

2. 設計の状況

シングルランプは年間の使用コストが低いため人気があるようである。今まで通り、危険な病原体は群体を形成し、紫外線から逃れることができる。水中の微細粒子は光から病原体を守ることができ、完全な UV 消毒を妨げる結果となる。

3. 次世代の UV 設計

UV 処理の新しい進歩は従来の UV システム設計とは根本的に違ったものになってきた。現在の UV システムの設計の転換により、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。

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。

4. 安全第一

UV 技術の劇的な進歩は、最大の安全性と、利用可能な最も信頼できるシステム獲得する方法を研究することから始まった。すべての UV システムは、NSF 標準の 55A-UV による微生物水処理システムに適合しているかどうかについて試験され、証明されなければならない。

5. 結論

NSF 標準や 2003 年春に発表された地下水に関する新しい USEPA 決定に関する意識はますます増えてきており、UV の採用は今後進むものと思われる。

コンピュータシミュレーションによるUV消毒反応設計の最適化

Computer Simulation Optimizes Design of UV Disinfection Reactors

Eugen Nisipeanu ら

要約

本論文はCFD（コンピュータによる流体力学）手法を用いてUVエネルギーの算定を行った。このエネルギーを算出するため、さまざまな水質に対するUV照射効果を利用した。また、CFD手法は、その他の方法を用いるよりも、多くの設計を評価することができる。

コンピュータシミュレーションにより、UV技術による水の消毒の設計技術を向上させることができる。

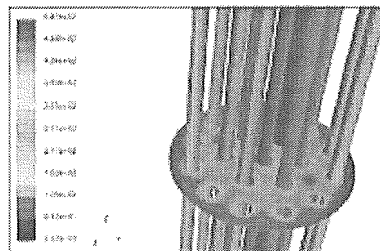
規制に関する全ての項目

水が原因となる病気を防ぐため、水の消毒は厳しい規制によるコントロールされている。これらの規制の典型的な項目は、水浄化工程、汚染物質除去、配水水質、消毒方法がある。

設計プロセスの向上

UVによる消毒システムの設計に対する新アプローチは、設計工程の顕著な向上、及び建設費の削減、またUVによる消毒の維持管理費の削減である。

Figure 1. Contour plot of radiation field in cross-section through UV reactor



NOTE: Intensity of radiation field is much higher near the lamps and magnitude decreases rapidly as distance from the radiation source increases. This helps explain why the flow of fluid through the disinfection system is so critical to providing each microorganism with a deactivating dose of radiation.
Courtesy of Atlantic Ultraviolet Corp.

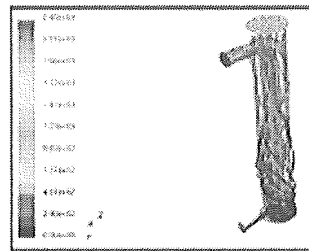
(注釈1)

放射線強度は照射ランプに近いほど増加傾向にあり、放射線源から離れると減少傾向にある。この結果はなぜ消毒システムにおける流体流れが、放射線の照射の非活性化をとめない、それぞれの微生物への供給においてとても重要であることを示している。

照射モデルの向上

照射モデルは本シミュレーションにおいて重要な役割を果たしている。細菌類に効果のある波長は250~270nmである。ランプによる照射強度は発生源から離れるに従い減少する。

Figure 2. Particle tracks through the flow and amount of UV dose



NOTE: Maximum UV dose accumulated by a particle is toward the UV system outlet, after the particle passed through the lamp region and was irradiated by the radiation field. Also, particles traveling through middle of active area tend to be exposed to a higher radiation field and hence accumulate more UV dose.
Courtesy of Atlantic Ultraviolet Corp.

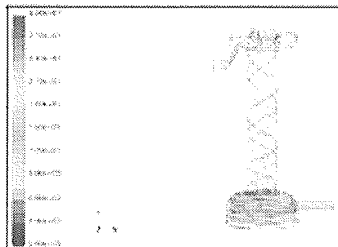
(注釈2)

粒子により蓄積されたUV照射の最大値は、UVシステムからの流出により、粒子のランプ通過後、また、粒子は照射場所において蓄積される。更に、照射中心部を通過する粒子は高放射能に暴露される傾向にあるが、更に蓄積されたUV照射を浴びる。

まとめ

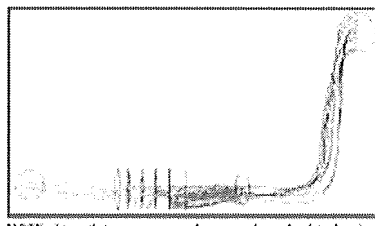
CFDは異なるレベルの水質を使用することにより、異なる配置・水理条件・エネルギー水位複数の反応槽の比較を行うことができる。技術者によると、プロトタイプとテストによる費用を削減するため、性能に対する詳細情報は、CFDによりプロトタイプ以上に最適にすることとなる。この観点は、従来より多くの設計評価を行うことができる。結果として、技術者は最適化設計を高レベルで行い、短絡的思考を排除し、水頭の縮小化、全エネルギーの削減、経験的理論を用いたものより効果的な消毒システムを構築することができる。ここで、CFDシミュレーションは検査結果を比較し、物理試験を伴った相互関係を供給し、結果を比較することができる。

Figure 3. CFD software tracking particles and computing UV dose



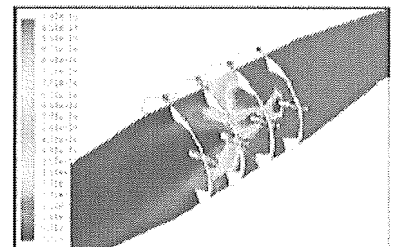
NOTE: Particles accumulate largest doses as they pass through the lamp region and move toward the system outlet.
Courtesy of Veolia Environment

Figure 4. Random particle tracks through UV reactor



NOTE: At outlet, an average dose can be calculated using statistical methods.
Courtesy of Metropolitan Water District of Southern California

Figure 5. Generic organism concentration passing through UV reactor



NOTE: This method is based on solving a transport equation for bacteria concentration. Rate of bacteria inactivation is included in source term and is a function of bacteria type, intensity of radiation field, concentration of bacteria at a certain location, and density of the carrier fluid. CFD predicted an inactivation rate within 5% of measured values through bacteriology techniques.
Courtesy of Metropolitan Water District of Southern California

(注釈3)

粒子は蓄積された照射場所を通過するに従い、多くの照射を浴び、システム流出側へ移動する。

(注釈4)

流出地点において、平均的な照射は静的理論を使用して計測される。

(注釈5)

この理論はバクテリア濃縮のための輸送方程式解決法に基づいている。バクテリアの不活性化率は発生期間、輸送流出濃度による。CFDは想定する生物的技術をとおして不活性化率5%測定を想定する。

高度処理による下水処理水の農業への再利用
紫外線消毒による寄生虫の除去および副生成物の生成

Advanced treatment for municipal wastewater reuse in agriculture. UV disinfection : parasite removal and by-product formation.

