

多色光中圧ランプによる光生物学的影響

Photobiological effects of polychromatic medium pressure UV lamps

Ben F.Kallisvaart ら

概要

紫外線消毒は、塩素に代わる消毒方法として、飲料水やプロセス用水、廃水に用いられている。紫外線照射後の微生物の回復を阻害するために、微生物には、可能な限り、多くの部位に損傷を与える必要がある、殺菌効率の高いランプは、幅広い波長を持ち、特定の波長にて高出力を持つよう改良されたランプである。同線量において、従来の低圧ランプに比べ多色中圧ランプの方が、消毒副生成物を生成することなしに、より高い不活化が、可能であった。

はじめに

19世紀末には、単色の低圧水銀ランプが、微生物の殺菌に効果があり、酵素の修復機構により、微生物が低圧水銀ランプによる損傷から回復することが知られていた。

オランダの Berson UV-Techniek 社が最初に第2世代のランプ・・中圧ランプを25年前に導入した会社である。この中圧ランプは、低圧ランプに比べ、幅広い波長を有していた。

20世紀末に、第3世代のランプ・・bersonMultiWave を呼ばれるランプが Berson UV-Techniek 社により開発された。本ランプは、低圧ランプの効率性と中圧ランプの広域の波長によるメリットを併せ持つものである。

UVランプの波長特性

改良多色光中圧ランプの特徴としては、幅広い紫外線照射エリア、強い紫外線強度、紫外線効率の改良という点が挙げられ、低圧、中圧のどちらにも分類することはできない。

電磁気の周波数帯

電磁気波長の中で、100~400nmの間を紫外線波長領域としているが、この波長域は3つに分類される(Jaggar,1967)

- ・超紫外線若しくは真空紫外線 : 100~190nm
- ・遠紫外線(UV-C,UV-B) : 190~300nm
- ・近紫外線(UV-A) : 300~400nm

190nm以下の波長は水や空気によって吸収されるので、実際に微生物の不活化に効果があるのは、190~380nmである。

国際光委員会(International commission of light)によると、紫外線域は真空紫外線(100~200nm)、UV-C(200~280nm)、UV-B(280~315nm)、UV-A(315-400nm)の4つに分けられる。

紫外線ランプの波長

紫外線ランプより照射される紫外線領域は以下に分けられる。

- ・ 単色中圧ランプ : 254nm
- ・ 従来型の多色光ランプ : 185-400nm
- ・ 改良型の多色光ランプ : 185-400nm

閾値(E_{ion})を超えると、結合が切れ、分子(反応物質)は、2 つ以上の生成物に分裂する。物質に吸収される光子や照射エネルギーのみが、光化学的に有効であるといえる。(Draper-Grotthus の法則)

DNA による紫外線の吸収

DNA を構成する糖質とリン酸は、波長 210nm において、それほど紫外線吸収を行わない。DNA と RNA において 210nm における紫外線吸収が行われるのは、ヌクレオチド塩基(アデニン、グアニン、シトシン、チミン、ウラシル)があるためであり、これらの波長は UV-VB、UV-C の領域にて吸収波長を有する。紫外線照射によるもっとも多い生成物は、チミンの 2 量体である。DNA が損傷を受け、チミンの 2 量体が生成したならば、DNA は複製が不可能になり、微生物は死滅したとみなせる。

プロテインや酵素による紫外線の吸収

Jaggar(1967)は、300nm 以下の紫外線波長において、プロテインや核酸(DNA、RNA)に損傷を与えられると述べている。

プロテインは最大吸光を 280nm にもち、プロテイン中のペプチド基($\cdot\text{CONH}\cdot$)は紫外線耐性が弱く、特に、240nm 以下では、その傾向が顕著である。

Bensel(1977)は、アミノ酸システインが紫外線吸収をすることにより、プロテインや酵素が変質すると報告している。微生物の体組織の約 50%は、プロテインにより構成されており、紫外線吸収により核酸合成や染色体構造に影響を及ぼす可能性がある。

遠紫外線の生体分子による吸収

Jaggar(1967)は、紫外線吸収を行うものとしては、共役結合がもっとも多いとしており、300nm 以下の遠紫外線を特に吸収しやすいとのことである。芳香環は、遠紫外線を吸収することで、脱炭酸反応、脱アミン反応、開裂反応等が生じる。遠紫外線を吸収する生体分子としては、炭素の 6 環構造を有するベンゼン等、窒素を含む環状化合物のピリジン等が挙げられる。

近紫外線の生体分子による吸収

また、2 重環構造のリボフラビンや 4 重環構造のステロイド等は、近紫外線(300nm 以上)による吸収を行う。

可視光の殺菌効率

10 μm 以下の小さいバクテリアに対して、300nm 以上の波長による効果は良く知られている (Ward,1893)。プロテインや核酸は 340nm 以上の波長をほとんど吸収しないので、その他の発色団により紫外線吸収が行われ、微生物の殺菌につながると思われる。

今までは、254nm(UV-C)による殺菌では、回復現象が見られるため、微生物の殺菌は 300nm 以上の波長により行われると考えられており、実際の実験結果としても、360nm

以下の波長をさえぎり、回復現象が生じない致死損傷が可能であったとの報告がされてきている。太陽光による殺菌は、主に、細胞壁内での酸素ラジカルの生成に由来するものと思われる。(Tortora,1995)

大きな細胞に対しては UV-C の領域の紫外線では、透過が行われにくいので、紫外線耐性を有する微生物(*Cryptosporidium parvum*)に対しても、UV-C 以外の波長が重要となる。細胞壁外において、紫外線吸収が行われ、そのことにより、微生物の殺菌が行われていると思われる。

紫外線による損傷からの回復

微生物の紫外線による損傷からの回復に関しては、対応策を講じる必要があり、光回復と暗回復の2種類がある。

回復機構(EPA,1986)は、すべての微生物において普遍的なものではない。回復現象が生じないものとして、*Haemophilus*, *Influenzae*, *Diplococcus pneumoniae*, *Bacillus Subtilis*, *Micrococcus*, *radiosurans*, *viruses*, *Cryptosporidium parvum*, *Staphylococcus aureus* phage A994, Rotavirus SA-11, Poliovirus, MS2 phage が挙げられる。

また、光回復を生じる微生物としては、*Streptomyces* spp, *Escherichia coli*, *Saccharomyces* spp, *Enterobacter cloacae*, *Citrobacter freundii*, *Enterocolitica Faecium*, *Klebsiella pneumoniae*, *Mycobacterium smegmatis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhi*, *Salmonella typhimurium*, *Serratia marcescens*, *Vibrio Cholerae*, *Yersinia enterocolitica* が挙げられる。

微生物の細胞の中で、もっとも損傷を受けやすいのは、分子そのものが大きい DNA と RNA である。単色光による DNA と酵素の修復機構に関しては Ingarham(1994)にて示されている。光回復(EPA,1986)は、装置設計に影響を及ぼす因子であり、回復現象を阻害するために、DNA を含む様々な分子に損傷を与える必要がある。

低圧ランプによる 254nm の紫外線照射では、容易に光回復が生じたが、改良多色光中圧ランプでは、回復現象が生じなかった。

低線量と高線量との差異

Bunsen-Roscoe の式により、紫外線量は下式のように定義される。

$$\text{紫外線量(mWs/cm}^2\text{)} = \text{紫外線強度(mW/cm}^2\text{)} \times \text{照射時間(秒)} \quad (1)$$

