

る従属栄養細菌の総濃度にひとしい初期濃度にあると仮定した。(2) 各微生物の濃度は、微生物の量-反応曲線の最適直線近似による外挿によって、 $106\text{mJ}/\text{cm}^2$ の UV 暴露量において予測される微生物濃度まで減少させた。(3) 一日の総流量はより大きい方の流量を元にし、HRT を 2 時間 ($8.4\text{mL}/\text{min}$) とした。及び、(4) 5 つの環状システムの実験期間が 31 日から 42 日にわたっているため、実験期間を 40 日を用いた。RWC の計算例は次のとおりである。 $10\text{CFU}/\text{mL} \times 10^{(106(-0.31)+0.39)}$ (予想された不活化) $\times 8.4\text{mL}/\text{分} \times 1440\text{分}/\text{日} \times 40\text{日} = \sim 10^{22}$ 個の細胞数となる。

UV 照射系から採取された 4 つの微生物のうち、3 つの微生物の中からただ一つの細胞が実験期間にわたって UV 照射の耐え抜いたとしたらそれは極めてありえないことである。これら 3 つの細胞に対し、UV 照射系に流入する細胞数の理論的最大値は 10^{68} から 10^{13} にわたる。さらに、最も耐性のある微生物である 2-H2 において UV システム中に流入する細胞の理論的最大値は実験全体に対して 1CFU のオーダーであった。4 つ全ての微生物が UV システムの生物膜から採取されたという事実は、量-反応曲線から予測される程度より多くの微生物が UV 照射に耐え抜いたことを裏付けるものである。

4 つのバクテリアが予想される以上に生残したことの妥当な説明は、微生物が集団にいるか微粒子に付着しているために UV の光から遮られているということである。量-反応曲線を得るのに用いられた培養環境とは違い、UV の環状システムへの流入は蓋をされておらず、このため、実際の水処理プラントで起こっていることと似て、微生物集団や微粒子が存在する可能性がある。微粒子に関連する微生物の遮蔽により、UV 照射に対し生残率が増加することは、廃水の消毒や、飲料水（間接的に）において既に実験で示されていることである。

もし UV 照射に対し耐え抜いている微生物の大部分が微粒子により遮蔽されており、効果的に、UV 照射にさらされていない状態にある場合、プランクトン状態の細胞の UV 照射への耐性は生存を決定する上で大きな重要性を持つものではないと考えるのが道理である。その代わりに、微粒子や群集を形成する能力が UV 照射後の生存に貢献する微生物の主要な性格であろう。例外としては、UV に対し比較的耐性があり、微粒子による遮蔽がなくても UV 照射に対し生存できる微生物（おそらく 2-H2 系の微生物）であろう。微粒子遮蔽仮説は以下の観察結果に対しつじつまの合うものである；(1) UV 照射系の生物膜から分離された菌株は仮想した飲料水(RWC に代表される)中の平均的な微生物より UV 照射に対し常に耐性があるわけではない。(2) 対照実験系から分離された大腸菌は UV 照射系から分離された微生物より著しく UV に対し感受性が強いわけではない。

微粒子遮蔽仮説は DNA 指紋結果により支持される。もし、極めて UV 耐性のある微生物が UV システム中の生物膜の一部を形成して生存していさえすれば、UV システム中の生物膜群集が全ての実験において対照実験系とまったく異なったものとなると考えられるだろう。しかしながら、12-1 の実験では、UV 系と対照実験系で生物膜の DNA 指紋はほぼお互い見分けがつかない ($D_c=83\%$)。4 つの最も明瞭なバンドを含む 5 つのバンドが UV 系と対照実験系で共通に見られた (図 4)。残りの実験では、UV 系の生物膜群集は対照実験系のものとは非常に異なっている

($D_c < 50\%$)。

UV 消毒後の生存（個々の微生物の UV 感受性が低いため、あるいは微粒子遮蔽によって防御されるため）は微生物細胞がうまく群集して生物膜を形成することを保証するものではない。例えば、微生物細胞が UV 消毒を耐え抜いて生存したとして、反応槽表面に付着する前に反応槽外へ washout されるかもしれない。このようにして、高い付着速度と高い成長速度もまた、生物膜の形成において重要である。

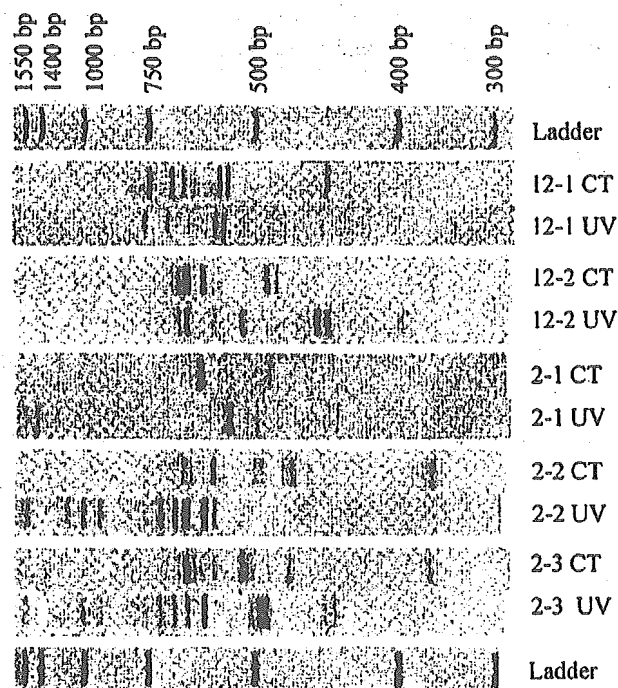


図 4 各実験の UV 照射系と対照実験系から回収した最終的な生物膜の ITS 指紋

3-3 生物膜中の大腸菌及び試料溶液

大腸菌は、UV 反応槽においてはいずれの HRT においても生物膜からは一つのサンプルからも検出されず、反応槽中の一つのサンプルからのみ検出された。対照実験系では両 HRT において全ての実験において反応槽中に検出されたにもかかわらず（個々のサンプルの濃度は、非検出～475CFU/mL にわたっていた）、生物膜中には 12-1 の実験において一つ検出されたのみであった。対照実験系の 12-1 の実験では、反応槽内の大腸菌濃度は $0.38 \pm 0.29 \log \text{CFU/mL}$ であり、生物膜中の平均大腸菌密度は $1.97 \pm 0.60 \log \text{CFU/cm}^2$ であった。

UV 反応槽において大腸菌が生存していないことの妥当な説明としては次のとおりである。UV 照射に対し、微生物はほとんど生存せず、本実験の条件では検出レベル以下となった。照射前の溶液中で、全微生物に対し大腸菌はわずかな割合を占めているため、生存する微生物中に残る可能性は小さいのである。

3-4 日和見感染性病原体の接着

日和見感染性病原体の仮想した侵入現象の間の反応槽中の平均濃度及び定常状態の生物膜密度を表3に示した。反応槽中の濃度はそれぞれの実験において二つのシステム間で統計的に違いはなく、UV照射系と対照実験系でそれぞれ平均が $3.28 \pm 0.25 \log \text{CFU/mL}$ と $3.27 \pm 0.24 \log \text{CFU/mL}$ であった。

日和見感染性病原体の定常状態の生物膜密度は、実験 2-2 及び 2-3 において UV 照射系の方が対照実験系より大きかったが、実験 12-1 においては逆に小さかった (表3)。これらの差異は統計的に有意であった。他の実験では、統計的に有意な差はなかった。これらのことから、仮想した侵入現象に関し、日和見感染性病原体の生物膜への付着能力に対し UV 消毒は一定の影響を与えることはなかった。

定常状態の日和見感染性病原体の密度を定常状態の従属栄養細菌の密度の関数としてプロットし、近似直線とともに図5に示した。一つの点が各実験の各システムの結果として示され、5つの実験による合計10点がプロットされている。仮想した侵入現象の間において、定常状態の生物膜中の従属栄養細菌と生物膜中の日和見感染性病原体の定常状態の密度との間において強い相関が見られた。相関を示す r^2 は 0.83 であり、定常状態の日和見感染性病原体密度中の 83% の変動が定常状態の従属栄養細菌の変動により説明がつくことを示している。95% の信頼区間の傾きはゼロを含んでおらず、二つの関係は統計的に有意であった。