Lorenzo Liberti ら

1. 概要

100m³/h のパイロットプラントを用い、下水の二次処理水（沈殿処理水及び砂ろ過水）の UV 消毒における寄生物、副生成物への影響確認実験を行った。この実験により、UV 照射による寄生物（ジアルジア、クリプトスポリジウム）の除去性が認められ、消毒副生成物の生成は認められなかった。また紫外線消毒の維持管理費は 17~35 ユーロ/1000m³ であった。

2. キーワード

UV 消毒, 消毒副生成物, 寄生虫（原虫）, 沈殿処理水, 砂ろ過水, 維持管理費（O&M）

3. 実験方法

fig.1 に示す 100m³/h のパイロットプラントを用い、以下の 2 種類の下水処理水を注入、調査を行った。

- ・ 沈殿処理水（CL : clarified） : WBSP（イタリアの下水処理施設 : West Bari (S. Italy) municipal wastewater）からの処理水を直接実験プラントに導入した。
- ・ ろ過水（F : clarified-filtered） : CL を実験プラント（図 : MF）内にて砂ろ過処理を行った。

紫外線消毒は、図の UVA にて行われ、処理水は低圧水銀灯に囲まれたテフロンチューブ内を流れる。

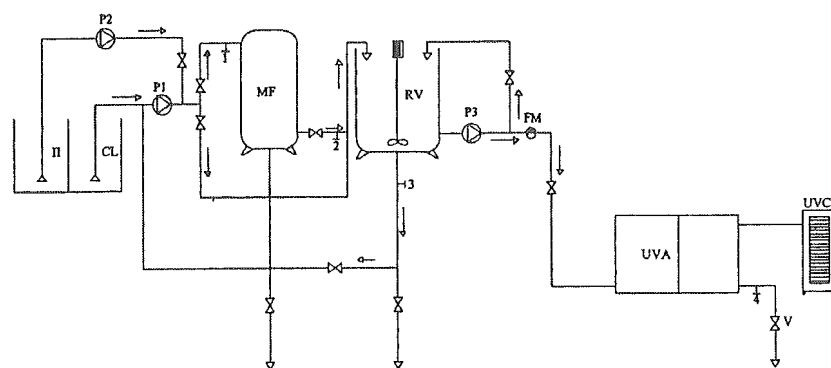


Fig. 1. Pilot plant configuration during UV disinfection experiments (MF, multilayer pressure filter; RV, 5 m³ fibre-glass vessel; UVA, non contact Teflon UV apparatus; UVCP, UV control panel; P, pumps; FM, flow meter; V, valve).

紫外線照射量を処理水 F 及び CL に対してそれぞれ 100, 160mWs/cm² 行い（イタリアの微生物基準値である大腸菌 2CFU/100ml を目標とする），紫外線消毒前後の線虫類，ジアルジア及びクリプトスポリジウムを調査した。各種分析手法は“Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.19th ed., American Public Health Association”に準拠した。

消毒副生成物としてニトロフェノール及び N-ニトロソアミンに着目し，紫外線消毒による生成状況をガスクロマトグラフ/質量分析装置及び液体クロマトグラフ/質量分析装置を用い “Standard Methods” に準拠し分析した。

4. 結果及び考察

4. 1 寄生虫の除去状況

処理水 F 及び CL に対して紫外線消毒を行った結果を以下の table1 に示す。線虫類は紫外線消毒前後とも存在が認められなかった。これは線虫類が他の原虫に比べ大きく重いため，沈殿処理及び砂ろ過の時点で除去されていると考えられる。一方ジアルジア及びクリプトスポリジウムは処理水 F 及び CL ともに存在が認められ，特に処理水 CL には処理水 F に比べ多量に存在が認められた。これらの原虫はその大きさから，沈殿処理水では除去されず，砂ろ過のみ有効であることがわかった。紫外線照射によるこれらの原虫の除去率は平均で 60%（ジアルジア），65%（クリプトスポリジウム）であった。

Table 1
Selected parasites before and after UV disinfection of clarified (CL) and clarified-filtered (F) feeds (UV dose: 160 and 100 mWs/cm² respectively)

Parasite	Feed	In	Out	% removal
<i>Nematodes</i>	CL	0	0	—
eggs (N/I)	F	0	0	—
<i>Giardia lamblia</i>	CL	345	156	55
cysts (N/I)	F	114	44	62
<i>Cryptosporidium</i>	CL	23	8	65
<i>Parvum</i> oocysts (N/I)	F	6	2	67

4. 2 消毒副生成物の生成

fig2~5 に処理水 F 及び CL について紫外線消毒前後のニトロフェノール及び N-ニトロソアミンのガスクロマトグラフを示した。各処理水、対象物質とも全体的にスペクトルは似通っていた。ただし、検出限界が 0.01ppb であり、それを超える濃度レベルの窒素誘導体は除外する。

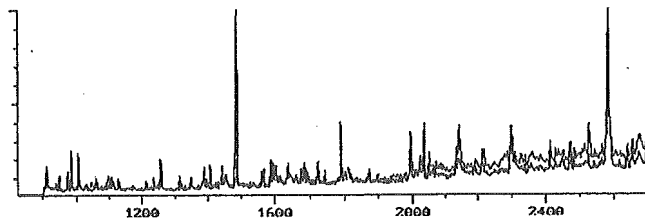


Fig. 2. Nitro-phenols search: GC/MS spectra of F feed before and after UV disinfection (100 mWs/cm²).

