

$$\ln \left[\frac{N}{N_0} \right] = -kD_{eq} \quad (1)$$

N_0 = UV 光暴露前の生存する生物数

N = UV 光暴露後の生存する生物数

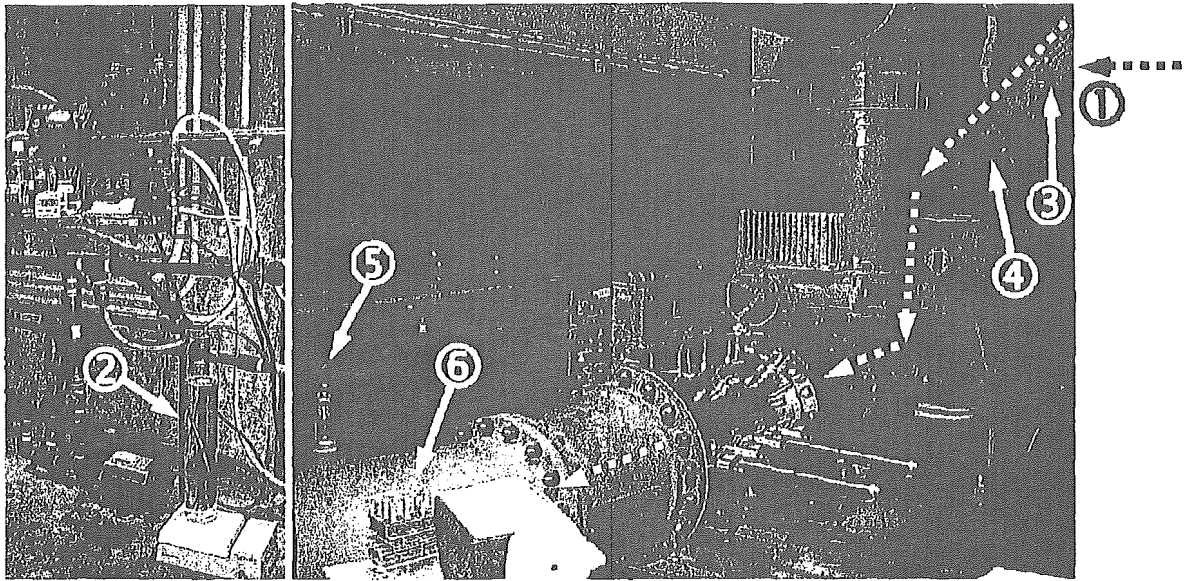
k = 光化学反応定数 (cm²mJ⁻¹)

D_{eq} = 等殺菌力 UV 照射量

両 UV ランプの反応速度定数を表 2 に示した。反応速度はそれぞれ-0.48 及び-0.47cm²mJ⁻¹ で同程度であった。

3.1.3 仮想した配水システム中の滞留の影響

図 5 に、UV を照射したサンプル (図 5a) と対照サンプル (図 5b) の従属栄養細菌の培養結果を示す。対照実験では生物ろ過流出水のバクテリアは比較的安定して 10⁵~10⁶CFUml⁻¹ 程度であった。無菌化した対象実験では、3 日間受け入れられる水準の低濃度 (<10¹CFUml⁻¹) であった。しかし、7 日目には 10⁰ から 10²CFUml⁻¹ の間まで増加する傾向があった。面白いことに、UV 照射をしていない、微生物を植えた対照実験は 3 日後に微生物が劇的に再増殖し、7 日間の試験結果と同程度の濃度で一定となった (ろ過流出水濃度)。このことは、十分な BOM がろ過水流出水に残っており、従属栄養細菌が栄養的に制限されなかったことを示す。これらのデータは、UV は微生物の代謝を抑制するという文献 (Lund & Hongve 1994) に矛盾するが、滞留性の消毒剤がなければ、従属栄養細菌は配水システム中で生き延びるという情報 (Wricke et al. 2002) には従うものである。