紫外線による消毒効果は、光化学反応だけではなく、生物的反応(即ち、回復現象)にもよるものであり、(1)式による紫外線量では、消毒効果を説明することはできない。

Harm(1980)らは、微生物の殺菌において一番重要な因子は紫外線強度であるとの報告をしている。実際に *Escherichia coli* を用いて実験し、同線量で比較した場合、紫外線強度の強い紫外線を短時間照射した方が、紫外線強度の弱い紫外線を長時間照射するよりも効率が高いと報告している。

実用化に向けた実験

German DVGW(Janssen,1999)、Austrian Onorm(Janssen,1999)、Dutch

(Kruithof,1992)によると、同じ紫外線量において、*Bacillus Subtilis* と HPC 22℃を用いて実験した結果、低圧水銀ランプに比べ、多色光の中圧ランプの方が効果が高いと報告している。この理由は、紫外線強度を高め、また、幅広い紫外線波長を有することによる相乗効果によるものと考えられる。

多色光中圧ランプは、あらゆる水処理プロセスに適用されている。KIWA(Kruithof,1992)は、後塩素消毒を行う場合は、AOC 濃度や TA 100-S9 株を用いた Ames 法による変異原性の度合いが上昇するが、紫外線消毒ではこれらの現象が生じないことを報告している。Oostelbos(1995)と Hopmans(1996)は、改良多色光中圧ランプを用いることにより、亜硝酸塩の発生を抑えることができると報告している。

結論

紫外線照射により損傷を受けだ DNA は、光回復若しくは暗回復を行う可能性がある。

Bunsen-Roscoe の式は、回復現象が生じる微生物に対しては、適用できない可能性がある。

同線量を用いる場合でも、従来型の低圧ランプを用いるより、多色光中圧ランプを用いた方が、殺菌効果が高いとの結果が得られており、多色光中圧ランプを用いることにより、微生物の回復現象が生じる可能性は非常に小さくなる。

紫外線装置の検証の際のバイオアッセイによる評価

AN ASSESSMENT OF THE BIOASSAY CONCEPT FOR UV REACTOR VALIDATION

Harold B.Wright and Yuri A.Lawryshyn ら

1. 概要

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関心し、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。

2. はじめに

UV は、塩素やオゾンに代わり、飲料水から廃水まで適用可能な消毒副生成物の生じない消毒技術である。

浄水処理への紫外線消毒技術の適用にあたり、大きな課題の一つとして、装置内の紫外線量の測定方法がある。廃水処理の場合と異なり、浄水処理の場合では、対象とする微生物量が、現状の測定法の定量下限値以下であるため、不活化率の測定ができない。紫外線照射量は、オンライン型の UV センサー、紫外線透過率、流量、等の因子により決定される。安全な水の確保のためには、第三者機関による紫外線照射量の測定が必要である。

現在、紫外線照射装置の有効性に関しては、Qualls and Johnson(1983)のバイオアッセイ法により評価が行われている。本方法では、紫外線装置の上流側に微生物を投入し、装置の上流、下流において生存数を測定し、紫外線との用量反応曲線より、照射紫外線量を算出する。紫外線照射装置の性能確認のための、バイオアッセイ法の使用は Australian Standard M 5873 にも組み込まれている紫外線による微生物を含む水処理に関する NSF/ANSI Standard 55 の一部であり、低水質の廃水消毒及び浄水消毒のための NSF/APA ETV 計画において検討中である。1989年に Qualls らが、バイオアッセイの結果の取り扱いに関して、警告を発しているが、バイオアッセイ方法の妥当性に関して評価されていない。

紫外線装置内の紫外線量として平均紫外線量がよく用いられているが、水利条件や紫外線照射線量のばらつきを考慮に入れる必要があることが指摘されている。最近では、計算流体力学(CID)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。本手法を用いることにより、微生物の不活化率を想定でき、装置の最適化をおこなうことも可能となる。

理論

一次反応モデルでは、不活化は下記のように表される。

$$\frac{N}{N_0} = e^{-kDeqv} \quad (1)$$

ここで、 N_0 は、反応装置内の活性のある微生物量、 N は紫外線消毒後の活性をもつ微生物量、不活化定数 k は、微生物の種類によりことなる定数である。平行ビームの装置は主に、この k の値を決定するのに用いる。 N 、 N_0 はバイオアッセイを行うことで計測できるので、 $Deqv$ を解くことによりバイオアッセイの等価線量を求めることができる。 $Deqv$ は微生物の種類によらず同じであることを式(1)は示しているが、実際には、本式は、完全混合槽内ですべての微生物が同じ線量を暴露する場合にのみ適用が可能であり、実際の装置においては、すべての微生物が同線量を暴露することはなく、暴露する線量に差が生じる。

簡単な例えとして、99%の微生物は $100\text{mJ}/\text{cm}^2$ の照射線量を受け、1%の微生物は $0\text{mJ}/\text{cm}^2$ の照射線量を受ける場合、平均紫外線照射線量は $99\text{mJ}/\text{cm}^2$ となる。この場合、 $20\text{mJ}/\text{cm}^2$ につき、 $1\log$ の不活化が可能な微生物(MS2)は約 $5\log$ の不活化が可能と考えがちであるが、実際には $2\log$ 程度の不活化しか生じない(1%の微生物は紫外線の照射を受けないため)。このように、装置性能は、紫外線量の分布状況により、大きく変化する。

そのため、実際の装置においては、

$$\frac{N}{N_0} = \sum_{i=1}^{\infty} f_i e^{-kD_i} \quad (2)$$

と表される。ここで、 D_i の照射線量を受ける割合が f_i であることを意味している。式(1)および式(2)より下記の式が成立する。

$$e^{-kDeqv} = \sum_{i=1}^{\infty} f_i e^{-kD_i} \quad (3)$$

$$Deqv = -\frac{1}{k} \ln\left(\sum_{i=1}^{\infty} f_i e^{-kD_i}\right) \quad (4)$$

式(4)より、 $Deqv$ は D_i 及び k の関数であることがわかる。このことは、微生物種類により k の値が異なるので、等価線量 $Deqv$ も変化することを意味している。

しかし、実際問題として、装置内の線量分布を測定することは非常に難しい。そこで、CFD法のような数学的手法を用いて、線量分布の予測を行う。CFD法を用いた研究では、装置内の線量分布は対数分布であることを報告している。その式は、

$$f(D) = \frac{e^{-\frac{(\ln(d-D \min) - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{(D - D \min)\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (5)$$

ここで、 $f(D)$ は線量 D の関数であり、 μ 、 σ は線量分布による。 $D \min$ は線量分布を移動させるために用いる。式(2)に代入することにより、

$$\frac{N}{N_0} = \int_0^{\infty} f(D) e^{-kD} dD \quad (6)$$

$$Deqv = -\frac{1}{k} \ln\left(\int_0^{\infty} f(D) e^{-kD} dD\right) \quad (7)$$

上式より、 $k \approx 0$ (紫外線耐性の強い微生物)であるならば、 $Deqv$ は、線量分布の平均に近くなるが、 $k \approx \infty$ (紫外線耐性の弱い微生物)においては、ほぼ最小線量となる。

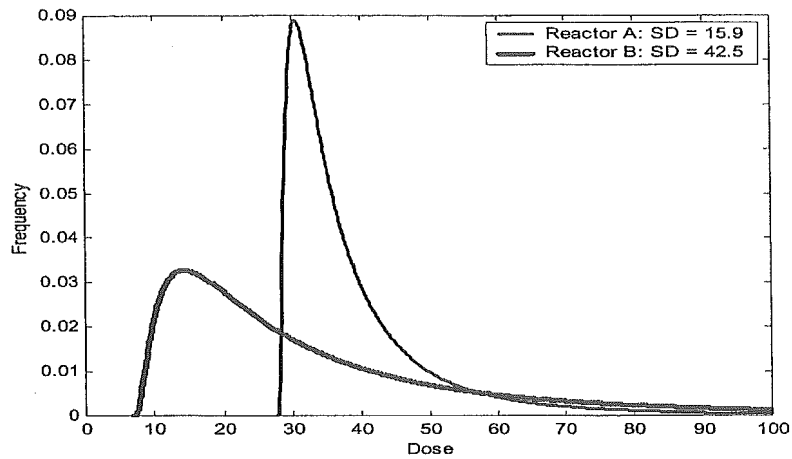


Figure 1. Log Normal Dose Distributions for Two Different Standard Deviations. Mean Dose is 40 mJ/cm².