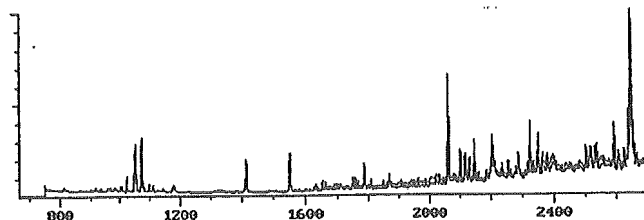


Fig. 3. N-nitroso-amines search: GC/MS spectra of F feed before and after UV disinfection (100 mWs/cm²).

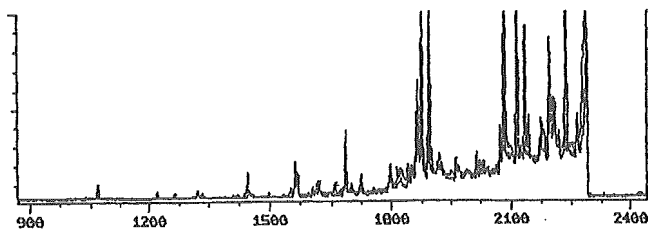


Fig. 4. Nitro-phenols search: GC/MS spectra of CL feed before and after UV disinfection (160 mWs/cm²).

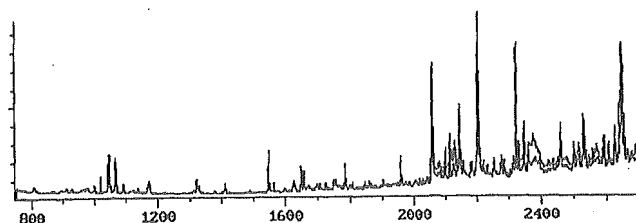


Fig. 5. N-nitroso-amines search: GC/MS spectra of CL feed before and after UV disinfection (160 mWs/cm²).

また、不揮発性の消毒副生成物はガスクロマトグラフ/質量分析装置では検出できない。したがって、液体クロマトグラフ/質量分析装置を用いなければならない。

そこで、追加実験として回分式の紫外線反応槽を用意し、処理水 CL500ml を採取し反応槽内にて 25,000mWs/cm² の紫外線を照射させた。その後 25 倍に処理水を濃縮し、ポストカラム式液体クロマトグラフ/質量分析装置にて紫外線照射の影響を調べた。スペクトルを表に示す。照射の有無による大きな違いは認められなかった。

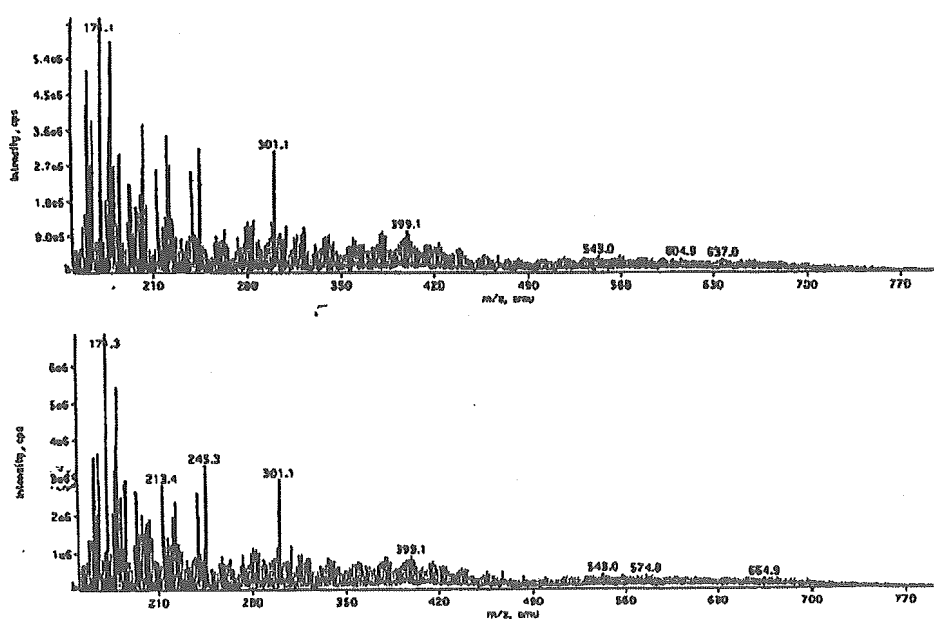


Fig. 6. Post injection LC/MS spectra of lyophilized samples of CL feed before and after UV irradiation (25,000 mWs/cm²).

4. 3 コスト評価

紫外線消毒による下水処理水の農業への再利用に対する経済的実行性を検討するため、本実験結果を基に維持管理費 (O&M cost) を算出した。

O&M cost は以下の仮定の下に算出した。

- ・ O&M cost は電力消費量、紫外線灯の取替え、装置の維持管理費及びその他修繕費にかかる費用を計上する。
- ・ 紫外線照射装置の電力消費量は 3.1kWh とする。
- ・ 電気料金は 0.065 ユーロ/kWh とする。
- ・ 紫外線灯 (1 個 45 ユーロ) は 8,760 時間で取り替える。

処理水 F 及び CL について、大腸菌 1CFU/100ml の処理目標で紫外線消毒を行った場合

の O&M cost 算出結果を以下の表に示す。処理水 CL 及び F についての費用はそれぞれ 35, 17 ユーロ/1000m³ であった。ちなみにイタリアにおける下水処理水の海域への放流基準値は大腸菌で 20,000CFU/100ml であり, WBTP ではこの基準目標に対して 5 ユーロ/1000m³ の費用で塩素注入を行っている。

Table 2
Cost estimates for UV disinfection of CL and F feeds at West Bari pilot plant

Feed	UV dose, mWs/cm ²	Total coliforms target achieved, CFU/100 ml	O&M costs, €/1000 m ³		
			Electric power	Lamp replacement	Total
F	100	1	6.7	10.6	17.3
CL	160	1	13.5	21.3	34.8

5. 結論

- ・ 紫外線消毒によりジアルジア及びクリプトスポリジウムはそれぞれ約 60, 65%の除去性が認められた。しかし線虫類については沈殿処理及び砂ろ過によってすでに除去されるため、紫外線消毒による効果は認められなかった。
- ・ 下水処理水中の寄生虫の除去に関して、紫外線消毒の前段に沈殿処理及び砂ろ過を行う複合的処理が有効であることが確認できた。
- ・ ガスクロマトグラフ/質量分析及び液体クロマトグラフ/質量分析結果によると、紫外線処理水中において窒素誘導体（ニトロフェノール及び N-ニトロソアミン）は不揮発性消毒副生成物を除き、検出されなかった。
- ・ 紫外線消毒の O&M cost は処理水 CL 及び F それぞれ 35, 17 ユーロ/1000m³ であった。