- Legend**
- ① Treated water from the biological filter entered the 18-inch diameter pipe here (dashed lines indicate flow path through system)
 - ② 1×10^{11} plaque-forming units (PFU) ml^{-1} MS-2 stirred in graduated cylinder, pumped at 300 ml min^{-1} into transport water
 - ③ Extraction location for transport water to make MS-2 slurry, pumped at a flow of 10 gpm
 - ④ 10 gpm MS-2 slurry injection location (provided approximately 4×10^8 PFU ml^{-1} MS-2 for a four minute period in the 3 mgd flow)
 - ⑤ Sample location for characterizing reactor effluent water
 - ⑥ MS-2 sampling tubes and ice chest

図2 生物反応調査装置のセット。注入口や採水口が見える

UV 処理を行ったサンプルでは、消毒と再増殖に関して混合した結果が観察された。初期の UV 投与量を $20 \sim 140 \text{ mJcm}^{-2}$ とした結果、微生物が顕著に減少した。しかしながら、UV 暴露後生存する微生物数は以前の報告 (図4) から得られた量-反応関係に基づいた予測をはるかに上回っている。20, 60, 140 mJcm^{-2} の UV 暴露量と、上で述べた量-反応関係速度に基づくと、微生物は検出不可能レベルで存在していたと予測される。UV 光を適用後のサンプルを無菌技術を用いて採取したが、生存する微生物の増加はわずかであった。

20 及び 60 mJcm^{-2} による UV 処理では、従属栄養細菌の測定濃度は3日で 10^5 CFUml^{-1} に達した。 140 mJcm^{-2} による処理では、3日後にも再増殖は0に近い (常に $< 10^2 \text{ CFUml}^{-1}$)。これらの 140 mJcm^{-2} の UV 暴露サンプルは7日間の培養により、より低い UV 暴露サンプルの結果と同程度 ($> 10^5 \text{ CFUml}^{-1}$) になった。

20 mJcm^{-2} の UV 暴露をつづいて 2.5 mg l^{-1} の残留クロラミンと組み合わせた場合、対象実験以下の微生物濃度になり、再増殖がないことが観察された (10^1 CFUml^{-1} 以下)。7日間の試験における残留クロラミン濃度は0, 3, 7日の培養においてそれぞれ 2.5, 1.0, 0.5 mg l^{-1} となった。