表3 日和見感染性病原体の反応槽中の平均濃度及び定常状態の生物膜密度 (KP02 は実験 12-2 を、EC98 は他の実験を示す)

実験	反応槽内平均濃度 ($\log \text{CFU/cm}^3$)		定常状態生物膜密度 ($\log \text{CFU/cm}^2$)	
	UV	対照実験	UV	対照実験
	12-1	3.31 ± 0.96	3.35 ± 1.23	1.78 ± 0.04
12-2	3.01 ± 0.46	3.07 ± 0.41	1.50 ± 0.22	1.21 ± 0.39
2-1	3.59 ± 0.04	3.54 ± 0.03	2.87 ± 0.34	3.23 ± 0.07
2-2	2.90 ± 0.64	2.84 ± 0.70	2.74 ± 0.31	2.21 ± 0.17
2-3	3.31 ± 0.41	3.54 ± 0.38	3.52 ± 0.40	2.44 ± 0.57
平均	3.28 ± 0.25	3.27 ± 0.24	2.48 ± 0.65	2.33 ± 0.57

各々の実験の定常状態濃度及び密度を、別々の日に回収した2つあるいは3つのサンプルの平均値として計算した。

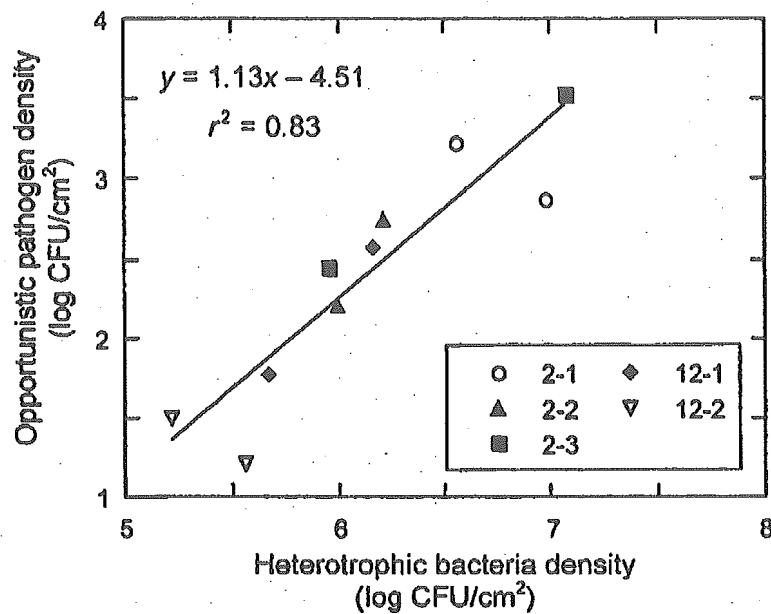


図5 生物膜中の定常状態の日和見感染性病原体と従属栄養細菌との間の関係

それぞれの点は一つの実験における UV 照射系あるいは対照実験系の結果を示す。白抜き記号は負の相関がある実験を示す。すなわち、HPC 密度が大きくなるほど、日和見感染性病原体密度は小さくなる（実験 2-1 及び 12-2）

4. 結論

(1) 高い UV 暴露を与えると、UV 照射系は対照実験系に比べ、対照実験系の方が流水中の成長できる微生物濃度が非常に高いために定常状態に早く達するものの、従属栄養細菌の定常状態の反応槽中濃度は著しく低くはならなかった。

(2) UV 反応槽における生物膜は、対照実験系に比べ、HRT の減少により与えられる高い栄養分の利用性に対し、より敏感であったが、これはおそらく生物膜は主に“セカンダリー”細胞により構成されているためである。対照実験系においては、反応槽溶液からの付着速度の大きさ等の他の要因が、栄養分の利用性に加え、生物膜中の従属栄養細菌の高い定常状態密度に著しく影響を与えている。

(3) DNA 指紋の結果は、UV 消毒はある特定の生物膜群集を選択するわけではなく、実際に UV システム中の生物膜群集は 5 つの実験のうち 1 つの実験において対照実験系とほぼ見分けがつかないことを示した。UV 照射に対し生存する微生物菌株の多様性は、UV 暴露が高いにもかかわらず、UV 感受性のある菌株が微粒子によって UV 照射から遮られているためである。

(4) 生物膜や反応槽中の微生物群集は、HRT が 2 時間の実験よりも HRT が 12 時間の実験の方がより類似性が高かった。保持時間が短くなればなるほど、生物膜相においては競争力が強くはない、反応槽中で成長速度が大きな微生物が選択された。

(5) UV 照射に対するプランクトン状態の微生物菌株の耐性は UV システムにおける生物膜中の

微生物菌株の存在を予測する上で大きな重要性を持つ。微生物は微粒子や群集となることによって照射から遮蔽されていた可能性があり、そのため UV 感受性の高い菌株ですら生存できる。そのような遮蔽効果による病原体の生存は実際の飲料水配水システムにおいても当然起こりうることである。

(6) 大腸菌は、全ての実験において（一つの反応槽溶液サンプルを除く）UV システムにおける反応槽中及び生物膜中においては検出レベル以下であったが、対照実験においては生物膜中で一つの実験で検出され、反応槽溶液中では全ての実験において検出された。

(7) 日和見感染性病原体の仮想した侵入現象中の付着は UV 処理によって著しく影響を受けたわけではなく、生物膜中の従属栄養細菌の密度と相関がみられた。

ロタウィルスの代用であるウイルス様粒子 (VLPs) の環境中における
持続性及び不活性化に関する検討
Rotavirus Virus-Like Particles as Surrogates in Environmental
Persistence and Inactivation Studies

Santiago Caballero ら

Enteric Virus Laboratory, Departments of Microbiology, University of Barcelona, Spain

キーワード: Virus-Like Particles, surrogates, GFP-VLPs, pseudoviruses, UV irradiation

1. 概要

ウイルス様粒子 (Virus-Like Particles, 以後 VLPs と略称) について, 病原ウイルス (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°C 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, 病原ウイ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。

2. はじめに

ロタウィルスは胃腸炎を引き起こすウイルスであり, 糞便-経口経由で感染する。ロタウィルス粒子は内側から VP2, VP6, VP7 蛋白層で構成されている。これらのキャプシド蛋白はバキュロウィルスシステムの中において, VLP の組み合わせで説明される。

ロタウィルスは汚染水中の貝類や汚染された飲料水中に存在し, 消毒が最大の対応策である。しかしながら, ウィルス消毒は時として病原ウイルスを的確に除去できない場合があり, 実環境中に病原を導入できないため, 今まで腸ウィルスの実環境中の動態を評価できなかった。VLPs は組み合わせにより多数のパターンが生成可能であるため, 病原菌の追跡に対して適しているといえる。加えて VLPs は無害であるため, 浄水施設や貝類の生育する水系に導入することが出来る。

本実験の目的は, VLPs が環境中の人的病原菌の動態モデルとして代用できるかを確かめることである。

3. 実験方法

(1) ロタウィルスの培養

ロタウィルスは感染させた細胞溶解液を遠心分離後、リン酸緩衝液に定着させ食塩水中にて-80℃で保存する。希釈倍率ごとに8つのサンプルを作り、1サンプルごとに原菌を20μL注入する。

(2) ロタウィルスのサロゲート物質の作成

VP2, VP6 のロタウィルスキャプシド蛋白で包んだ VLPs (以後 VLPs2/6 と略称) はバキュロウィルス発現システムを用い作成する。

蛍光 VLPs (以後 GFP-VLPs と略称) は、VP2 のアミノ基にクラゲ緑色蛍光蛋白 (Jellyfish green fluorescent protein, 以後 GFP と略称) を結合させて作成する。