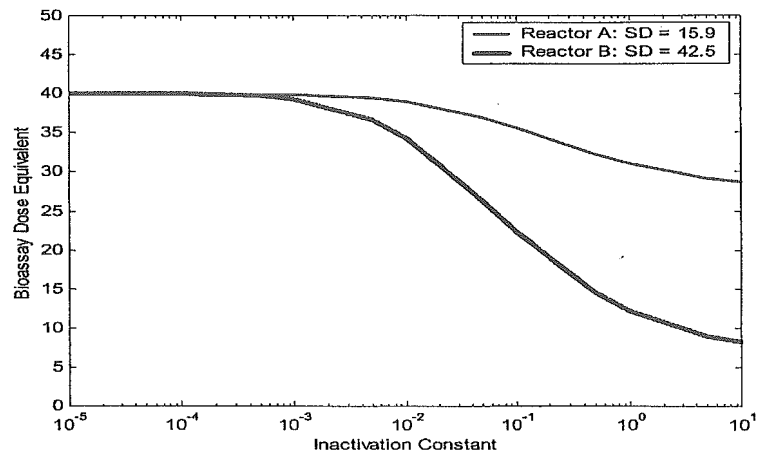


Figure 2. Bioassay Equivalent Dose Versus Inactivation Constant for the Two Dose Distributions Plotted in Figure 1.

Figure1 では平均照射線量 40mJ/cm²における 2つの線量分布を仮定し、figure2 では、バイオアッセイによる等価線量を示している。Figure2 より、線量分布の幅が広いほど、平均照射線量と等価線量の差異も広がる傾向にある。Figure3 には、不活化率と不活化定数の関係を示している。不活化定数が大きくなるにつれ、不活化率も大きくなるが、幅広い線量分布をもつものほど、不活化定数と不活化率は直線関係にならないことが分かる。

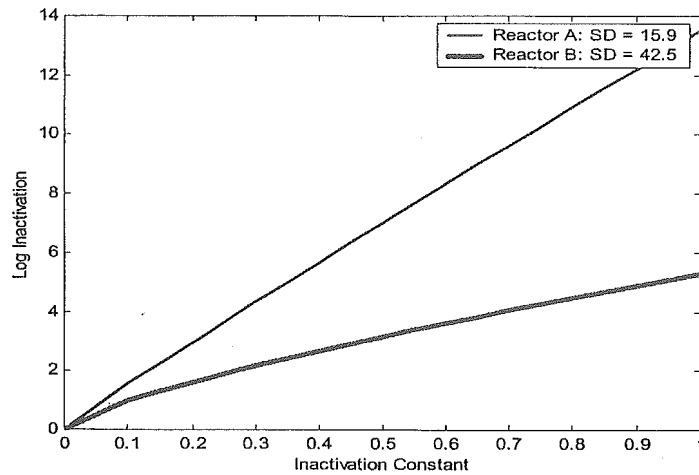


Figure 3. Plot of log inactivation for varying inactivation constants for the two different dose distributions given in Figure 1.

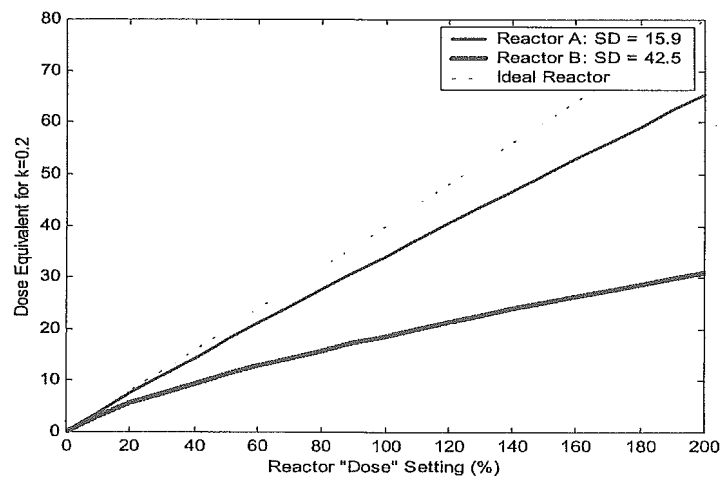


Figure 4. Dose Equivalent for Microbes with $k=0.2$ Versus Reactor "Dose" Setting.

上記より、一次不活化傾向を示す微生物を対象とする場合、下記の2つが成立する。

- 1) 装置内実験により、不活化定数が k 及び不活化率 $n \log$ の結果が得られた場合、不活化定数 k 以下の微生物では、不活化率も $n \log$ 以下になり、不活化定数 k 以上の微生物では、不活化率も $n \log$ 以上になることが分かる。
- 2) ある微生物に対して装置内の等価線量が De_{qv} である場合、その微生物より紫外線耐性の強い微生物では、 De_{qv} の値も更に高くなる。

実際には、様々な条件下で、様々な照射線量で、紫外線の照射は行われる。異なる装置での紫外線照射量に関しては、式(5)を変形させ下記のように表される。

$$f(D) = \frac{e^{-\frac{(\ln(D/\gamma - D \min) - \mu)^2}{2\delta^2}}}{(D/\gamma - D \min)\sigma\sqrt{2\pi}\gamma} \quad (8)$$

γ はスケールを表す指標であり、装置内の設定照射線量が 100%のときは 1、50%の時は 0.5、

150%のときは、1.5 となる。k=0.2 の場合の、異なる装置内設定照射線量の結果を figure4 に示す。幅狭い照射線量分布をもつ装置のほうが、理想条件の装置に近づくことが分かる。

方法論

CFD モデルを用いた 4 つの紫外線照射装置が作られた(Buffle,2000)。均等に多量の粒子を紫外線照射装置へ注入し、CFD モデルを用いて、位置の特定を行った。微粒子の位置は、(x,y,z,t)の関数であらわされる。紫外線強度は、Jacob と Dranoff(1970)が開発した Point Source Summation Method を用いて決定した。

Cryptosporidium、大腸菌、Hepatitis A virus ,rotavirus,MS2 bacteriophage、adenovirus の不活化反応は一次反応であると思われる。不活化定数は(Wright and Sakamoto,1999)を使用した。廃水中の紫外線の用量応答曲線は(9)式で表される。

$$N=Nof \exp(-kfD)+Nop \exp(-kfpD) \quad (9)$$

ここで、N は線量 D の紫外線照射後の微生物数であり、Nof,kf,Nop,kp は定数である。

紫外線等価照射線量は、式(4)を用いて計算でき、廃水中の紫外線等価照射線量は、下記で表される。

$$Nof \exp(-kfDeqv)+Nop \exp(-kfp Deqv)=\sum_{i=1}^{\infty} fi [Nof \exp(-kfDi) + Nop \exp(-kfpDi)] \quad (10)$$