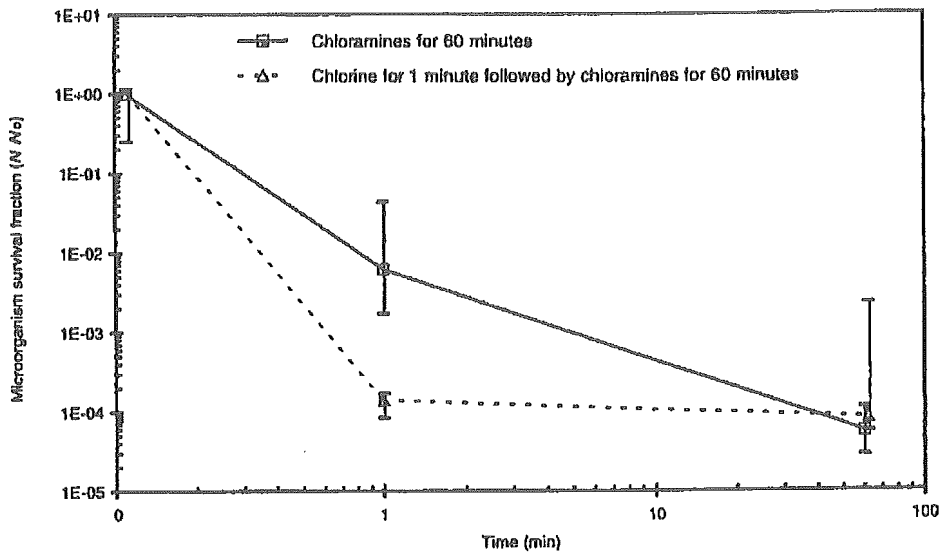


図3 生物ろ過から流出する従属栄養細菌の塩素及び／あるいはクロラミンの消毒後の影響（縦棒はデータの最大・最小値を示す）

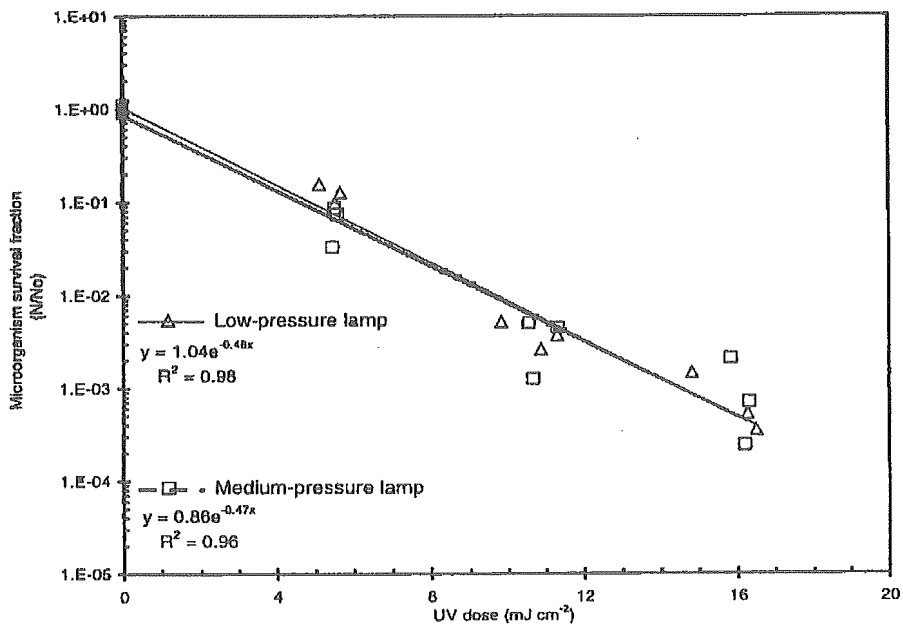
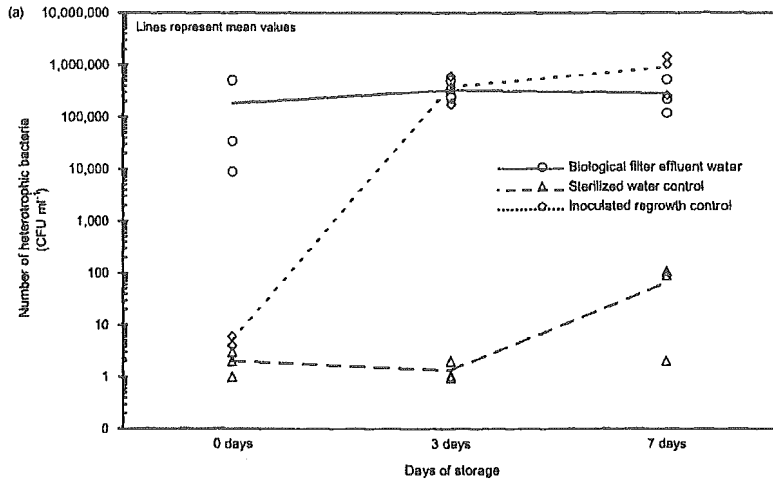


図4 生物ろ過から流出する従属栄養細菌の低圧・中圧のUVランプによる消毒後の影響（縦棒はデータの最大・最小値を示す）

3.2 生物ろ過流出水のフルスケールのUV処理

オゾン/生物ろ過法に続き、フルスケールのUV処理槽を運転し、流出水の従属栄養細菌の滅菌能力を観察した。従属栄養細菌の傾向を図6に示した。表1は微生物と他の水質データを示した。配水水質の区別の簡略化のため、研究期間をフェーズ1~3のカテゴリーに分けた。フェーズ1と