RNA 含有粒子 (セドウィルス) はロタウィルス VLP2/6 から導入される異種 RNA を用いて作成する

それぞれのトレーサー粒子は塩化セシウムを用い、密度差分離処理を行う。加えてセドウィルスは Amicon フィルターを用いる過する。

(3) GFP-VLPs のフローサイトメトリーによるモニタリング

構造の破壊に伴い蛍光性が失われることを利用し、GLP-VLPs の減少状況を把握する方法である。

(4) Antigen Capture PCR 法によるセドウィルスのモニタリング

セドウィルスは RT 緩衝液を用い洗浄した後、99℃5分で加熱処理してモニタリングする。

(5) 対象水

飲料水としてスペイン・バルセロナの井戸水を、海水として地中海水を使用する。両サンプルは酸処理、ろ過後4℃で保存する。水質試験手順は“standard methods for the examination of water and wastewater”に基づき行った。

(6) 海水中における熱安定性の検討

海水中におけるロタウィルス、GLP-VLPs 及びセドウィルスの安定性を検証した。20±1℃において0~30日間浸透させ、各サンプルの減少状況を log(Nt/N0) (初期量に対する減少量の割合) を指標として評価した。

(7) 遊離塩素環境における安定性の検討

20±1℃, 遊離塩素濃度 0.2, 1.0mg/L の状況で0~120分かき混ぜ、各サンプルの減少状況を log(Nt/N0)を指標として評価した。

(8) UV 照射による安定性の検討

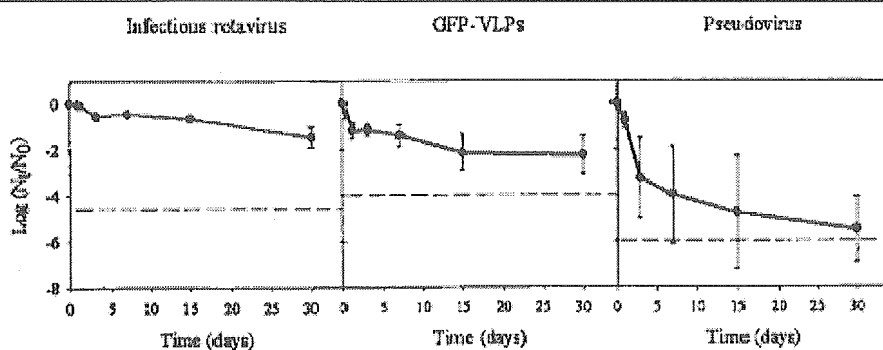
15-W の低圧 UV ランプを使用し、20cm 間隔で照射する。UV 強度は 254nm をラヂオメーターで測定する。サンプルはペトリ皿にて海水、飲料水に添加し、20±1℃で0~120分間かき混ぜ、各サンプルの減少状況を log(Nt/N0)を指標として評価した。

4. 結果

環境水の水質データを以下の表 1 に示す。また 20℃, 海水中におけるロタウイルス, GLP-VLPs 及びセドウィルスの安定性を図 1 に示す。ロタウイルス, GLP-VLPs は大きな変化は認められなかったが, セドウィルスは減少が認められた。

表 1 各水質項目

種目	pH	A254	A650	A720	電気伝導度 (mS)	塩分濃度 (%)
飲料水	7.8	0.0118	0.0078	0.008	0.73	0
海水	7.92	0.0269	0.0094	0.0086	18.79	3.5



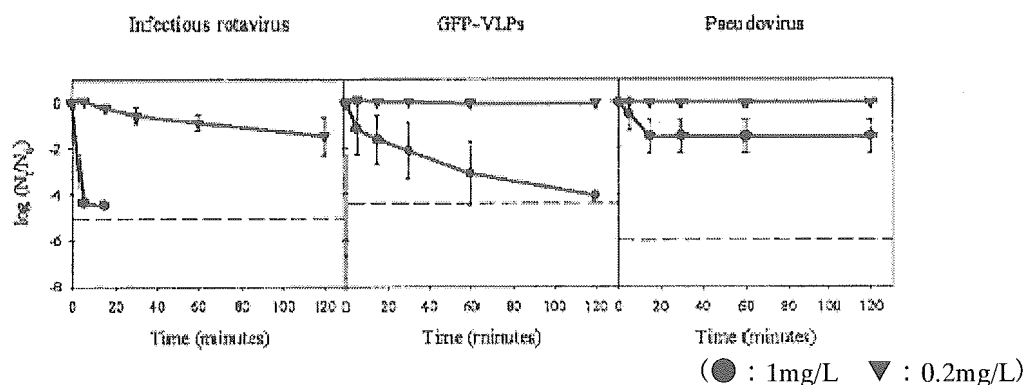
(点線は検出下限値)

図 1 海水中における各サンプルの減少状況

20℃, 遊離塩素 0.2, 1.0mg/L 存在下の飲料水におけるロタウイルス, GLP-VLPs 及びセドウィルスの安定性を図 2 に示す。塩素濃度はサンプリング毎に測定し, 120 分経過後において 40~90%の減少が認められた。

遊離塩素 1.0mg/L の状況では, ロタウイルスに対し, GLP-VLPs, セドウィルスの耐久性が良かった。0.2mg/L の状況下では, 30 分以内は三者に大きな違いは認められなかったものの, 以後ロタウイルスに減少傾向が認められた。遊離塩素 1.0mg/L, 60 分以降をみると, セドウィルスが最も耐性がよいといえる。

GLP-VLPs 及びセドウィルスの減少状況の違いは, 遊離塩素下の動態によるものではなく, 検出方法の違いによるものと考えられる。



(● : 1mg/L ▼ : 0.2mg/L)

図 2 遊離塩素下における各サンプルの減少状況

三者の感受性を評価するために 1-,2-,3-,4-log 除去率における Ct 値を用いる。Ct 値を表 2 に示す。1-log 除去率における GLP-VLPs 及びセドウィルスの Ct 値が、4-log 除去率におけるロタウィルスの Ct 値に対応していることがわかる。

表 2 各サンプルの遊離塩素下における Ct 値

Virus or VLP	Ct value (mg/liter) × min for reduction of:			
	1 log ₁₀	2 log ₁₀	3 log ₁₀	4 log ₁₀
Infectious virus	1.2	2.3	3.5	4.5
GFP-VLP	4.5	25	67	110
Pseudovirus	7.2	30	220	NR*

* NR, not reached.

三者の 20℃、海水及び飲料水中、UV 照射下における安定性を図 3 に示す。海水中、飲料水中ともにロタウィルスに対し、GLP-VLPs、セドウィルスの耐久性が良かった。特に GLP-VLPs の減少は非常に小さく、セドウィルスは 60 分を超えると海水の減少が顕著であった。

三者の 1-,2-,3-,4-log 除去率における Ct 値を用いる。Ct 値を表 3 に示す。海水及び飲料水ともに、1-log 除去率における GLP-VLPs 及びセドウィルスの Ct 値が、4-log 除去率におけるロタウィルスの Ct 値に対応していることがわかる。

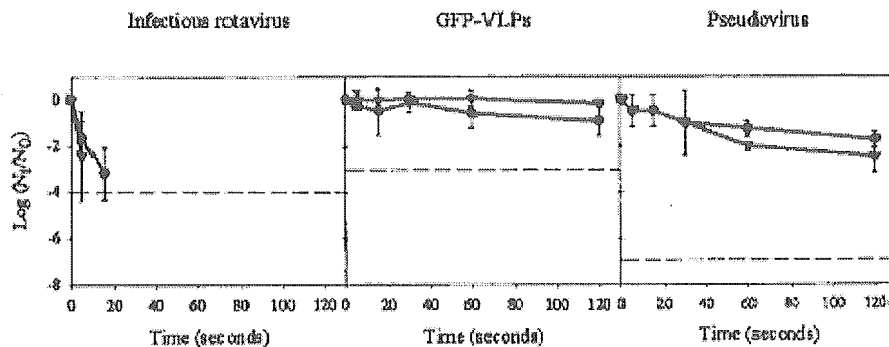


図 3 UV 照射による各サンプルの減少状況

表 3 各サンプルの UV 照射下における Ct 値

Virus or VLP and water type	UV dose (rad/cm ²) for reduction of:			
	1 log ₁₀	2 log ₁₀	3 log ₁₀	4 log ₁₀
Infectious viruses				
Freshwater	20	80	140	200
Seawater	50	110	160	220
GFP-VLPs				
Freshwater	NR*	NR	NR	NR
Seawater	NR	NR	NR	NR
Pseudoviruses				
Freshwater	390	580	NR	NR
Seawater	470	500	NR	NR

* NR, not reached.

