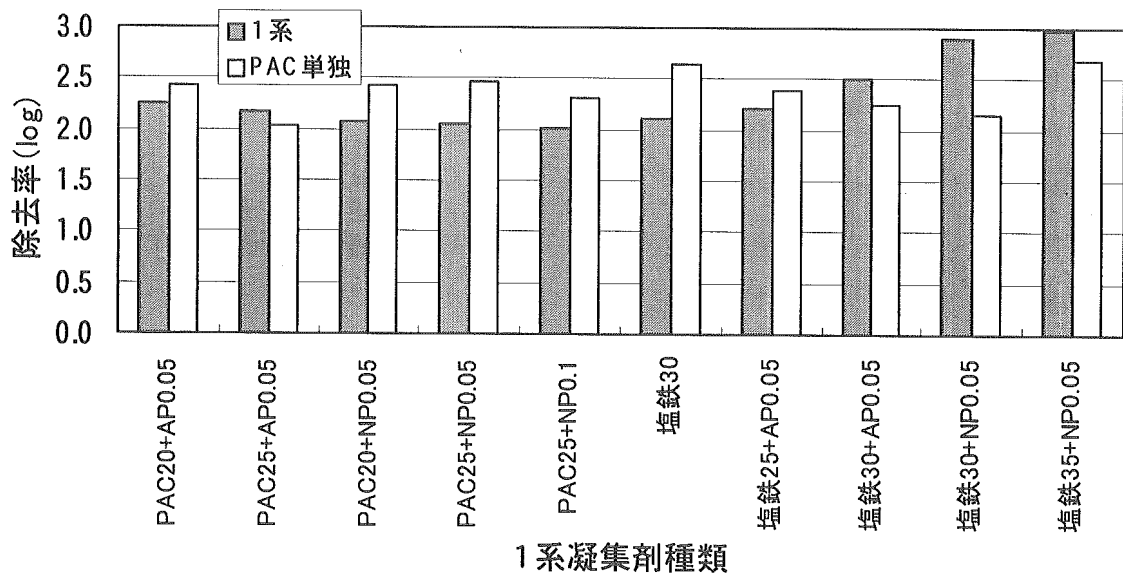


図-3.5 単層ろ過塔におけるトレーサー除去率（低水温期）

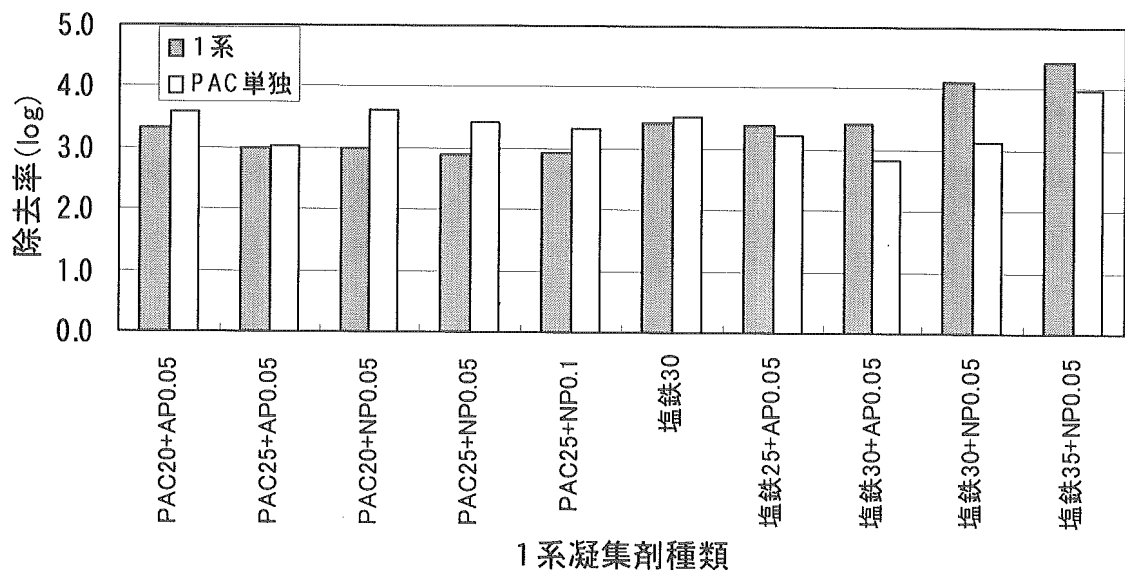


図-3.6 沈澱+ろ過におけるトレーサー除去率（低水温期）