3はSPWとCRWのブレンド水であり、フェーズ2は100%SPWであった。研究期間を通じて気温は上昇していったが、生物ろ過からの微生物の放出は 10^4 CFU/ml-1でほぼ一定であった。原水の変化はUV処理後の結果には大きく影響しないことが予測される。



10^7 CFU/ml-1であった。

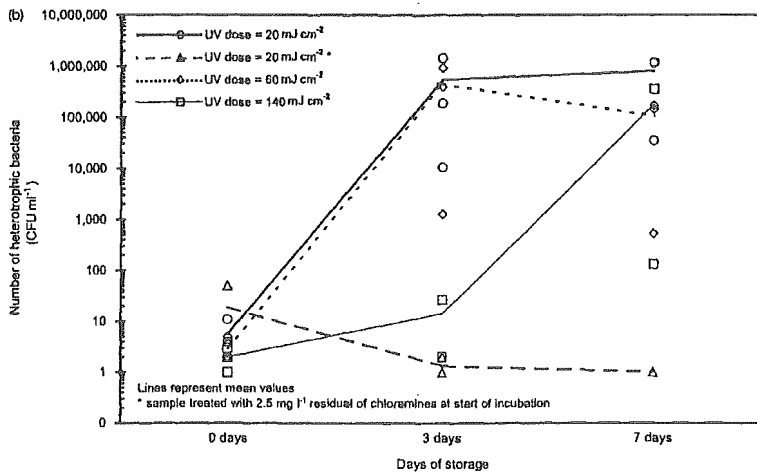


図5 低圧UV光により処理された従属栄養細菌の気温20度、暗所における培養の影響。a)対照実験 b)サンプル(クロラミン添加量2.5, 1.0及び0.5mg/l-1)

± 0.8 mg/l-1であった。

UV消毒に続き、運転後57日後まで微生物数は10CFU/ml-1以下であった。57日後以降は、反応槽を離れる微生物数は着実に増加し、177日目には211CFU/ml-1となる。これは対照期間を通じておよそ1log10の減少となる処理効果である。フェーズ3におけるUV反応槽を離れる微生物数の中央値は

生物ろ過の下流側では、UV及びクロラミン処理を塩素/クロラミン処理と平行して行った。両実験での浄水池のクロラミン残留濃度を図7に示した。UV処理後の浄水池の流入・流出水のクロラミン残留濃度はそれぞれ 2.5 ± 0.4 及び 2.3 ± 0.7 mg/l-1であった。同様に、塩素処理後のクロラミン残留濃度はそれぞれ 2.4 ± 0.4 及び 2.2