5. 考察

異なる環境中におけるロタウィルスのサロゲート物質としての GLP-VLPs の評価を行ってきた。これらの組み換え粒子は形態的にはロタウィルスと見分けがつかず、DNA の二重らせん構造の欠如により環境中において無害である。

ウィルスとサロゲート物質の絶対的な評価には違いがあるが、多くの場合それは検出手法によるものである。しかし、同条件のサンプルを使用するのであれば、どの検出手法を用いても妥当である。

UV 照射に対するウィルスの耐性を決定付ける重要な要素は核酸の種別と長さ及び粒子径である。UV による微生物に対する不活性化の機構は完全には解明されていないものの、UV はピリジン二量体、チミン二量体の原因であり、ウィルス構造を破壊することはわかっている。UV 照射によるキャプシドの崩壊により、核酸のない GLP-VLPs が予期せず減少したものの、やはり UV 照射によるウィルスのサロゲート物質はセドウィルスが最適であるといえる。

ロタウィルスの UV 照射による挙動はその種類、保存方法及び検出方法によりその結果は大きく変わる。消毒作用自体に関する説明は困難であるものの、本実験の目的は消毒作用におけるウィルスのサロゲート物質としての妥当性であり、GLP-VLPs 及びセドウィルスが実際のウィルスに比べ耐性が高いことは事実である。

サロゲート物質として何が適当であるかは今後さらに検討する必要があるが、組み換えウィルスによるサロゲート物質は病原自体を導入できない状況において、ウィルスの除去状況を確認する手法であるといえるだろう。

環境中のウィルス発生源を追跡することは、衛生的にも、経済的にも重要である。バクテリオファージや他の糞便性微生物もウィルスのモデルとなっているが、厳密に言えば環境中の病原性ウィルスの追跡のためのサロゲート物質としては、同じウィルスの組み替えである無害な VLPs の方が有効であるといえる。

高強度低圧紫外線ランプを用いた再生水の消毒

Disinfection Using Low-pressure UV Lamps for Water Reclamation

C.Chen ら

はじめに

近年、塩素消毒は、副生成物を生成することが明らかになり、廃水の代替消毒技術として、紫外線消毒技術が注目を集めている。但し、再生水の消毒を行い、水質基準を満たすためには、多数の紫外線ランプを設置しなければならなくなり、その場合、維持管理に労力がかかると共に、費用もかかる。最近の技術として、高強度低圧紫外線ランプが開発されており、低圧ランプや、中圧ランプよりも、効率的であるとの報告がある。その性能を確認するために、1999年より、高強度低圧紫外線ランプを用いた実証実験を Pomona Water Reclamation Plant(WRP)にて5ヶ月実施している。

この実験の主旨は、1) 高強度低圧紫外線ランプを用いて、再生水中の大腸菌群数が 2.2 MPN/L に消毒できるかどうか。2) バクテリアと大腸菌ファージの紫外線量との応答曲線の作成 3) ベンチスケールの実験装置を用いた同様の線量-応答曲線の作成 4) バクテリアと大腸菌ファージの光回復性の検討 5) 従来ランプとのエネルギー効率の比較 である。

実験プラントについて

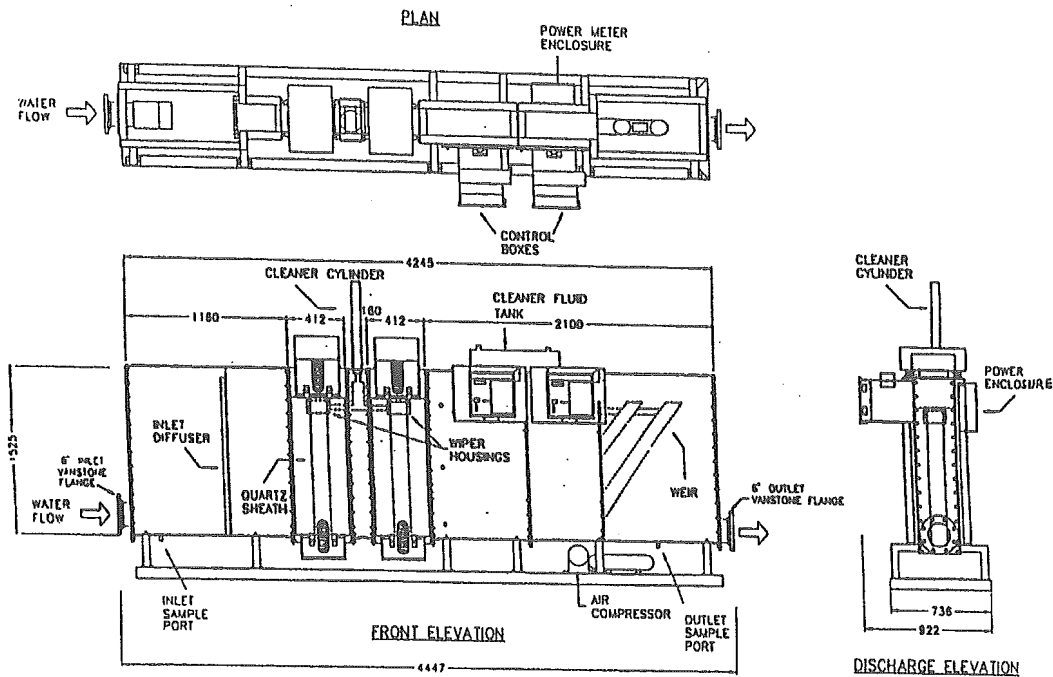
実験施設への流入原水

この地域では、Loa Angeles 州の 500 万人の人々に再生水を供給しており、2 億ガロン/日の水が地下水への補充及び灌漑用水として再利用されている。Pomona WRP は 15 MGD の施設能力を有する 3 次処理施設であり、最初沈澱、エアレーション（活性汚泥）、2 次沈澱、ろ過、塩素、脱塩素処理から成る。実験中の活性汚泥プロセスは、従来法、若しくは、ステップフィード法により、運転管理を実施した。

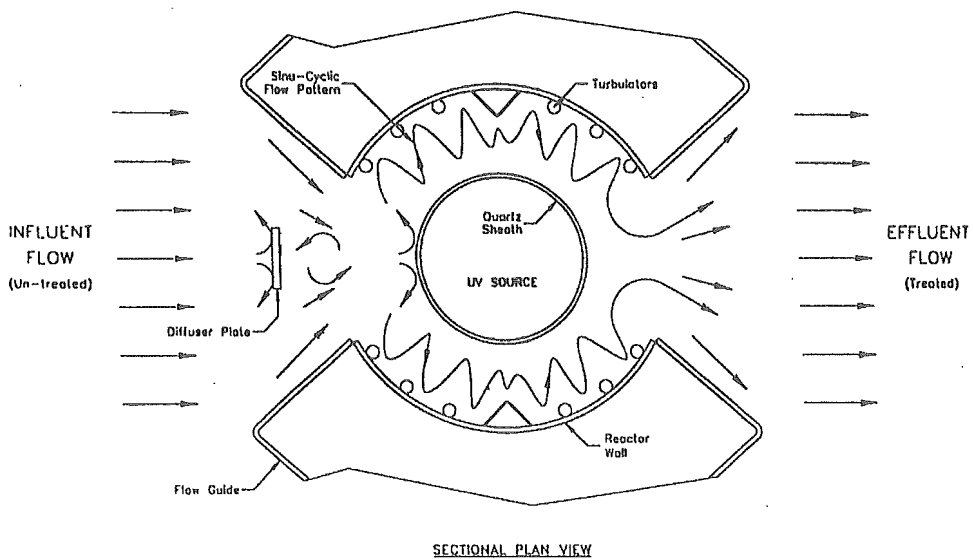
本研究では、2 次沈澱後のろ過水を用いて実験を行うと同時に、大きな粒子径の微粒子の影響や、高濃度の S S が紫外線消毒に及ぼす影響を評価するため、2 次沈澱後の未ろ過水に対しても、実験を行った。