結果

Table 1 に実験に用いた装置形状を示す。Reactor A は、Chiu らと同様に、低圧水銀ランプを垂直に配列したものであり、Reactor B,C は、2 つの中圧ランプをクロスフローに設置し、C ではさらに装置内の水理条件の改善を行った。Reactor D は、流れと平行に 8 本の定圧高出力ランプの設置を行った。

Figure 5 は、各紫外線透過率ごとの、紫外線量分布を示したものである。Reactor A は、装置壁周辺の短絡流により、二峰性分布となっている。ReactorC は reactorB に比べ、水理条件の改善を行ったことにより、右側へグラフが移動している。Reactor D は、本誌で述べている理想の分布をしている。

Table 1 - Descriptions of UV Reactors Analyzed

Attribute	Reactor A	Reactor B	Reactor C	Reactor D
Lamp Type	Low Pressure	Medium Pressure	Medium Pressure	Low Pressure High Output
Germicidal UV Output (W)	13.8	424	424	34
Arc length per lamp (cm)	76	25	25	91
Sleeve O.D. (cm)	2.44	5.08	5.08	-
Reactor length (cm)	62.5	200	200	100
Reactor width (cm)	41.25	-	-	-
Reactor height (cm)	62.5	-	-	-
Reactor I.D. (cm)	-	30.5	30.5	20.4
Lamp array	5x5 staggered	1x2 cross flow No flow modifier	1x2 cross flow Flow modifier	8 lamp

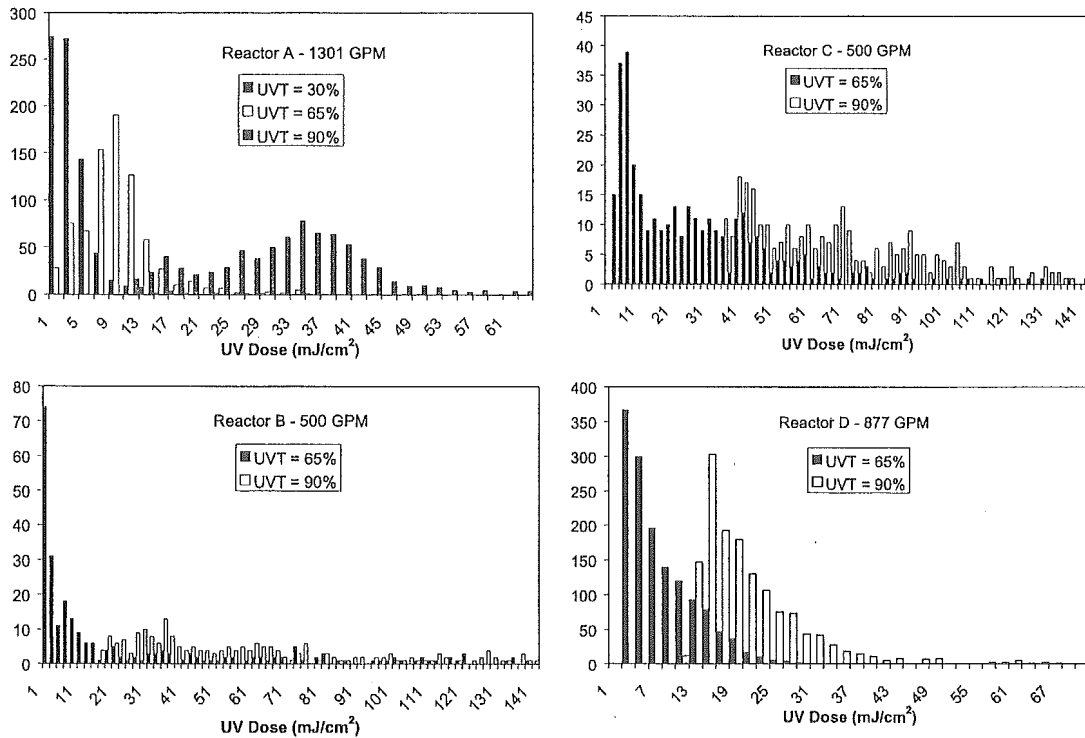


Figure 5 – UV Dose Histograms for Four Experimental UV Reactors.

Figure 6 は、reactor A における等価紫外線照射量を示している。今回、対照としてしている微生物は $0.096 \sim 2.3 \text{ mJ/cm}^2$ (table 2 参照) の一次不活化定数を有するが、等価紫外線量と不活化定数の関連性を明示するために figure 6 では、それ以上の定数についても示している。Figure 6 より、等価紫外線量は、紫外線透過率および、微生物の不活化定数により変わることが分かる。不活化定数が減少するにつれ、等価紫外線量は、ある一定値まで上昇する。この一定値が平均紫外線量に等しいものとなる。

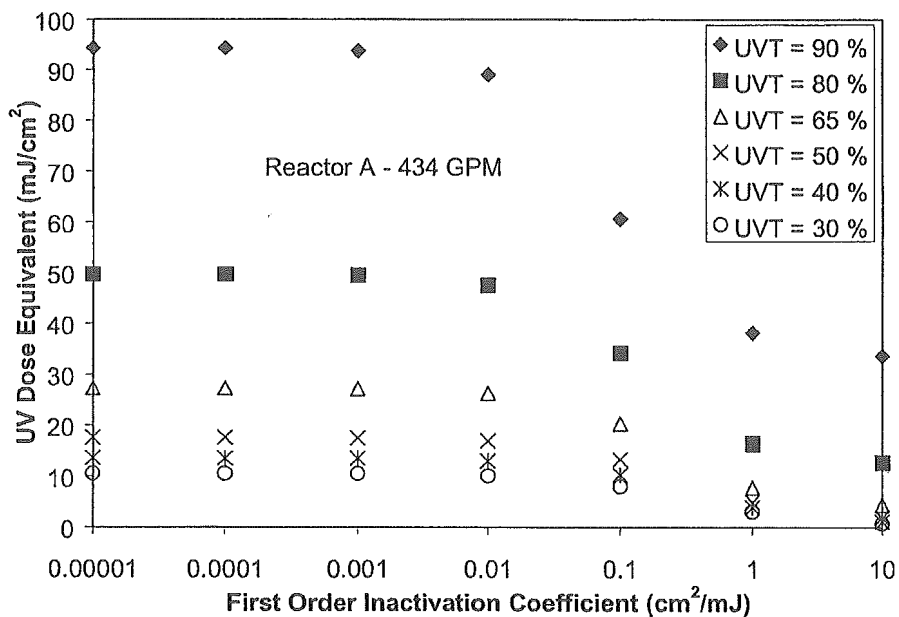


Figure 6 – Dependence of the UV Dose Equivalent on the Microbe First Order Inactivation Coefficient for Reactor A at 434 GPM.