水性銀を使用した UV 照射による MS-2 不活化向上

Use of Aqueous Silver To Enhance Inactivation of Coliphage MS-2 by UV Disinfection

Michael A. Butkus ら

1. 概要

ウイ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。

2. はじめに

銀の滅菌効果は 1800 年の半ばから良く知られている。何時間か接触すると、銀は大腸菌やウイルスに対し若干効果がある。水の場合、滅菌活性が見られる濃度では、銀は無味、無色、無臭であり、哺乳類細胞に視覚的有害な影響を与えない。銀が健康に与える悪影響として、銀沈着症(アルジリア)、皮膚や粘膜の不可逆的な黒ずみが知られており、長期間の銀治療からなる。さらに、アメリカの環境保護庁の水質基準に銀は含まれていない。消毒剤として銀を使用する際、二つの短所として挙げると、長い接触時間及び銀耐性菌がある。

銀と異なって、UV 消毒は大規模浄水処理及び下水処理に適している。UV 消毒はクリプトスポリジウムやジアルジア原虫、原生動物の不活化に有効であり、消毒副生成成分をあまり生成しない。UV 消毒で考慮すべき事項としてコストが述べられる。UV 消毒に必要なエネルギーは UV 強度(放射照度と露光時間)による。UV 強度が高いほどコストが高くなる。UV 強度は不活化したい菌により異なる。浄水処理で UV 強度は、 $40\sim 140\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ の間にある。三次元処理で、 $4\ \text{logs}$ (=99.99%)のアデノウイルスの不活化には、 $170\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ と高い UV 強度が用いられる。この結果から分かるように、大腸菌の不活化に十分な UV 強度(例: *Escherichia coli* には $8\text{mJ}/\text{cm}^2$) はヒトのアデノウイルスの不活化には不十分である。UV 消毒耐性が高いと報告されているウイルスは、UV 強度の要求に影響を与える可能性がある。

UV 強度の削減とそれに伴うコスト縮減は消毒複製成分を除去し、原虫、原生動物の不活化を

改めたい市町村には魅力的な UV 消毒である。UV 放射線でウィルスの不活化を改良できればこの目的は果たせる。

1973 年 Rahn 等は、銀陰イオン（以下銀と省略）が DNA と錯体でき、光反応が高くなると報告した。この現象は、光生物学に有益な手段であることを仮定した。この現状は、浄水処理や下水処理に使用される UV 消毒の改善になることも仮定されている。

本論文の目的は①病原性ウィルスの代理である大腸菌ファージ MS-2 (以下 MS-2 と省略) の不活化を目的とした銀と UV 放射線の相乗効果を決定。②銀濃度及び UV 強度の関数として、MS-2 の不活化の定量化。③ MS-2 の不活化に用いる銀と UV 放射線の相乗効果を定量化するためのシンプルなモデル（改良 Click-Watson 消毒モデル）の開発。

平均 UV 強度($\text{mW} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ または mJ/cm^2) は次式で求められた：

$$\text{UV 強度} = 0.975 \cdot E_0 \left[\frac{1 - 10^{-a \cdot L}}{a \cdot L \cdot \ln(10)} \right] \text{PF} \cdot \text{DF} \cdot t \quad (1)$$

E_0 : サンプルの中心で計った UV ランプの強度 (mW/cm^2)

a : サンプルの吸収係数 (cm^{-1})

L : サンプルの深さ (cm)

t : 露光時間

DF : 拡散係数

拡散係数は次式で求められた：

$$\text{D.F} = \frac{Z}{Z+L} \quad (2)$$

Z : サンプルの表面からランプへの距離 (cm)

3. 結果と考察

MS-2 は大規模 UV リアクターの実証ベンチマークとして提案されており、ノロウィルスの様な病原性腸内の代わりとしても提案されていることから本実験に用いられた。

図 1 は MS-2 不活化に使用された銀 ($0.1 \text{mg}/\text{liter}$)、UV 放射線 (UV 強度 $40 \text{mJ}/\text{cm}^2$ 、式 (1) により $37 \text{mJ}/\text{cm}^2$ に補正、 $a = 6.4 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$ 、 $Z = 86 \text{cm}$ 、 $\text{DF} = 1.00$) 及び銀と UV 放射線の組み合わせを示す。

水処理に推奨 UV 強度は $40 \text{mJ}/\text{cm}^2$ と提案されていることからターゲット UV 強度として本実

験で使用された。

銀（接触時間 130 分）を使用した場合と UV 放射線を単独の場合、それぞれの不活化は $0.28\log(47.25\%)$ と $1.87\log(98.65\%)$ となった。