紫外線装置

UV Systems Technology, Inc 社の 2 本の紫外線ランプを有するデモ機(Attachment 1 参照)を用いて実験を行った。ランプはそれぞれ、外径 10cm、長さ 100cm のスリーブ内に格納されている。この紫外線ランプは、放電電流 5A にて、1620W の入力に対し、254nm の出力であった。流動を Attachment 2 に示す。本研究では、Flow guide を反応装置の両脇に 1inch 設置した。攪拌機は、内壁に設置し、短絡流の防止を行なった。また、本装置は自動洗浄機構を有している。



ATTACHMENT I



ATTACHMENT II

携帯型の International light 1400A Smart Radiomarete/Phtometer(Nerburyport,MA)を用いて、紫外線出力を計測した。ユニットの電力消費は、電力計、表示電圧、電流、電力、力率を持ち知恵計算した。紫外線量を変動させる場合は、定アンペア数下において、150 から 300 ガロン/分に流量を変更するか、定流量下で、アンペア数を変化させることにより行なった。

分析手法

バクテリア

大腸菌群及び糞便製大腸菌を本研究では、バクテリアの指標とし、大腸菌群は MPN 法を用いて計数した。バクテリアアッセイの手法は、Standard method 18th edition に準拠した。

大腸菌ファージ

MS2 ファージは、修正 MPN 法を用いて、計数した。

平行ビームを用いた照射実験

高強度低圧ランプを平行に配置し、20mL のサンプルをペトリ皿にいれ、マグネチックスターラーにて攪拌しながら照射実験を行った。分析項目は、大腸菌群及び糞便製大腸菌、MS2 ファージについて行なった。

再生水の水質

毎日、HACH model18900 を用いて濁度を、Milton Roy UV/visible Spectrophotometer model 601 を用いて E254 を現地にて測定した。また、装置の入り口、出口において、SS、TOC、溶解性 COD、全 COD を Standard method 18th edition に従い、分析した。

再活性化

紫外線装置の流出水を 500mL 採水し、その半分はアルミホイルをかぶせて、暗条件に準拠させ、24 時間静置した後、大腸菌群及び糞便製大腸菌、MS2 ファージ、HPC を分析した。

その他の試験項目として、全鉄、溶解性鉄の分析を、GC/MS による消毒副生成物の生成がないかを確認した。

結果及び考察

紫外線装置への流入水

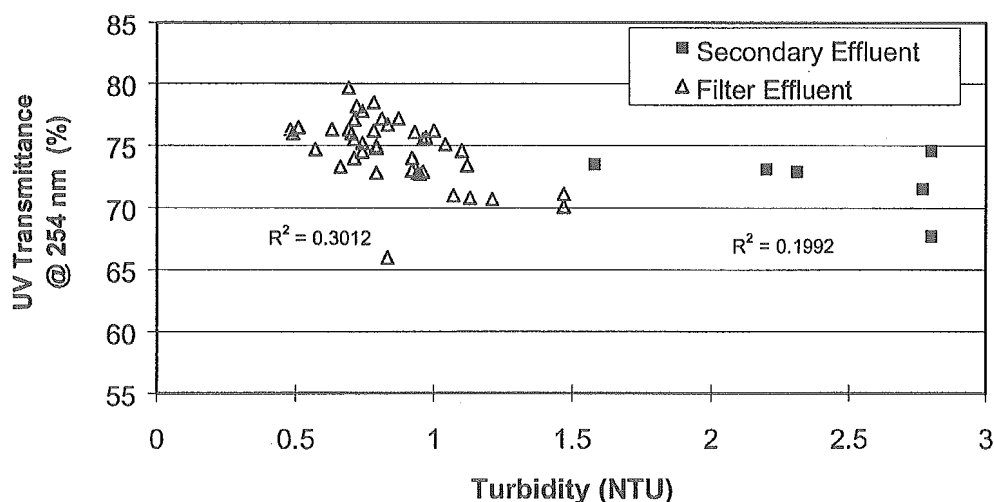
本実験での紫外線装置への流入水質は、Chen、1993 にて示してある。2 次処理ろ過水中の微粒子サイズは、ほぼ、50 μm 以下であり、詳細は Table1 に示す。

Figure.1 に、紫外線装置への流入水中の濁度と E254 の相関を示す。相関があるように見えるが、相関係数からも分かるように両者の関連性は低い。また、全鉄、溶解性鉄に関して分析を行なったか、検出限界の 0.05 $\mu\text{g/L}$ 程度、若しくは、それ以下の値であった。また、紫外線消毒による副生成物の生成は見受けられなかった。

Table I Characteristics of UV Influent

	Mean	Maximum	Minimum	No. of Examinations
SS of secondary effluent (mg/L)	5.1	7.4	2.7	6
SS of tertiary filter effluent (mg/L)	1.2	2.2	0.5	26
Turbidity of secondary effluent (NTU)	2.46	3.10	1.58	6
Turbidity of tertiary filter effluent (NTU)	0.86	1.48	0.45	42
Transmittance @ 254 nm of secondary effluent (%)	71.7	73.9	67.7	6
Transmittance @254 nm of tertiary filter effluent (%)	74.3	79.4	66.0	44
COD of secondary effluent (mg/L)	36	50	26	6
COD of tertiary filter effluent (mg/L)	26	43	16	42
SCOD of secondary effluent (mg/L)	29	37	23	6
SCOD of tertiary filter effluent (mg/L)	24	35	16	42
TOC of secondary effluent (mg/L)	9.76	10.70	9.22	6
TOC of tertiary filter effluent (mg/L)	8.77	10.50	7.16	42

Figure 1 - Transmittance vs. Turbidity of UV Influent



バクテリアの不活化

不活化の指標としては、California州の水質基準にもある、大腸菌群を利用した。バクテリアの不活化実験の目的は、大腸菌フェージと同程度の紫外線量にて、2.2MPN/100mL以下の基準を達成できるかを確認するためである。なお、300gpmの流量の場合、紫外線装置の理論水理学的滞留時間は0.496秒である。3次処理水及び2次処理水の大腸菌群濃度は、 $4.0 \times 10^3 \sim 1.6 \times 10^6$ MPN/100ml、 $5.0 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^6$ MPN/100mlであり、紫外線消毒後の処理水質を、Table IIに示す。また、生存大腸菌群数を紫外線量の相関をFigure.2に示す。Figure.3には、2.2MPN/100ml以下になるのに必要な紫外線量を示す。

Table II Summary of Microbial Concentration in UV Influent

	Mean	Maximum	Minimum	No. of Examinations
Total coliform in secondary effluent (MPN/100 mL)	4.7E+05	1.3E+06	5.0E+04	9
Total coliform in tertiary filter effluent (MPN/100 mL)	2.9E+05	1.6E+06	4.0E+03	53
Fecal coliform in secondary effluent (MPN/100 mL)	3.4E+05	1.3E+06	3.0E+04	9
Fecal coliform in tertiary filter effluent (MPN/100 mL)	1.4E+05	1.6E+06	2.0E+03	50
Seeded MS2 in secondary effluent (MPN/100 mL)	2.4E+06	3.0E+06	1.7E+06	2
Seeded MS2 in tertiary filter effluent (MPN/100 mL)	1.0E+06	2.4E+06	1.7E+05	9
Natural F-specific phage in tertiary filter eff (MPN/100 mL)	1.6E+04	3.0E+04	8.0E+03	7