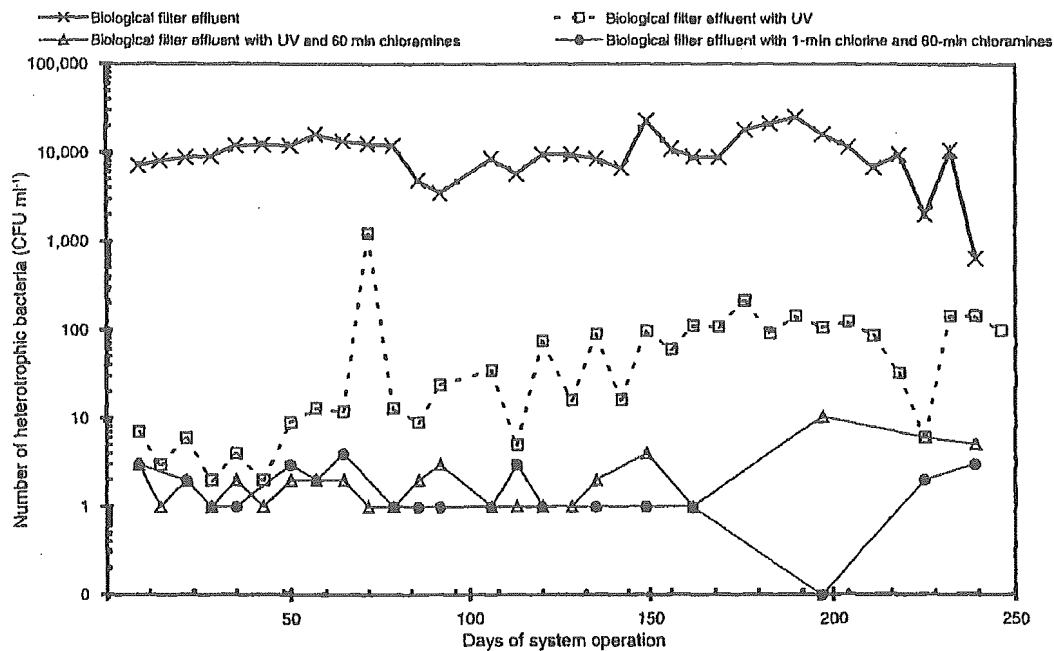


図6 フルスケールの生物活性ろ過から流出する従属栄養細菌の処理の影響（クロラミン添加量 = 2.5mg l⁻¹, 塩素は 2.5mg l⁻¹ となるよう添加, 微生物数 1CFU ml⁻¹ 以下は 0 点にプロット）

UV 消毒後にクロラミン処理を行った浄水池の流出水においては、生物カウント数は常に小さいものであった。UV/クロラミン処理を離れる微生物数は 197 日目に 10CFU ml⁻¹ でピークとなった。塩素/クロラミン処理後の浄水池においても安定して低濃度であり、最高濃度が 65 日目の 4CFU ml⁻¹ であった。二つの組み合わせた処理法は t 検定により評価され、統計学的に同等（この同等というのは不検出の値を t 検定に含めても成立する）であった。UV 反応槽流出水の微生物カウント数は統計学的に UV/クロラミン処理や塩素/クロラミン処理による残留消毒後のいずれよりも大きいものであった。

4 議論及び結論

通常の水質基準を守るため、北米の多くの水道施設は塩素からオゾン処理へ切り替えている。水道施設はおそらくオゾンにより生成される BOM 濃度を低減させるために生物ろ過を行うであろう。この研究は 2.6mg l⁻¹ の遊離塩素、クロラミン及び両者の組み合わせを UV 光単独及び UV と 2.6mg l⁻¹ のクロラミンとの組み合わせと比較し、生物ろ過から流出する微生物の十分な制御を行うものである。ベンチスケールの結果では、1 分の塩素接触、60 分のクロラミン接触、15mJcm⁻² の殺菌 UV 光の照射が 10CFU ml⁻¹ 以下の水準に微生物を制御することができた。配水の前に従属栄養細菌を制御するために、事業者はこれら 3 つの方法から用地の要求事項や DBP の量の両方に基づいて選択することになるだろう。UV 消毒の投与レベル (<200mJcm⁻²) はハロゲン化 DBP を

生成あるいは増加させないことは示されており (Stewart et al. 1993; Malley et al. 1995; Liu et al. 2002), UV 消毒は多くの事業者にとって魅力的な生物ろ過流出水の消毒技術となるだろう。