Table2 では、紫外線耐性の低い *Cryptosporidium* から紫外線耐性の高い Adenovirus までの微生物の不活化情報を示している。また、3 種類の廃水に対する紫外線不活化情報を失っている。計算は、 $N=N_{of} \exp(-k_f D) + N_{op} \exp(-k_p D)$ (9) に準じている。この中で、最初の式は、微生物単独の不活化を泡和しているが、2 番目の式は微粒子に付着した微生物の不活化を表している。明らかに、微粒子に付着した微生物の不活化は線形にはならないはずなのだが、figure7 に示すように並行ビームを用いた実験装置により得られた紫外線の用量—応答曲線に適応する結果が得られている。Figure8a では、reactor A 内の Table2 に示す微生物の一次不活化定数と等価紫外線量の相関を示している。

Table 2 - Microbe Inactivation Kinetics (Note: $D_{10} = -\ln(0.1)/k$)

Microbe	k (cm ² /mJ)	D ₁₀ (mJ/cm ²)		
<i>Cryptosporidium</i>	2.30	1.0		
<i>E. coli</i>	0.677	3.4		
Hepatitis A virus	0.307	7.5		
Rotavirus	0.230	10		
MS2 phage	0.128	18		
Adenovirus	0.0959	24		
Microbe	N _{or} (CFU/100mL)	k _r (cm ² /mJ)	N _{op} (CFU/100mL)	k _p (cm ² /mJ)
Primary (TSS=68 mg/L)	4571136	0.875	12209	0.0807
Secondary (TSS=5 mg/L)	225840	0.540	720	0.059
Tertiary (TSS=1.5 mg/L)	64236	0.557	13.6	0.025

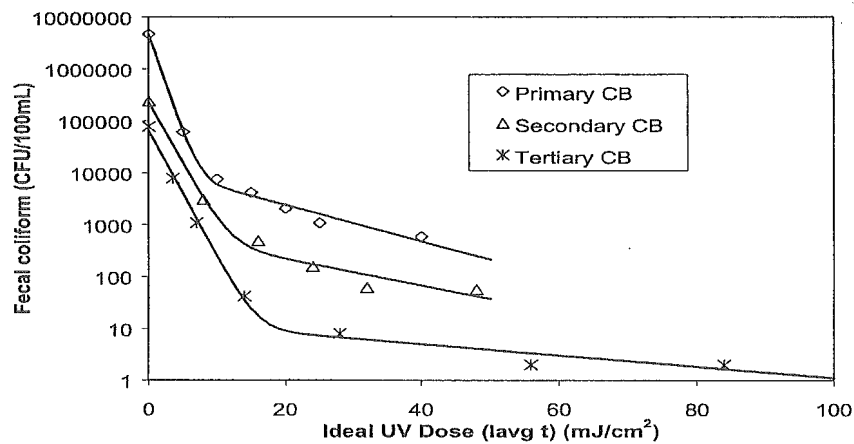


Figure 7 - Wastewater UV Dose-Response Kinetics as Determined Using a Collimated Beam Apparatus.

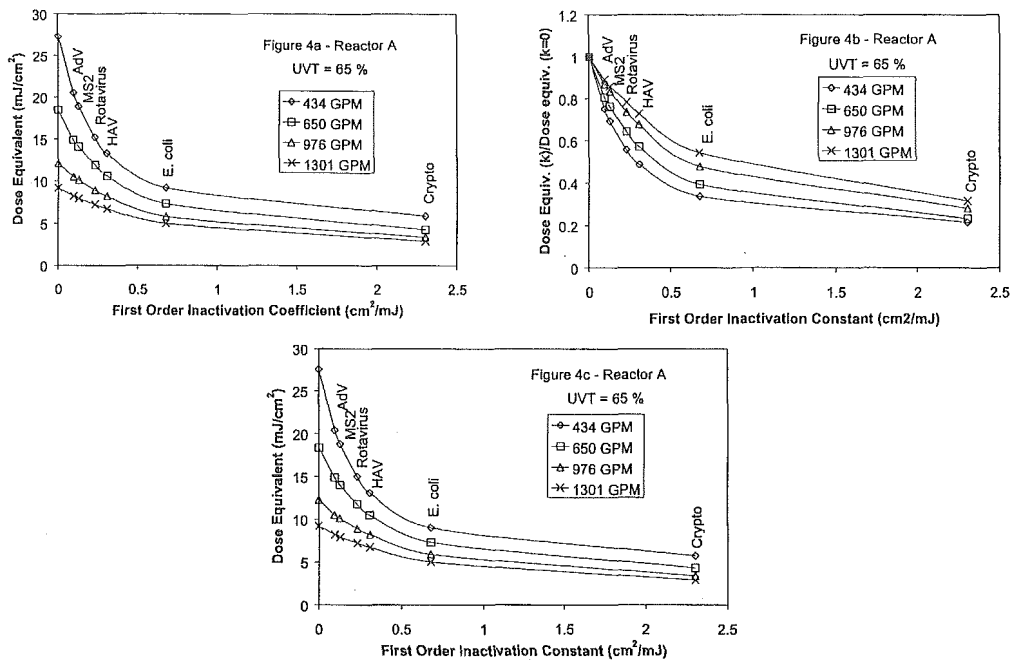


Figure 8 – Dependence of the UV Dose Equivalent and Hydraulic Efficiency on the Microbe First Order Inactivation Coefficient for a Range of Pathogens of Concern in UV Disinfection. (a) Simulation of Reactor A Treating Water with a UV Transmittance of 65%. (b) Hydraulic efficiency determined as the ratio of Dose Equivalent at k to the Dose Equivalent as $k \rightarrow 0$. (c) Simulation of Reactor A using the CFD Particle Track Data for a Flow of 1301 GPM Scaled to Other Flow Rates.

Figure 8b では、 $k=0$ の時との等価紫外線量の比を示している。 $k=0$ に近づくにつれ、理想状態の流れになるので、Figure 8b より、水力効率が分かる。低流速に比べ、高流速の方が、等価線量が低くなるのが分かる。このことより、高流速のほうが、より、理想的な水力条件に近いように見える。しかし、Figure 8c より、この仮定が誤りであることがわかる。Figure 8c では、1301 GPM の流速のデータを下に、CFD モデルにより、流速をスケール変化させ、その他の流速の場合をシミュレーションしたものであり、その結果が Figure 8a とほぼ適応し、流速の差異により大きな影響が生じないことがわかる。流速の差異により、水力効率の変化が生じた理由としては、式(4)内の kD_i が流速に逆比例するものであり、その他に紫外線出力や紫外線透過率による影響を受けるため、流速の違いにより、水力効率が変化する。

Figure 9 では、紫外線透過率 65%、434 GPM における微生物の不活化率を、理論値による不活化率と比較して示している。MS2 の 4log 不活化 ($D_{10}=18 \text{ mJ/cm}^2$) をバイオアッセイ試験により評価した場合、MS2 バイオアッセイ等価線量は、 72 mJ/cm^2 となり、rotavirus ($D_{10}=10 \text{ mJ/cm}^2$) に関しては、 $4 \sim 72/10=7.2 \text{ log}$ の不活化が得られるものと思われる。このように、バイオアッセイを行った微生物より紫外線耐性を有する微生物の場合、等価不活化線量は、より大きくなり、不活化率は減少すると思われる。本法則は、廃水中のように、紫外線の用量-応答曲線に 2 相性がある場合は、適用ができない。