Figure 2 - Total Coliform Concentration after UV Disinfection

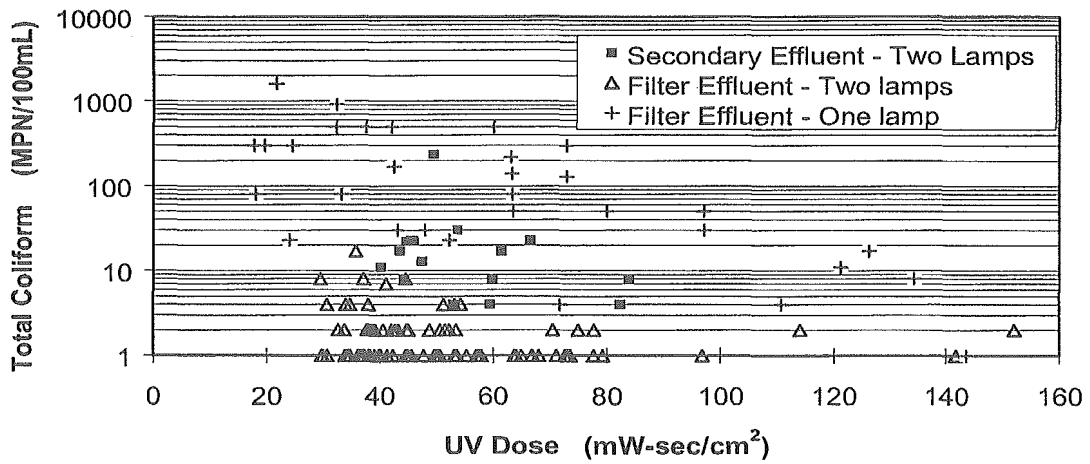
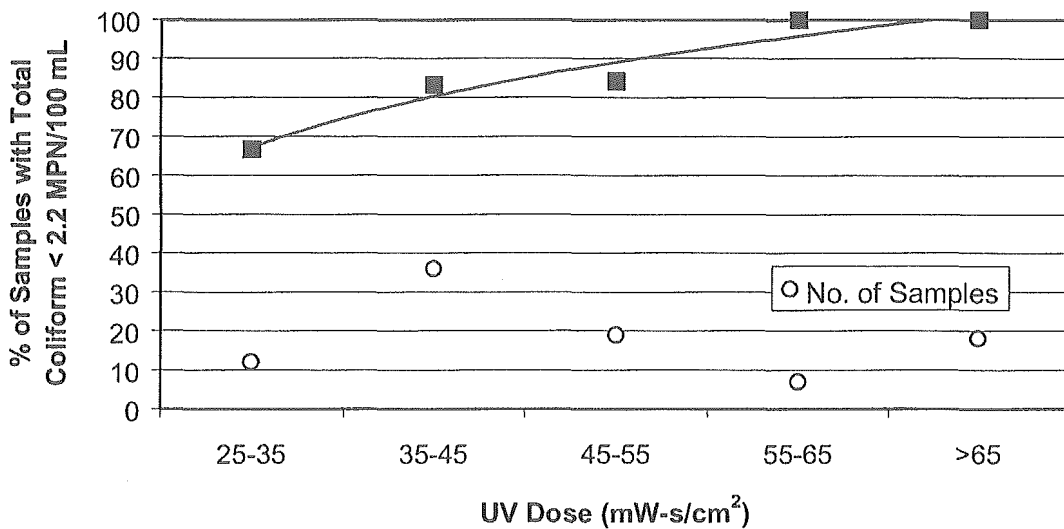


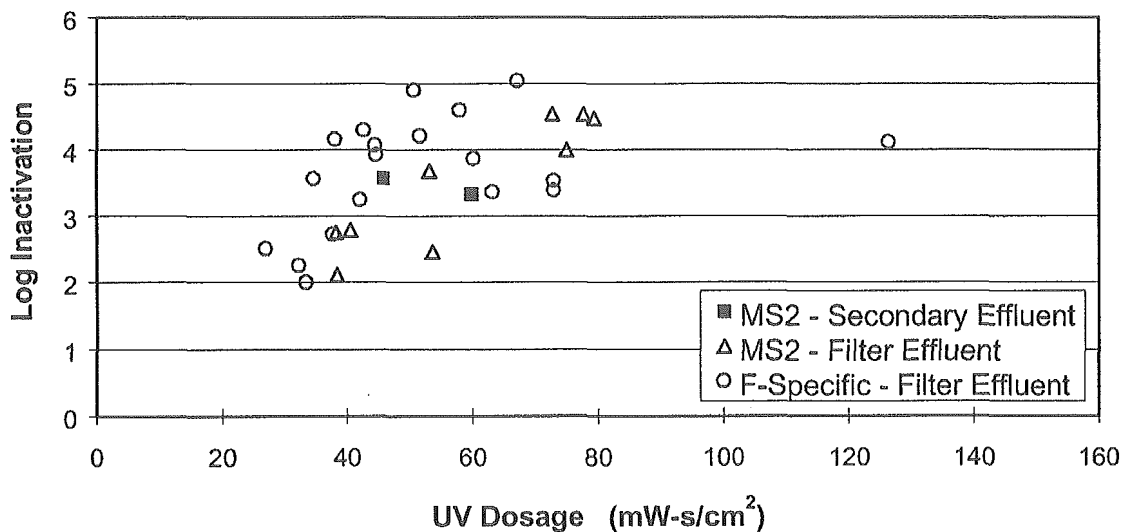
Figure 3 - Percentage of Samples below 2.2 MPN/100 mL



MS2の不活化

各実験において、大腸菌ファージは、流入管に直接、ポンプ注入することで添加しており、紫外線装置に到達する前に、乱流により充分、攪拌されていると仮定している。2次処理水のMS2濃度は、平均 2.4×10^6 MPN/100mL であり、3次処理水では、平均 1.0×10^6 MPN/100mL、 $1.7 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^6$ MPN/100mL である (Table II 参照)。Figure 4 に MS2 ファージと紫外線量の相関を示す。Title 22 では、4log の不活化が必要とされており、Figure.4 より、約 60 mWs/cm^2 の線量が必要であることがわかる。F 特異大腸菌ファージの不活化率と紫外線量の相関も併せて Figure.4 に示す。

Figure 4 - Inactivation of Coliphages vs. UV Dosage



平行ビームを用いた照射実験

本ベンチスケール試験は、Orange County Water District, Fountain Valley, California にて、単色高強度低圧紫外線ランプを用いて実施し、その実験結果を Figure.5 に示す。この図より、水質が紫外線消毒に及ぼす影響が見て取れる。

Figure.6 に 3 次処理水に平行ビームを用いた照射実験結果とパイロットプラントの実験結果を示す。この図より、パイロットプラントの処理性能は、平行ビームを用いた照射実験に示す理想条件に近いことが見て取れる。Figure.6 より、 2.2 MPN/100mL の目標を達成するために必要な紫外線量は、一つの run では 30 mWs/cm^2 であり、別の run では 45 mWs/cm^2 であった。同様の傾向が 2 次処理水に対して行なった実験でも見られる。(Figure.7 参照)。

3 次処理水とパイロット実験、2 次処理水とパイロット実験を比較したものを Figure.8,9 に示す。

Figure 5 - Effect of Water Quality on Collimated Beam Results

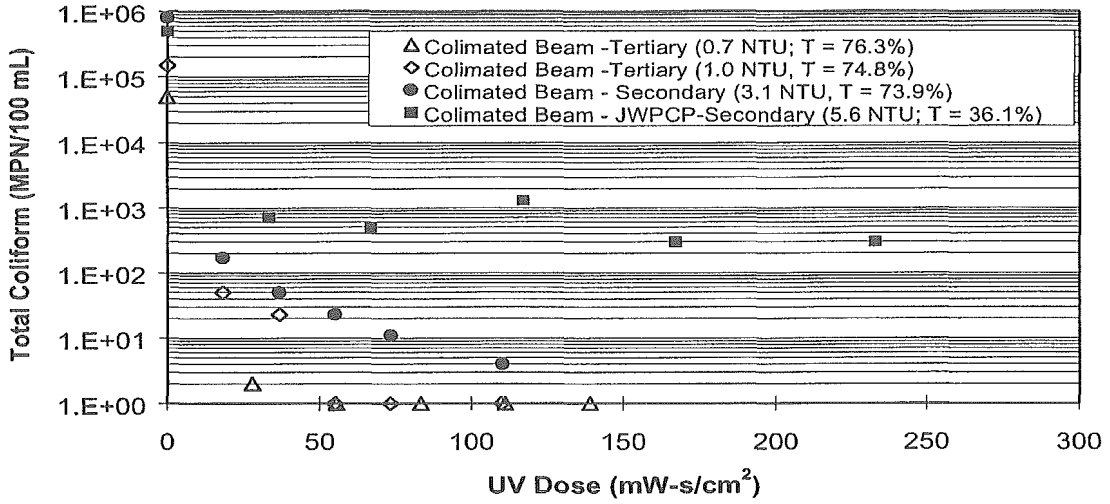


Figure 6 - Comparison of Collimated Beam and Pilot Test Results (Total Coliform - Filtered Secondary Effluent)