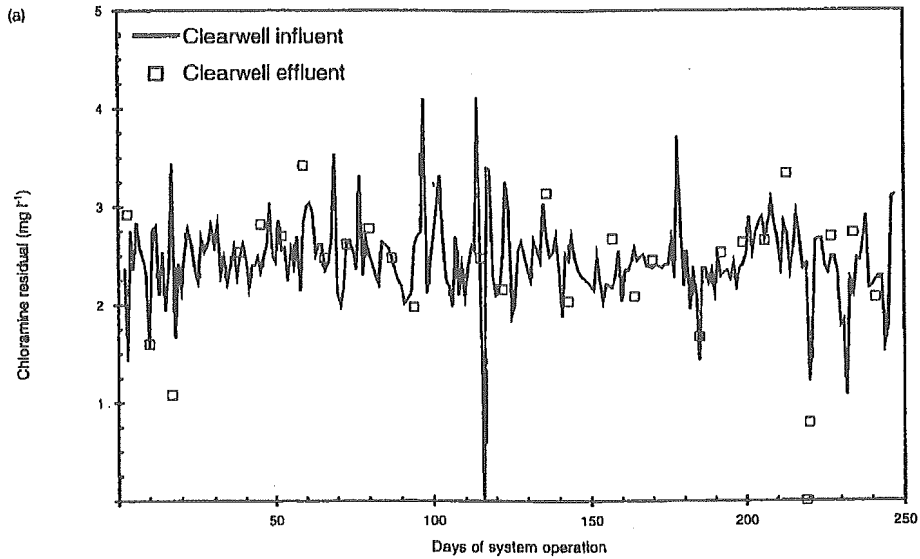


図 7a

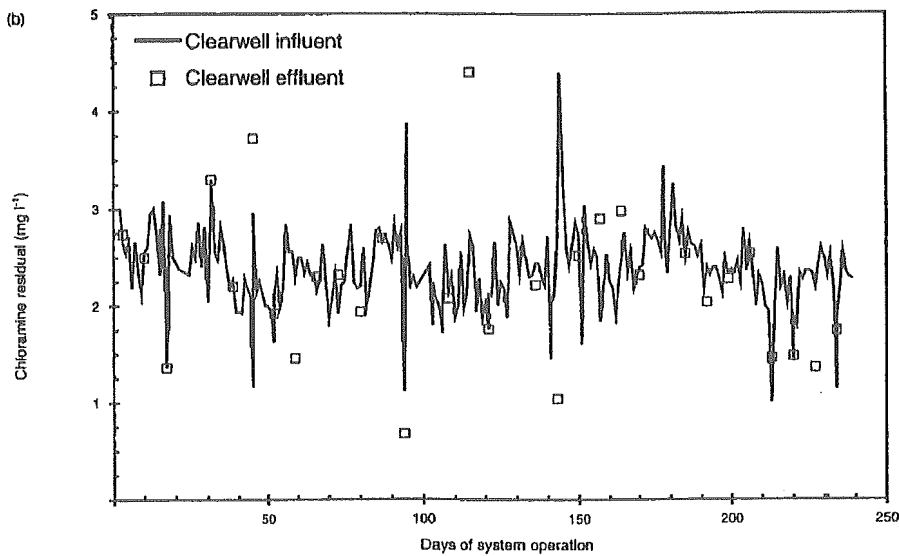


図 7b a)生物ろ過/UV 処理及び b)生物ろ過/塩素処理における残留クロラミン濃度 (直線が浄水池の入り口、四角が出口)

消毒効果の評価に続き、さらなるベンチスケールの試験により残留性消毒物質は滞留する、あるいは配水される水における微生物の再増殖を限定するのに必須であることが示された。この結果は UV は処理水に微生物的定常性を水質に与えるという過去の報告に矛盾する。生物ろ過の流出水の微生物の制御に関し、遊離残留塩素がないこと (ハロゲン DBP の低減) を望む事業者もあ