同銀濃度で接触時間を 10 分とした時、不活化は測定不可であった。

銀の後に UV 放射を続けて行った場合（銀接触時間 10 分） $3.30\log(99.95\%)$ 不活化の相乗効果が示唆された（列 4）。

UV 放射後に 120 分銀で中和する事により（銀計接触時間 130 分）不活化は $3.49\log(99.97\%)$ に増加した（列 5）。

列 3 と列 5 の違いは統計的に有意（ $P < 0.0001$ ）であることが示唆された。

この結果は銀と UV 放射線の組み合わせに鮮明な相乗効果があることを示す。

列 4 と列 5 の不活化増差は列 1（ 0.1mg 銀/liter, 接触時間 130 分）と比べられる。

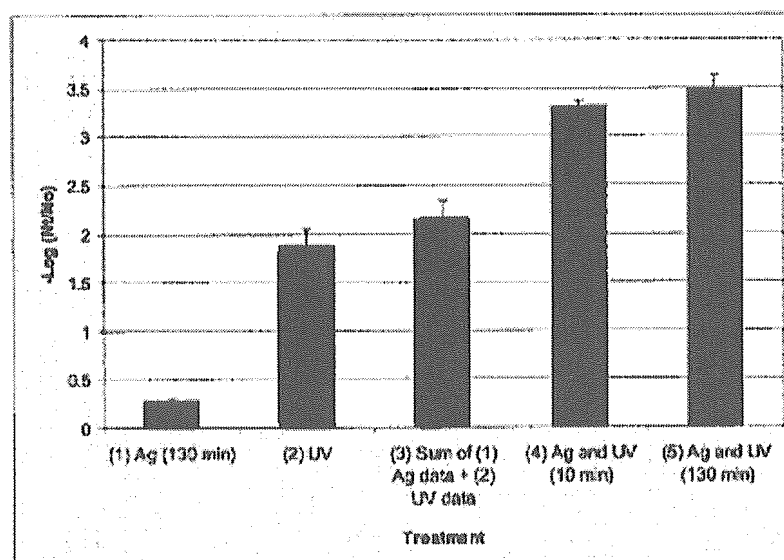


図 1 UV 照射及び銀添加による MS-2 の不活化

列 1 は銀（ 0.1mg/liter , 130 分）を用いた時の MS-2 の不活化，列 2 は UV 放射線（ $\text{ca.}40\text{mJ/cm}^2$ ）を用いた時の MS-2 の不活化，列 3 は列 1 と列 2 の合計，列 4 は銀（ 0.1mg/liter , 10 分）続いて UV 放射線（ $\text{ca.}40\text{mJ/cm}^2$ ）と早急銀で露出（10 分中和），列 5 は銀（ 0.1mg/liter , 10 分）続いて UV 放射線（ $\text{ca.}40\text{mJ/cm}^2$ ）と早急銀で露出（120 分中和）。列 3 と列 5 の違いは統計的に有意（ $P < 0.0001$ ）であることを示す。エラーバーは 1 標準偏差を表す。

図 2 では、MS-2 不活化の関数 UV 強度データ及び 73 分間銀（ 0.05 もしくは 1mg 銀/liter）露出後、UV 放射線に露出した MS-2 サンプルデータを示す。

培養時間が銀と UV の相乗効果に与える影響を評価していなかったため、培養時間を 73 分に設定した。その後、銀培養時間は相乗効果に影響しないことがわかったが、銀のみで不活化した場合、銀培養時間は不活化を増強する。

0.05 及び 1mg 銀/liter の銀と UV 放射線で 73 分接触した後、MS-2 の不活化はそれぞれ 0.3 及び 1.2 logs より低い値であった。この結果は、銀を使用した MS-2 不活化の文献と一致する。

銀濃度が 0.05mg/liter (USEPA 第 2 級飲料水水質基準 0.1mg/liter の半分) の場合, 4 logs (= 99.99%) の MS-2 不活化に必要な UV 強度は 45% 減少した (95 から 52 mJ/cm²)。20mJ/cm² UV 強度及び 0.05mg/liter の銀濃度では MS-2 不活化は 2-logs (= 99.9%) に達した。

将来, UV 消毒で MS-2 不活性の焦点が 2-logs に移れば, 0.05mg/liter の銀濃度を UV 消毒時に追加する事により, UV 強度を 40 mJ/cm² から 20 mJ/cm² に減少することが可能になる。

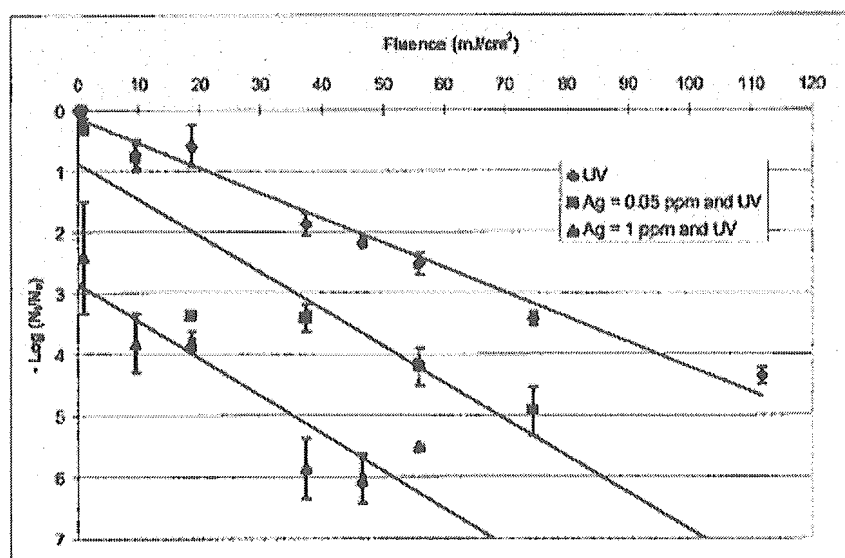


図 2 MS-2 不活化の関数 UV 強度及び銀濃度 (リン酸緩衝液に pH7.2 で溶解)。

UV 強度データ (◆) は UV のみ時原点を通過する。銀を含むサンプル (■及び▲) 内, 低 UV 強度は (1 mJ/cm²)。最初に銀 (0.05 もしくは 1mg 銀/liter) で露出されたサンプルは 73 分 (指定された UV 強度に達する時間を含む) 培養された。エラーバーは 1 標準偏差を表す。

UV を用いた MS-2 不活性の本論文データを文献と比較検討を行うため, 図 2 のデータを一次関数に一致させた (銀無の場合, 勾配 = 4.1×10^{-2} cm²/mJ, y 切片 = 0.13, R² = 0.98; 5×10^{-2} mg 銀/liter の場合, 勾配 = 6.0×10^{-2} cm²/mJ, y 切片 = 0.87, R² = 0.83 そして 1.0mg 銀/liter の場合, 勾配 = 6.1×10^{-2} cm²/mJ, y 切片 = 2.85, R² = 0.84)。

Thurston-Enriquez 等は, MS-2 不活性 (リン酸緩衝液を使用) 勾配 = 3.1×10^{-2} を報告した。本論文の 4.1×10^{-2} (銀無添加の MS-2 不活化) と比べても遜色が無い。

銀-UV データの回帰直線勾配は銀のみの勾配より若干高い。Y 軸は銀に相当するため, y-切片値は銀濃度及び銀培養時間の関数である。一次関数で得られた y-切片値は 73 分銀接触のみ時より多少高い (図 3 参照)。この結果から, 低 UV 強度 (1 mJ/cm²) でも銀と UV の相乗効果が明らかとなった。また, 銀と UV の関数相乗効果を評価するため, 特に低 UV 強度の場合, 非線形モデルが的確である。