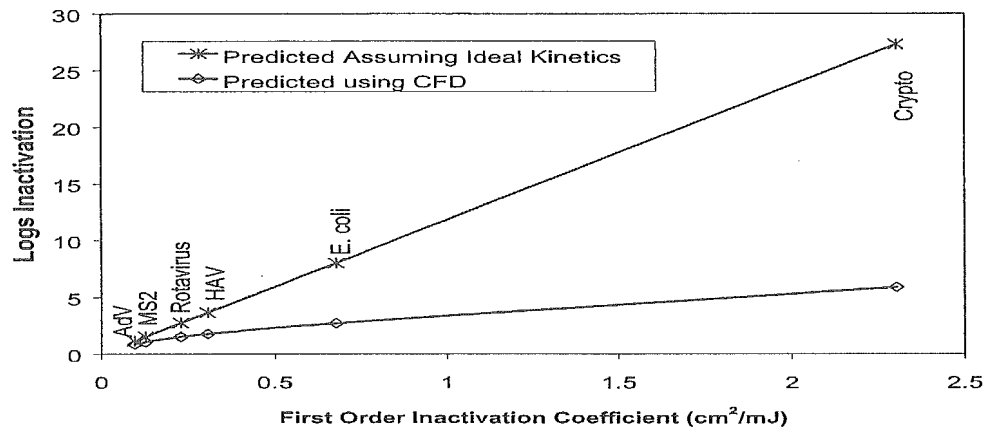


Figure 9 - Log Inactivation of Various Pathogens by Reactor A Treating a Flow of 434 GPM at a UV Transmittance of 65%.

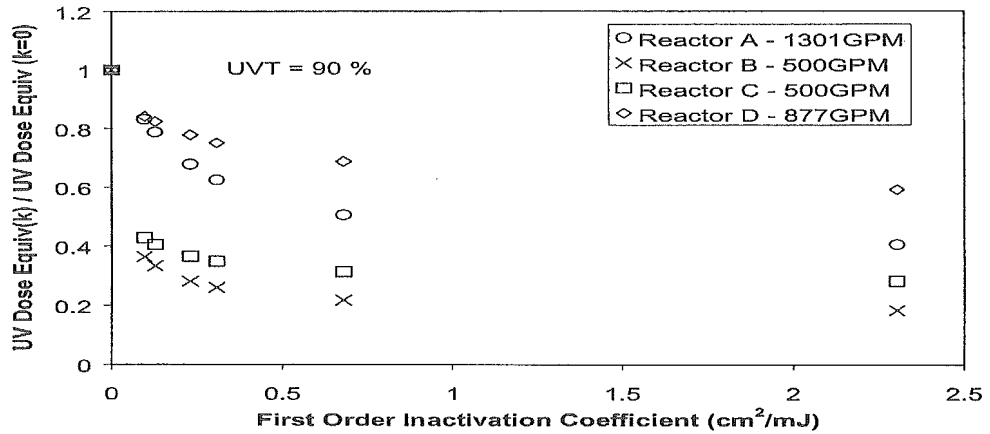


Figure 10 - Comparison of the Hydraulic Efficiency of Reactors A Through D as a Function of the Microbes First Order Inactivation Coefficient.

Figure10 は、reactorA~D までの、装置効率を一次不活化定数により示したものである。Figure10 に示されるように、一番水理効率の高い reactor D は、Figure 5 において、一番紫外線量の分布幅が狭い。逆に紫外線量の分布幅が一番広い Reactor B は、一番、水理効率が悪い。水理効率と最小照射線量/平均照射線量の値の相関を Figure11 に示す。この結果は $r^2=0.98$ という高い相関が得られた。即ち、水理効率を上げることは、最小照射線量/平均照射線量の値を上げることに繋がる。

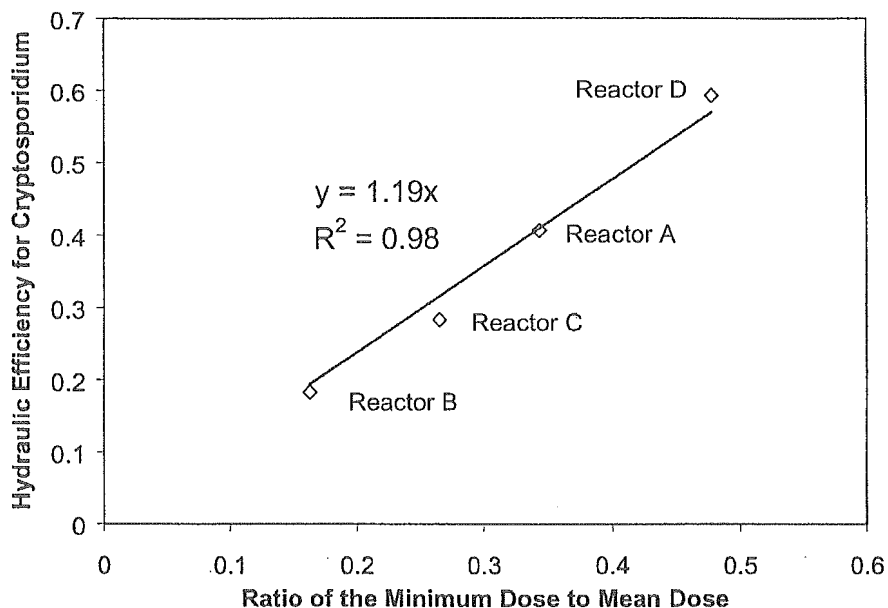


Figure 11 – Hydraulic Efficiency for *Cryptosporidium* Inactivation as a Function of the Ratio of Minimum to Mean Dose for Various UV Reactors

水理効率のみで、紫外線装置の性能を評価する場合は、注意が必要である。環状の紫外線装置は、水層が薄いため、非常に水理効率がよいのだが、紫外線は、装置内壁より、透過し、ランプよりのエネルギーを効率的には利用できない。もっとも、理想的な装置は、最小のコストで必要な消毒効果が得られる装置なのである。

Figure12では、紫外線透過率を65%として、下水の一次、二次、三次処理の消毒効果をMS2ファージの実験結果を元に、算出した。本図より、平行ビームを照射した装置より算出した結果より、大きな、紫外線の用量一応答曲線が得られている。このことは、実験装置内での紫外線量の分布が非効率的であったことを示している。

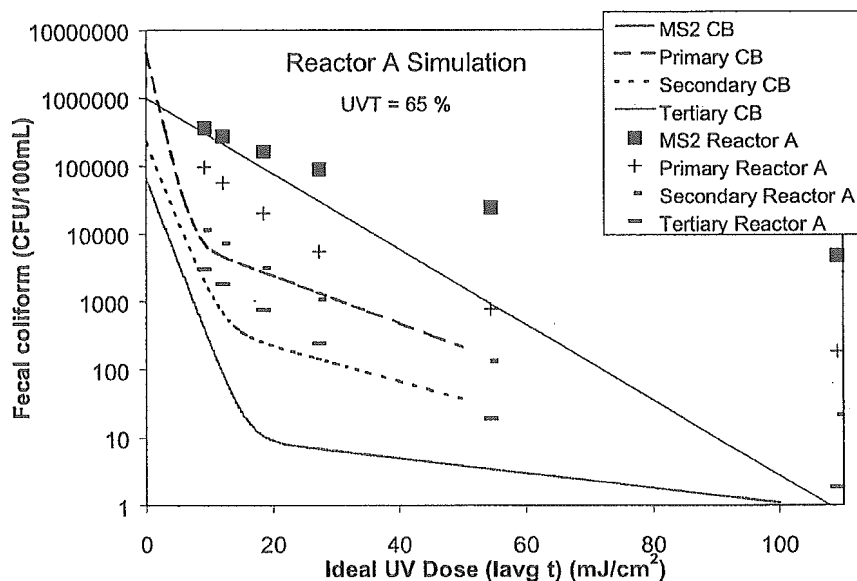


Figure 12 – Prediction of Reactor A Performance Disinfecting Various Wastewaters.