るだろうし、60分の接触時間より早くクロラミンとの接触を行うこと（を低減するため）を望む事業体もあるだろう。

これらの事業体には、UV消毒過程は有利であると考えられる。しかしながら、ベンチスケール試験ではUV処理単独では十分微生物を制御することはできない。このことは十分なBOMが生物ろ過過程の下流側に残っていることを示し、それにより従属栄養細菌は増殖において栄養的に限定されていないことを示す。この再増殖現象は生物ろ過あるいはUV消毒がうまくいっていないことを必ずしも示すわけではない。むしろ、飲料水中の自然の微生物コミュニティのたくましい性質を説明する過去の文献に一致するものである。従って、生物ろ過下流のバクテリアの制御はUV光または塩素の後のクロラミン処理を含めるのが適切な処理プロセスと言えそうである。

これらの処理を大規模で実施することの妥当性を調べるため、3mgd (0.13m³s⁻¹) の、中圧UV反応槽をオゾン及び生物ろ過法の下流側に設置した。5分の塩素接触と60分のクロラミン接触 (Cl₂/NH₂Cl)、及びUV照射後60分のクロラミン接触 (UV/NH₂Cl) の二つの生物ろ過後の処理シナリオを評価した。

UV反応槽の方では、生物ろ過下流の微生物数を2log₁₀以上減少させることができ、微生物数は10CFUml⁻¹以下となった。実験が166日以上進むにつれ、UV処理後の微生物数は着実に増加し100CFUml⁻¹程度まで増加した。この増加はを一定の低濃度で反応槽を通過する微生物がUV照射部分の下流側で増殖した結果と考えられる。この考えられる増殖は残留性消毒物がないことで可能となるであろう。光反応バクテリアの場合、中圧UVランプから発せられる可視光により拡大することが考えられる（可視光の波長はUVの波長に比べて水中でより遠くまで届く）。残留性消毒物質を適用した場合、統計的に同様な微生物の制御を行うことができ、確実に10CFUml⁻¹以下の水準まで制御できた。

浄水施設が生物膜法ろ過水の微生物を適切な管理を維持するには、紫外線だけによる消毒は十分とは言えない。

この研究は、紫外線の照射によって処理された生物膜法ろ過水中の一般細菌の数が250日以内に100CFU mL⁻¹のレベルまでに増加するかもしれないことを示した。

実物の紫外線照射処理を経た水における微生物の存在は紫外線の消毒過程に問題があるとは考えられなかった。

すなわち、研究において、実証された処理装置の状態から重大な逸脱はないと考えられた。ベンチスケールテストは、従属栄養細菌が貧栄養水中でも増殖（再生）する生来備わっている能力を持っていることを示した。

中圧紫外線ランプの実装置の下流における従属栄養生物の増殖は以下の理由によるものと考えられる。

- ①より多くの耐紫外線従属栄養菌が生物膜に捕捉されたこと
- ②紫外線照射装置の下流における菌の急速な増殖能力
- ③中圧ランプから発する可視光線による微生物の増殖促進の可能性

生物膜から離された従属栄養細菌の最適な処理は、浄水施設の浄水フローにおける微生物の管理優先度及び副生成物の形成の可能性を抑える（すなわち、遊離塩素との接触の最小化）目標で運転するのを必要とするかもしれない。

これらの結論は、浄水施設が配水システムにおいて、微生物を低量に抑制するため、短時間の塩素消毒を行うことが効果的であるかもしれないことを示す。

副生成物の形成を最小限にするときに、短時間の塩素消毒を持つ紫外線照射装置は浄水施設に微生物の管理を維持する余裕を持たせるかもしれない。

今後の研究が、さらに次の生物膜の消毒特性（すなわち、有機体抵抗率の範囲、生物分解性有機物の影響）及び周期的な塩素消毒をともなった長時間紫外線照射手法による従属栄養細菌の不活化を持続するために行われるべきである。

シンガポールの現在及び将来における紫外線処理の適用について

Ultraviolet Application in Singapore-Current Status and Future Trend in Water Production

Nicola A.Ballester , James P.Malley Jr.