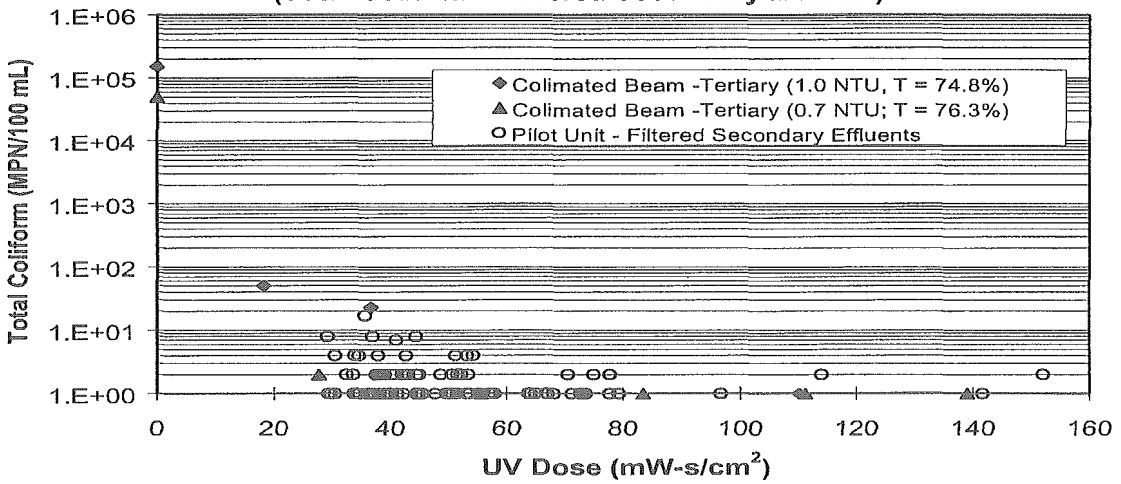


Figure 7 - Comparison of Collimated Beam and Pilot Test Results (Total Coliform - Secondary Effluent)

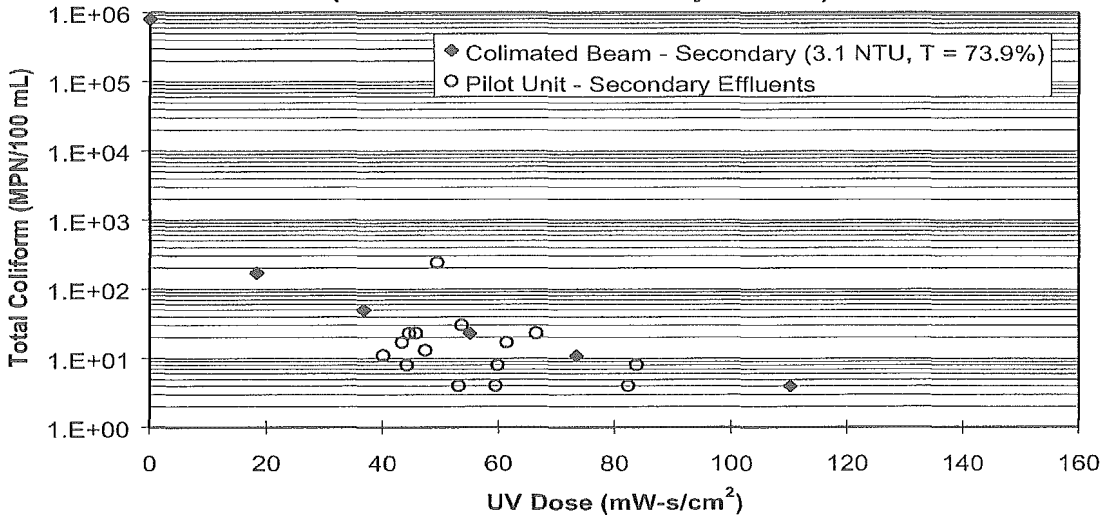


Figure 8 - Comparison of Collimated Beam and Pilot Test Results
(MS2 Coliphages - Filtered Secondary Effluent)

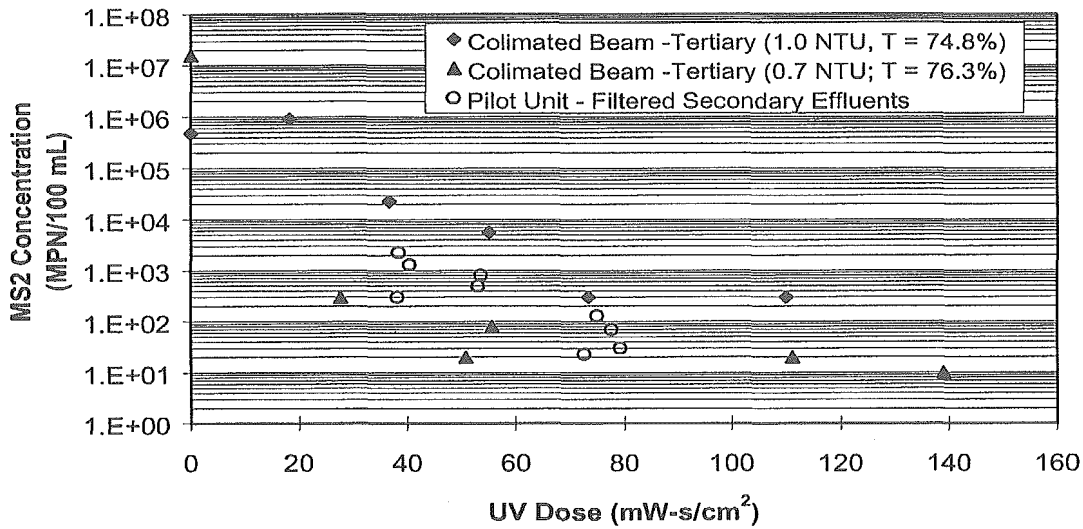
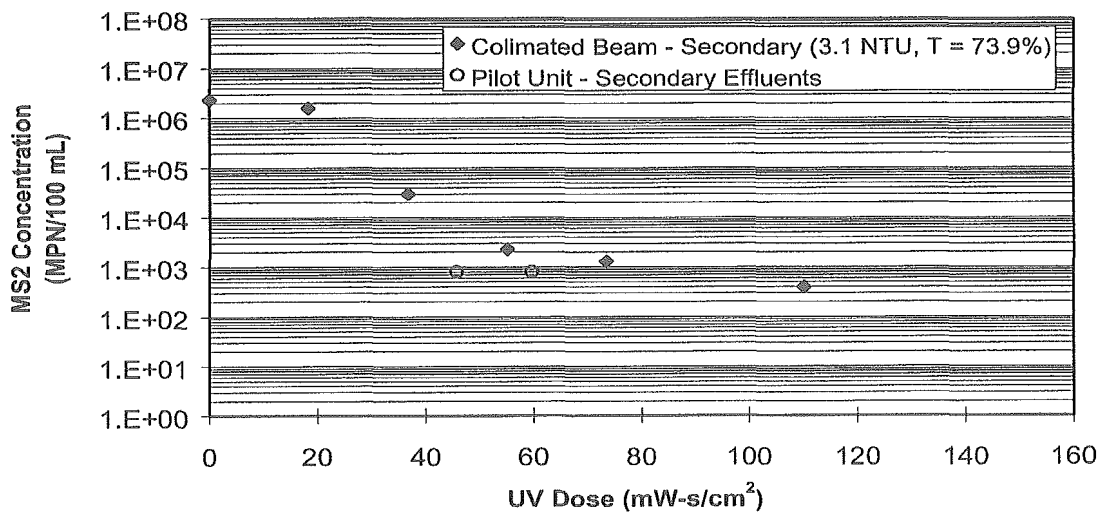