銀を使用しない, UV 放射線のみ MS-2 不活化データは他の文献と適合する (図 2)。不活化曲線にはさほど分布がなかったことから MS-2 は群をつくる傾向が無いと言える。銀添加の場合, 複製実験の変動は UV のみ時に比較して大きかった。理由として, 銀は MS-2 やリン酸緩衝液に含まれた粒状物質及び可溶物質と複合するとからだと考えられる。銀は培養基の一般

的な構成物質やアミノ酸と複合すると報告されている。本論文で評価した浮遊物質は UV 放射線に対し “自由要求(demand free)”と定義したが、恐らく銀に対しては自由要求とは言えない。

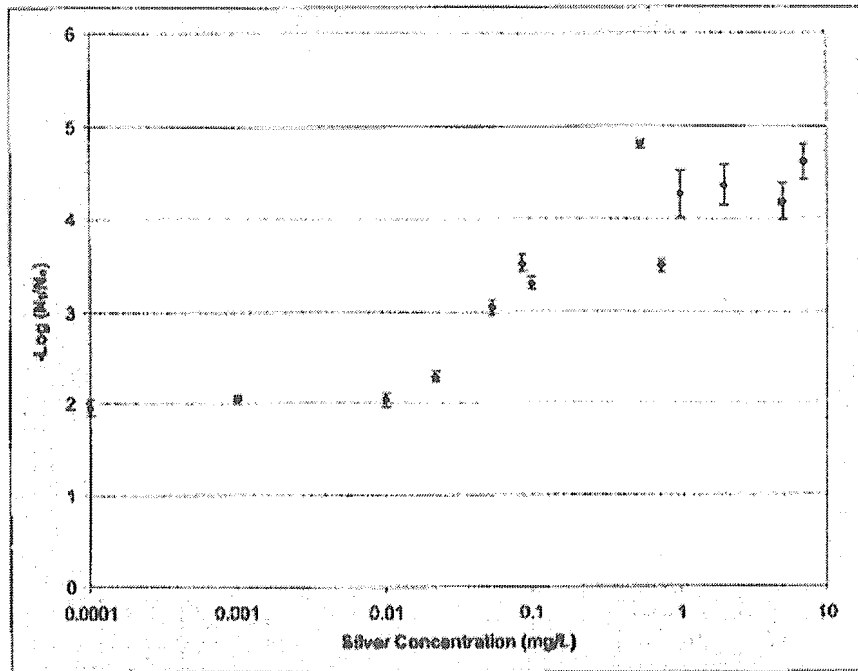


図3 銀濃度によるMS-2の不活化

MS-2不活化の関数銀濃度 (UV強度が ca. 40mJ/cm²)。銀培養時間は10分。エラーバーは1標準偏差を表す。

図3はMS-2不活化の関数銀濃度 (UV強度 ca. 40 mJ/cm²程度, 37 mJ/cm²に修正)を示す。銀濃度が0.01~1 mg/literの場合、銀とUVの相乗効果は最も敏感に反応した。銀濃度を1 mg/liter以上では、不活化の増加は見られなかった。

UV強度は40 mJ/cm²に規制されると予想されている。このUV強度値では、銀低濃度(10μg/liter, P,0.0615)でも銀とUVの相乗効果が見られた。同UV強度で、銀濃度が0.01mg/liter時に、3.7 logs(99.97%)のMS-2不活性が見られ、銀無添加 (MS-2不活化 1.8-logs, 98.42%)と比較すると顕著な改善(P<0.0001)が見られた。

Chick-Whatson消毒モデル微生物の不活化データに適していると報告されている。このモデルはUSEPA表流水処理法の基準(浄水処理の消毒を支配する)でも用いられる。

本論文ではChick-Whatson消毒モデルの接触時間をUV強度で置換し修正した。この修正モデルは銀とUV放射線の相乗効果をモデル化するために用いて、次式で表す。

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -kC^nH \quad (3)$$

C:銀濃度(mg/liter)

H:UV 強度(mJ/cm²)

n: 希釈係数

k:固体激滅定数(mg/liter)⁻ⁿ/(mJ/cm²)

実験に基づいた定数 k 及び n は 4-log 不活化で決定された。この条件下では、n=0.31 で $k=0.57[(\text{mg/liter})^{-n}/(\text{mJ/cm}^2)]$ となる。希釈係数(n)は 1 以下であることから、UV 強度の比例変化は銀濃度の比例変化より不活化に影響を与えるであろうとモデルは予測する。この結果は図 2 及び図 3 の結果と一致する。図 2 と図 3 によると UV 強度と同MS-2 不活化を得るためには、銀濃度は UV 強度に比べ数桁変わらないといけない。

UV 放射線は DNA のチミン及び RNA のウラシルの二量化の原因となっており、微生物の不活化につながる。銀は DNA や RNA の塩基配列と複合体を形成する。

Rahn 等は、銀と UV 放射線を同時に使用すると重原子効果によりチミン二量化に増加が見られ、ある UV 強度で *Haemophilus influenzae* の全面的な不活化を報告した。銀はタンパクと合成する。MS-2 キャプシドはタンパク質を含んでおり、銀がキャプシドに浸透し、MS-2 RNA と結合する能力はまだ良く知られていない。

一方、*H. influenzae* の銀-UV 放射線不活化メカニズムはMS-2 にも適用できるであろう。

銀と UV 放射線の相乗効果が RNA ウィルスの不活化に効果的であるがこの実験で初めて示された。DNA ウィルスの不活化にも効果的であると報告されているため、銀-UV 放射線の相乗効果はポリウィルス、ノロウィルスや腸溶性アデノウィルス等の病原性ウィルスにも効果的であると期待できる。

銀単独使用時と異なって、銀と UV 放射線の相乗効果を得るには長い培養時間は必要ない。実際、5 分の培養時間では 120 分の培養時間と同様の不活化 ($P<0.1534$) が見られた (0.05mg/liter 銀濃度, 40mJ/cm²UV 強度)。この結果より、銀と UV の相乗効果を得るためには長い培養時間は不必要であることが明らかになった。

この実験ではリン緩衝液を用いた。リン緩衝液は UV 放射線使用時に一般的なウィルス不活化のデマンドフリーシステム (demand-free system) として知られている。濁度、粒子数及び UV 吸光度は MS-2 の UV 消毒への影響が少ないと報告されている。Butkus 等は、硬度、塩素濃度及び濁度は銀を用いた大腸菌不活化に影響が少ないと報告した。予備研究によれば (図示なし)、20mgCl/liter の高い塩素濃度でも相乗効果に影響は見られなかった。

UV 消毒時 (例:ろ過後) の浄水や下水に含まれる塩素や一般成分の MS-2 や他の病原性最近への銀-UV 放射線相乗効果影響はさらなる研究が必要である。

飲料水処理に用いられる中圧及び低圧紫外線照射処理後の
大腸菌 DNA の回復性

Potential Repair of Escherichia coli DNA following Exposure to UV Radiation from
Both Medium- and Low-Pressure UV Sources Used in Drinking Water Treatment.