廃水中の紫外線の用量応答曲線には、2つの部分がある。1つは、濁質が付着していない低線

量での不活化であり、もう1つは濁質が付着した高線量での不活化である。ここで、濁質は紫外線の吸収及び遮蔽物として機能している。

Table3にて、reactorAを用い、下水道一次処理水へ適用した場合の理論照射線量と等価線量の比較を行う。このtable3より、MS2は、一次処理水中の大腸菌による等価線量に比べ、高線量条件では、過小評価され、低線量では、過大評価されることがわかる。

Table 3 – Comparison of the Dose Equivalent of MS2 to that Associated with Primary Wastewater Disinfection by Reactor A at 65% UV Transmittance.

Ideal Dose ($I_{avg} \times t$) (mJ/cm^2)	Dose Equivalent (mJ/cm^2)	
	MS2	Primary Wastewater
100	39	59
20	15	12

Figure13では、Trojan UV4000を用いて、pilot実験を行った結果を示している。Figure 14では、Bacillusの希釈液を用いてTrojan UV2000によるバイオアッセイ試験を行った。

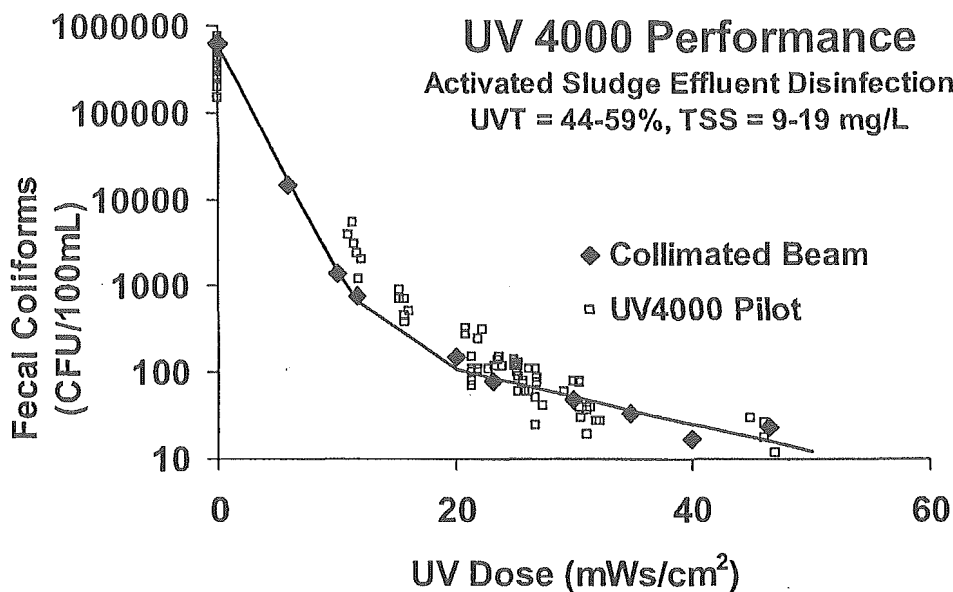


Figure 13 – Bioassay Challenge Results for a Commercial Medium Pressure Trojan UV4000 Reactor.

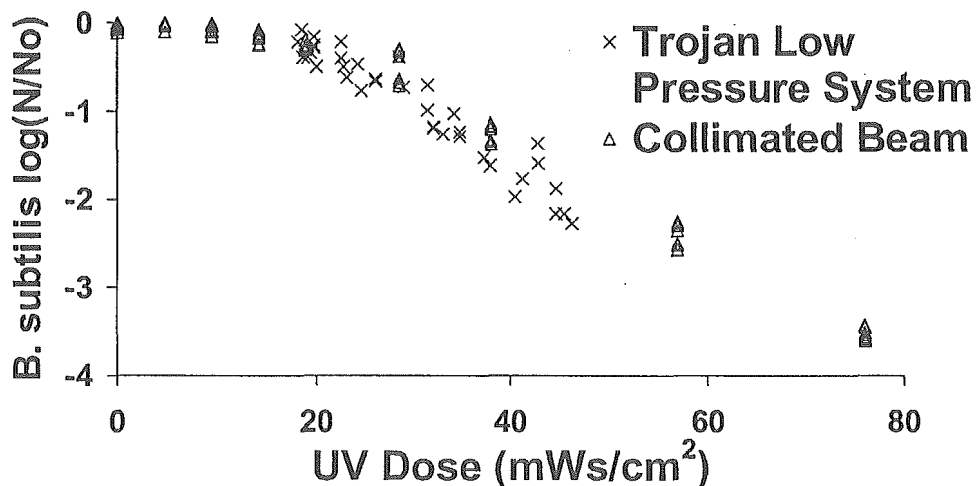


Figure 14 - Bioassay Challenge Results for a Commercial Low Pressure Trojan UV2000 Reactor.

結論

- ・ 紫外線量分布幅の狭い実験装置においては、等価線量は、近似的に、平均照射線量×照射時間で表される。
- ・ 装置内の紫外線量分布は、光学モデルを使用することにより、CFD モデルを用いて、予測が可能である。
- ・ 紫外線量の分布は微生物の紫外線による不活化メカニズムと相関があり、等価線量により、不活化を予測することが可能である
- ・ 微生物の不活化定数が 0 に近づくにつれ、等価線量は平均線量に近づき、不活化定数が増加するにつれ、等価線量は、最低線量へと近づく。

- ・ 装置内の水理効率は、平均線量と等価線量の比により表される。
- ・ 非理想状態の水理条件下では、紫外線装置の出力や、流速と、等価線量の間には、線形関係は成立しない。
- ・ 等価線量が、紫外線装置の出力及び流速と線形関係にあり、微生物の紫外線耐性により変化しない場合、装置は理想状態に近いといえる。
- ・ 対象となる微生物と同程度の紫外線耐性を有する微生物を用いて、バイオアッセイ試験を行う必要がある。
- ・ 一次不活化反応を想定し、 D_c の線量で、 n の不活化が得られた微生物($D_{10}=D_c$)より、強い紫外線耐性を有する微生物($D_{10}=D_m$)の場合、不活化の程度は $n \sim D/D_m$ の間になる。
- ・ 一次不活化反応を想定し、 D_c の線量で、 n の不活化が得られた微生物($D_{10}=D_c$)より、弱い紫外線耐性を有する微生物($D_{10}=D_m$)の場合、不活化の程度は $n \sim D/D_m$ の間になり、等価線量は $D \sim n \times D_m$ の間になる。
- ・ 廃水中における不活化効率は、2 相性の不活化機構となる。おもに、微生物単独の不活化と、微粒子に付着した微生物の不活化が行われる。水理的非効率の程度にもよるが、廃水を扱う紫外線装置は、微生物そのものの不活化が制限因子となる低線量よりも、微粒子に付着した微生物の不活化が制限因子となる高線量の方が、消毒効率が高いと思われる。
- ・ 微生物の紫外線耐性及び、適用線量(平均線量×照射時間)によるが、バイオアッセイによる線量は、不活化下した微生物を用いた等価線量に比べ、変化する可能性があるため、廃水を扱う装置に適用する場合は注意を要する。
- ・ 実際に販売をしている商品を用いて、紫外線消毒の効率化の検討を行った。効率的な紫外線消毒は、装置設計、対象水の紫外線透過率、不活化する微生物のメカニズムによって決定されるものである。