Figure 9 - Comparison of Collimated Beam and Pilot Test Results
(MS2 Coliphages - Secondary Effluent)



再活性化

紫外線量 40,53,78mW/s/cm²において、Background、光条件、暗条件での大腸菌群(MPN法)を測定した結果を Figure.10 に示す。このグラフより、暗条件下では、再活性化は生じないが、光条件では、再活性化が生じていることが確認される。

また、Total plate Count 法を用いた分析結果を Figure.11 に示す。この場合、光条件、暗条件でも微生物量の上昇が見られるが、微生物の増殖によるものなのか、再活性化によるものかは明確ではない。

MS2 フェージの結果は、Figure.12 に示す。この図は要領を得ず、Background の値より

も、光・暗条件時の値が低くなっている。

Figure 10 - Reactivation Study (Total Coliform)

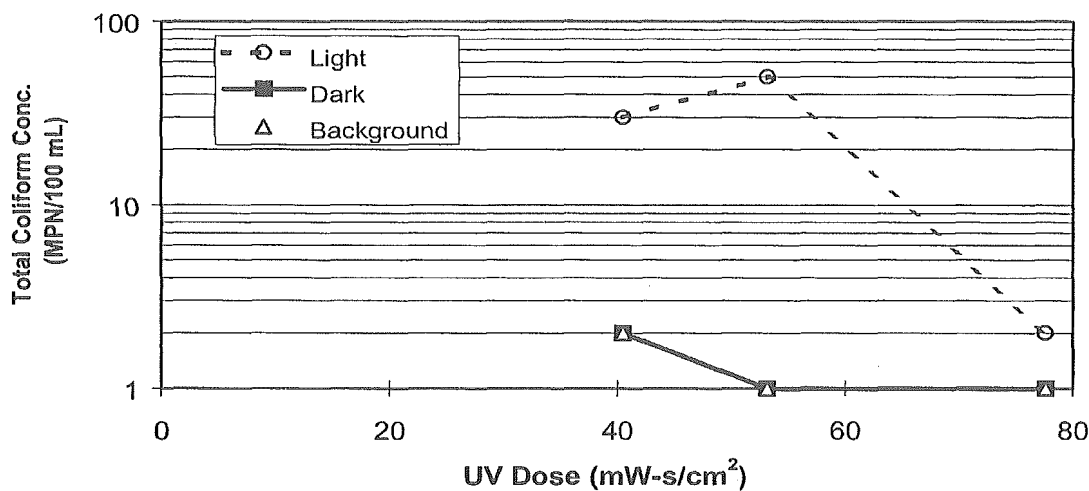


Figure 11 - Reactivation Study (Total Plate Count)

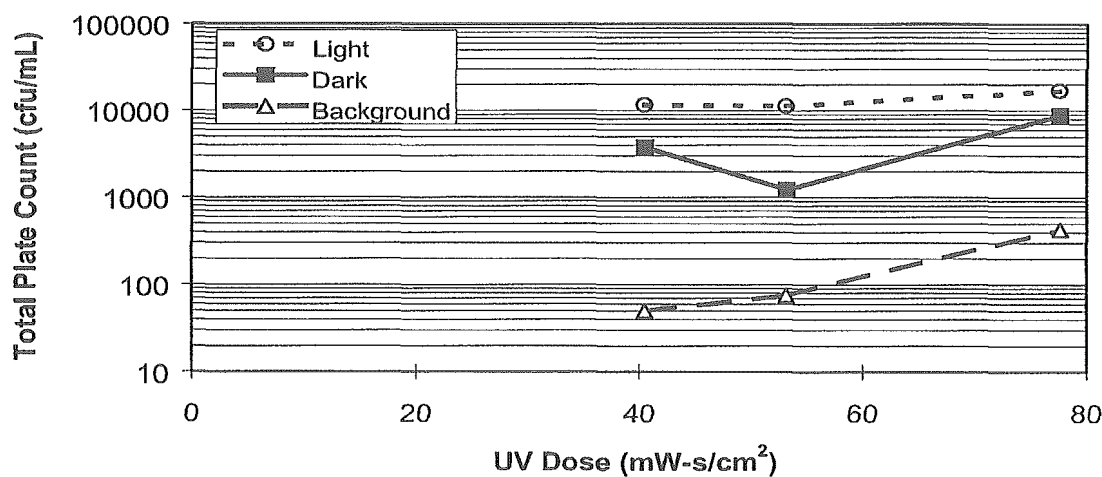
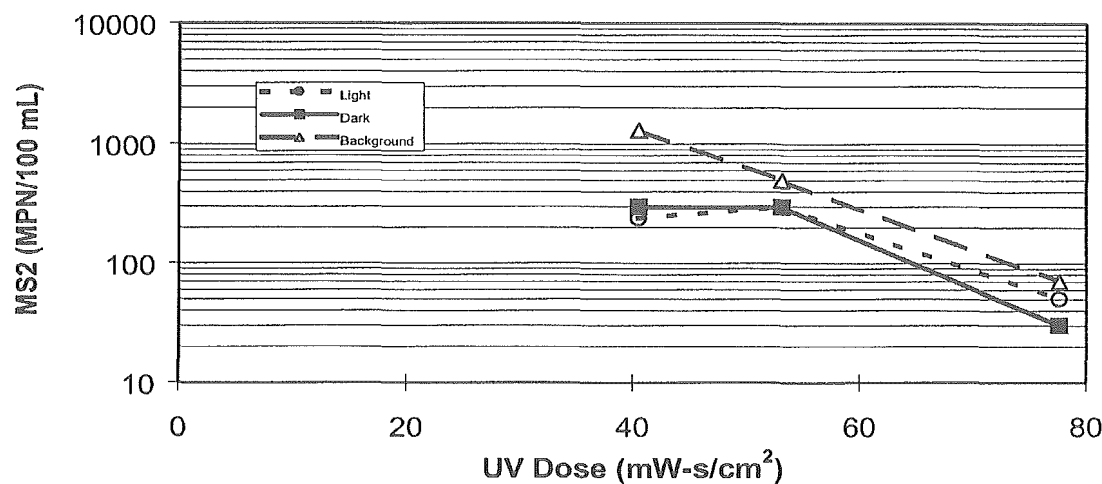


Figure 12 - Reactivation Study (MS2 Coliphage)



エネルギー消費

今回の実験結果及び以前の知見を基に、Table IIIに、10MGD の施設での新型ランプと従来の低圧ランプとのエネルギー消費の比較を示す。このさい、紫外線量の算出方法が両者において異なるので、注意が必要である

高強度低圧紫外線ランプは、従来の低圧紫外線ランプに比べ、ランプ本数が 1/15 になり、エネルギー消費量も 17.2%の削減が可能である。

Table III Energy Usage Comparison

	Low-pressure Low-Intensity System	Ultra Guard (2-lamp PDU)*
Dose requirement (mW-s/cm ²)	100	50
UV influent transmittance@254nm (%)	65	65
Lamp age factor	0.7	0.7
Transmittance through quartz sleeve	0.7	0.7
Required retention time (seconds)	24.50	2.40
Flow peaking factor	1.5	1.5
Lamp redundancy factor	1.2	1.33
Number of lamps needed for a 10 MGD plant	3456	240
Number of lamps in use for the average flow	1920	120
Power draw per lamp (W/lamp)	100	1326
Total power draw (kW)	192	159
	Energy Savings (%)	17.2%

* Low-pressure high-intensity lamps (operated at 3.2 amperes)

結論：

1. Pomona の 3 次処理水には紫外線消毒が有効であり、2.2MPN/100mL の基準を満たすためには、約 50mWs/cm² の線量が必要であった。
2. MS2 大腸菌ファージを 4log 不活化するには 60mWs/cm² の紫外線量が必要であった。
3. 2 次処理水、3 次処理水への平行ビーム実験は、ベンチスケール実験と整合性が取れた。
4. 大腸菌群に関して、光回復は見受けられたが、暗回復は確認されなかった。
5. 低圧紫外線ランプの代わりに、高強度低圧紫外線ランプを用いることにより、ランプ本数及びエネルギー消費量を削減することが可能であった。