J.L. Zimmer¹ら

1. 概略

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°C 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。

2. キーワード

紫外線消毒, 大腸菌, 照射後の回復率, 低圧及び高圧照射, 照射強度

3. 実験方法

a) 紫外線光源

本研究における紫外線照射には、基準尺度に平行に設定された光線装置に収納の紫外線ランプを用いた。本装置は、12W (ワット) の低圧と、1kW の中圧とを切替えることが可能な水銀ランプである。低圧、中圧いずれの形式においても、紫外線検出器が付属するラジオメータにより、照射強度を測定する。器具はアメリカ国内研究所の標準にて調整されたものである。

紫外線照射強度は、検体を含む液体への平均照射強度に露光時間を掛けることにより決定した。

b) 微生物

大腸菌には十分な細胞密度を持たせる必要があるため、37°C の栄養状況下の水槽内とい

う最適な成育状況で培養した。

検体の量が限られていること、また検体抽出の時間が制限されることから、どの実験においても同じ実験を再現することが困難である。そこで、実験値を補正する目的から、いずれの照射強度設定においても少なくとも2度の同時実験を行った。そして、標準偏差を考慮した上で、代表的な実験値をデータとして提示した。

4. 結果及び考察

中圧と低圧の紫外線照射による、大腸菌回復率の最も顕著な違いは、照射強度8及び10 mJ/cm²にて現れた。10 mJ/cm²の低圧照射後、再活性光線下では2.8 CFU/mLが回復した（微生物濃度はCFU/mL：1ミリリットル当たりコロニー形成単位、にて示す。）。それに対し、同じく10mJ/cm²で中圧照射とした場合、回復は全く認められなかった。8 mJ/cm²の場合、低圧は2.6 CFU/mL、中圧は0.1 CFU/mLの回復を示した。さらに、5 mJ/cm²の場合、低圧は0.7 CFU/mL、中圧は0.1 CFU/mLの回復を示した。

また、暗室にて回復を試みた検体については、低圧、中圧いずれにおいても限定的な回復をするか、あるいは回復が認められなかった。

5. 結論

- ・ 飲料水処理で一般的に用いられている照射強度の小さな単色低圧紫外線照射よりも、多色中圧紫外線を照射した方が、微生物処理として有効である。
- ・ 30～180分といった短時間でも原水が光に曝されるような浄水行程がある場合は、その前段の行程として中圧の紫外線照射を行えば、微生物の回復に対する有効な防護策となる。
- ・ 低圧の紫外線照射は、照射後に微生物が急速に回復することから、微生物を含むような水に対する処理として用いることは控えるべきである。

水道水、下水および再生水における UV 消毒の比較検討
A COMPARISON OF UV DISINFECTION FOR DRINKING WATER, WASTEWATER,
AND RECLAIMED WASTEWATER

Harold B.ら

1. 概要

米国における UV 消毒の役割は変わってきている。UV の照射量に必要な条件は、UV 耐性ウィルスおよび UV に敏感な原生動物 (cysts/oocysts) の発見により変化する。UV は、一回の照射量を監視および検証に厳密な条件を課すことで、市営飲料水の消毒に導入されている。膜で濾過した後の再生水への UV の使用は、下水への使用よりも飲料水への使用法を適用する。この論文は、水質の影響、UV 照射量の必要条件、監視装置、および検証の点に重きを置きながら、飲料水と下水と再生水への UV 消毒の適用法の違いを議論している。これらの違いの評価は、それらの UV の必要性をより理解する点で、有効な手助けとなるだろう。

2. キーワード

紫外線 (UV) 消毒、飲料水、下水

3. 序文

アメリカの UV 消毒はここ 20 年間で相当な発展を遂げてきた。UV 消毒は 10 年間以上、アメリカの多くの下水処理施設で適用されている。1984 年に行われた初の下水の UV 消毒の適用は、低圧の UV システムを使用した活性汚泥法による 2 次流出水の処理を含んでいた (Whitby et al, 1984 年)。以後 16 年にわたって、UV 消毒の役割は、CSO (合流式下水道越流水) の処理、回転円盤処理および第三次濾過流出水の処理を含むものにまで拡大していった。低圧、低圧最高出力および中圧のランプを使用する下水の UV 消毒は、比較的十分に確立されており、20 mgd より大きな下水処理施設で実用されている。

それに比べると、UV 消毒は、市営の飲料水を扱うためにはまだ適用されていない。不活化を測定するために脱囊および活性化色素を使用する、ジアルジアとクリプトスポリジウムの不活化研究は、両方の病原体が UV に耐性を示すことを示唆したため、UV 消毒は考慮されなかった。しかしながら、UV 不活化のより適切な手段である動物感染力を使用する最近の研究は、これらの微生物が両方とも紫外線の影響を大きく受けることを示した (Bukhari et al, 1998 年)。消毒副生成物なしで低用量のクリプトスポリジウムおよびジアルジアを不活化する紫外線の能力は、USEPA に次の飲料水安全法に適合する技術手段の一部として UV の適用を促す。UV 消毒の適用を促進するために、USEPA は、クリプトスポリジウム、ジ

アルジア、ロタウイルスおよびアデノウイルスのための UV 照射量必要条件を含んでいる UV ガイダンス・マニュアル(UVGM)、および UV 消毒システムを設計し有効にするための手順を提供するだろう。