Cryptosporidium parvum の不活化に及ぼす紫外線波長の影響

Comparative effectiveness of UV wavelengths for the inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts in water

K.G.Linden, G.Shin and M.D.Sobsey ら

1. 概要

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 2mJ/cm² の紫外線照射を行った結果、250~275nm の波長に関しては 2log₁₀ 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、2log₁₀ の効果が得られなかった。

2. 実験方法

C. parvum オーシスト (Iowa 株) は、ID, Troy, Pleasant Hill Farm より精製したものを、抗生物質を含んだ緩衝水に、懸濁状態で、5℃にて保存し、精製より 2ヶ月以内に使用した。オーシストの活性試験は、Madin-Darby canine kidney (MDCK) cell culture 法により実施し、オーシストの活性の度合いに関しては、顕微鏡視野にて、免疫蛍光による *C. Parvum* の活性が認められたサンプルの希釈液を用いて、Thomas 式に拠る MPN 法により算出した。

5mL の PBS 溶液に溶かしたオーシストを ~10⁶/mL になるよう調整し、60×15 mm のペトリ皿に静置し、マグネチックスターラーにより緩やかに攪拌しながら、紫外線装置 (Calgon Carbon 社、Pittsburgh, PA) を用いて、紫外線照射を行った。照射実験終了後、サンプルは紫外線照射装置より回収し、10倍毎の希釈列を作成して、感染性の試験を行った。

紫外線帯域通過フィルター (FS10-50, Andover Corp, Salem, NH) を *C. parvum* の不活化に有効な波長を検討するため使用した。各フィルターは、10nm の波長を持ち、それぞれ 216, 230, 242, 255, 263, 271, 281, 291nm の波長にてピークを有する。各フィルターの特性を Table. 1 に示す。各波長域にてオーシストには、2mJ/cm² の紫外線を照射した。紫外線強度は、potassium ferrioxalate 化学光量計を用いて測定した。平均紫外線照射量は、サンプル水の深さを考慮に入れ、lambert-beer の法則に基づき、計算を行った。また、分光分析計 (Spectral Instrument 330, Spectral Instruments, Tucson, AZ) を用い、各フィルターより透過した波長の計測を実施した。

Table 1 Characteristics of bandpass filters

Filter	Peak wavelength	Half peak bandwidth	Filter	Peak wavelength	Half peak bandwidth
214	216	211-220	260	263	258-267
228	230	225-234	270	271	266-277
239	242	236-247	280	281	276-287
254	255	250-261	289	291	286-297

3. 結果

Figure. 1 に示すように、250~270nm の波長域において、2mJ/cm² の照射線量にて、1.8~2.3 log₁₀ の不活化効率が得られた。それ以外の波長域においては、250~270nm の波長域に比べ、不活化効率が低いことが確認された。この紫外線の不活化効率は、E. Coli (Gates, 1929) で得られた結果と同じ傾向にある。このことより、他の微生物の不活化機構同様、*C. parvum* も紫外線により、核酸

の DNA に損傷を受け、不活化がおこなわれるものと思われる。

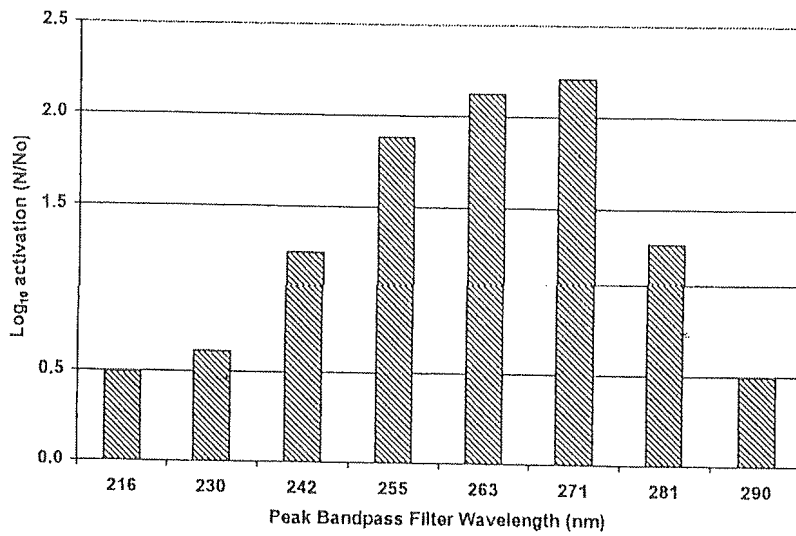


Figure 1 Relative germicidal effectiveness of UV wavelengths for inactivation of oocysts by 2 mJ/cm²

4. 結論

バクテリアやウイルスに比べ、低い線量で *C. parvum* の不活化は可能であるので、*C. parvum* の不活化を考慮しても装置設計に大きな差異は生じない。このことより、紫外線装置を設計する場合は、より紫外線耐性を有する微生物 (rotavirus, adenoviruses 等) を対象として、紫外線照射装置の設計を行う必要があると思われる。

数値モデルを用いた紫外線照射装置の性能把握及び最適化について

UV REACTOR CONCEPTUALIZATION AND PERFORMANCE OPTIMIZATION WITH COMPUTATIONAL MODELING

Marc-Olivier Buffle ら

1. 概要

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、少ない値となる。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。

2. はじめに

紫外線消毒は、塩素消毒でもちいられる CT 値の概念を取り入れ、濃度の代わりに紫外線強度によって、評価を行っている。しかし、Figure 1 に示すように、装置内は乱流であり、紫外線強度は均質ではなく、平均照射線量により設計を行っても、理論どおりの不活化性能を実際に得ることができない。

装置設計を行うにあたり、バイオアッセイを行うことで、装置の有効性を示すことが必要であり、平均紫外線量にて設計をするべきではない。

装置の最適化にあたり、バイオアッセイを行うには、コストがかかり、装置内の紫外線による不活化性能を予測可能な手法の開発が求められ、

CoDiM(Computational Disinfection Model)が考案された。

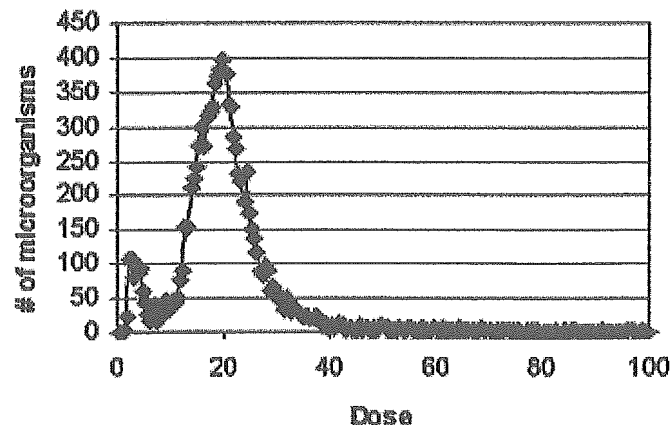


Figure 1 Dose distribution curve of a cross flow system (Chiu et al.,1999).

紫外線消毒モデル

完全混合槽においては、不活化の式は下記のように表される。

$$\frac{dN}{dt} = -kIN$$

(N:微生物濃度、I:紫外線強度、t:紫外線照射時間)

しかし、実際の紫外線照射装置においては、真の紫外線照射線量を求めるため、数多くの手法が用いられている。

Scheible(1987)は、装置内の分散性も考慮に入れ、一次不活化モデルを作成したが、複雑な形状の装置には、適用ができなかった。