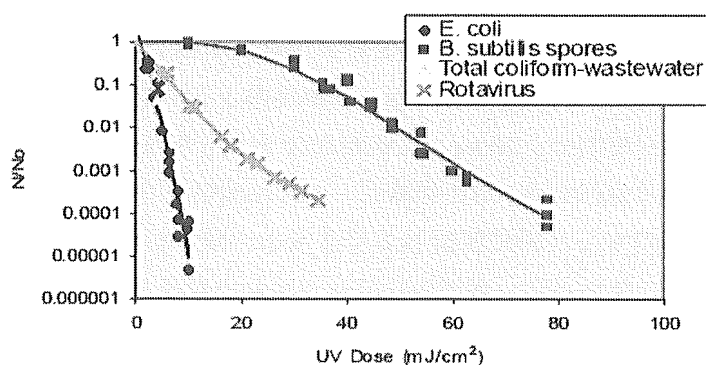
飲料水および下水処理の規律が従来どおり互いに独立する一方、飲料水中の UV 消毒の適用は、下水中の UV の適用から影響を受け、逆の場合もまた同様である。飲料水中のクリプトスポリジウム、ジアルジア、ロタウイルスおよびアデノウイルスのために開発されている照射量の表は、下水処理での照射量、特に膜濾過をした後の再生水の照射量の計算に効果がある。飲料水中の照射量の監視と検証の必要条件是、再生水の監視と検証の必要条件から直接的に影響を受ける。再生水中の UV の適用は、反応装置の検証と実施の必要条件に影響を与えてきた。

この論文は、下水、飲料水、再生水における UV 消毒の役割の比較調査について述べている。この研究は文字通り、飲料水用の USEPA UVGM の開発の発見を導いている。

4. UV 照射量と反応

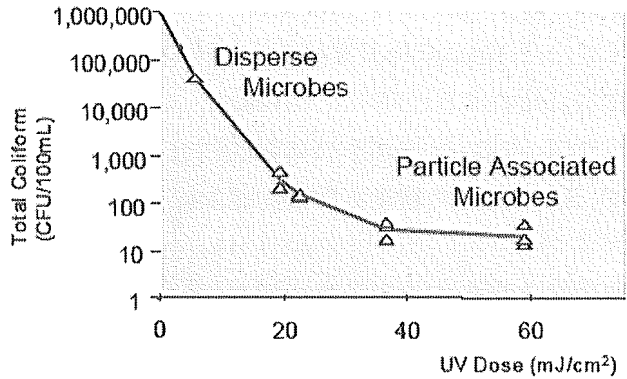
UV 照射量は、微生物の不活化を、適合された UV 照射量の効用として曲線で示している (図 1)。UV 照射量曲線の傾きは、紫外線に対する微生物の抵抗性を示している。UV 照射量の形は、微生物の種類に応じて著しく変化する。個々の微生物に分散した UV 照射量は MS2 段階の場合における一次速度式か、*B. subtilis* 胞子の場合における連続事象速度式のどちらかということになる。連続事象速度式は、ある限界照射量をこえる指数の減少によって導かれる低用量の段部によって特性を示す。微生物が粒子内に凝集または結合されると、それらは紫外線から保護され、不活化を得るために更に多大な照射量が要求される。ごく少量が粒子内に凝集または結合される微生物の個体群の UV 照射量は、UV 照射量としてのテーリング現象を示すことがある。

飲料水中の微生物の UV 照射量は、それらの微生物の凝集が低いか、あるいは微生物分析の検出の限界値以下にあるため、測定することが困難である。濾過した後の照射量は、濾過が粒状物質を除去するため、分散した微生物の曲線と同様になると仮定される。この仮定は、一次の濾過にはあてはまらないかもしれない。最近の研究では、鉄の凝析がテーリングを引き起こすことなく、MS2 の UV 照射量の傾斜を著しく減少させることがわかった(Petri et al, 2000 年)。これらの発見は、与えられた病原体を減少させるのに必要な UV 照射量が、凝固物によって起こる凝集および粒子の結合のために増加することを

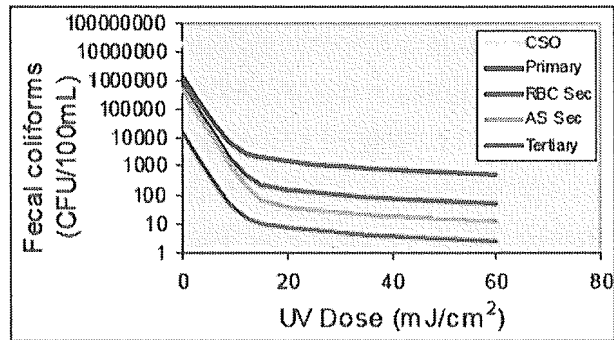


示している。したがって、凝析と濾過の間での UV の適用は避けるべきである。

下水中の微生物も、分散した固体か下水粒子内の範囲で存在する。下水粒子内に限定された微生物は、紫外線から保護され、不活化を達成するためにより多大な照射量を要求する。従って、UV 照射量曲線は 2 つの領域を持っている (図 2)。低用量では、照射量は比較



的に容易に不活化できる分散微生物を示す。高用量では、照射量は粒子内に結合した微生物の不活化を示している。多くの下水では、粒子内に結合した微生物に応じて照射量がテーリングし始める前に、3~4log の分散微生物の不活化が生じる (図 3)。この規則の例外が、凝固物が分散微生物を凝集するところで CSO の流出や、凝固した鉄およびミョウバンの流出を生じさせる。



照射線量による反応のテーリングは、下水のタイプに応じて変わる。CSO 流出は、主としてはおおよそ $10^7 \sim 10^8$ CFU/100mL の糞便性大腸菌の一次消毒濃度を持ち、 $10^4 \sim 10^5$ CFU/100mL で尾鉤の着手がなされる。第一次流出は、おおよそ $10^6 \sim 10^7$ CFU/100mL の一次消毒濃度を持ち、 $10^3 \sim 10^4$ でテーリングがあらわれる。第二次流出は、 $10^5 \sim 10^6$ CFU/100mL の一次消毒濃度を持ち、100~1000 CFU/100mL でテーリングがあらわれる。中膜濾過された第三次流出は、 $10^4 \sim 10^5$ CFU/100mL の一次消毒濃度を持っていて、5~50 CFU/100mL でテーリングが現れる。

規定の下水では、テーリングは 8 ミクロンを越える下水粒子の凝集に効果がある(Qualls et al, 1983 年)。これは、8 ミクロンのメッシュ・フィルタを通す前後に、下水サンプルの中で糞便性大腸菌の照射量を測定することにより実証される。TSS は、8 ミクロンを越える下水粒