シンガポールにおける水需要

約 400 万人の生活用水及び工業用水として、シンガポールで 140 万 m³/日の水を消費している。この内、約 50%を工業用水が占める。この内、半分の量をマレーシアから Public Utilities' Board's Johor River Waterwork が、原水として購入している。

水の再生利用は、海水淡水化に比べ、建設費は半分で済み、維持管理費も 1/4 ですむ。水の再生利用には、MF 膜、RO 膜、及び紫外線消毒の組み合わせ処理が、水不足に悩む地域で用いられている。シンガポールでは、2012 年度までに、シンガポールの水需要の 15~20%を占めると思われる。

2 次処理水の紫外線消毒

2 次処理水の紫外線消毒後の水は、下記の 3 つの用途で用いられる。(1)冷却、洗浄用水(2)MF 膜に給水(MF 膜処理の後段にて、RO 膜処理を行い、高品質の水を製造する)(3)貯水池や地下水への返送

紫外線消毒システムの実施設の設計緒元の一例を Table1 に示す。濁質を除去するために、ストレーナーを設置し、手動のストレーナーを前段に、自動洗浄のストレーナーを後段に設置した。

Table 1. Design parameters of direct UV disinfection of secondary effluent.

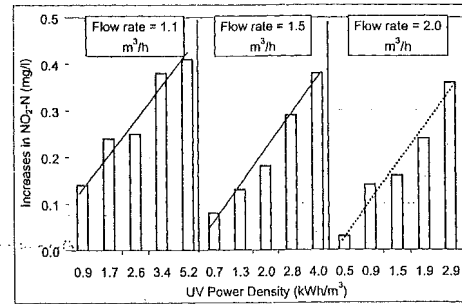
| Design Parameter | Unit | Design Value |
|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Total Suspended Solids | mg l ⁻¹ | 30 |
| BOD _{5d} | mg l ⁻¹ | 20 |
| UV _{253.7 nm} Transmittance | T% | >65 |
| Capacity | m ³ d ⁻¹ | Up to 13,000 |
| UV Reactor Type | | Open channel |
| Channel Length | m | 8 |
| UV Lamp Bank | | 2 |
| Lamp Type | | Low pressure high output |
| Number of Lamp | Per bank | 10 |
| Energy Input | mW cm ⁻³ | 6.15 |
| Inactivation | log | 4 |

この施設では、紫外線消毒後の水を、飲料水としては利用せず、電気設備の戦場や、床の清掃等に利用している。

別の事例では、2 次処理水に中圧紫外線ランプを用いた RayOx システムにて、紫外線消毒を実施している。この施設では紫外線照射強度は、2~1.060mJ/cm² の範囲内で調整しており、前段に砂ろ過施設を設けている。このシステムの施設能力は、2m³/hr であり、スリーブの自動洗浄機構を有している。

水質の内、紫外線照射により、硝酸塩の光分解が生じ、NO₂-N が減少する現象が生じている(Figure.1)。他の水質項目では、大きな変化は見受けられない。

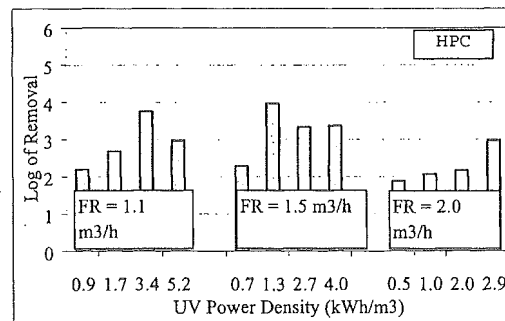
Figure 1. Influence of flow rate and UV power density on changes in NO₂-N concentration of the secondary effluent (Xie et al. 2003).



6個の1kW中圧ランプを稼働させ、流量が1.1m³/hrの際に、NO₂-N濃度が最大になった。この際は、原水中のNO₂-N濃度が0.04-0.12mg/Lに対し、浄水中のNO₂-N黄土が0.09-0.62mg/Lとなったが、US EPAの1mg/Lの基準値以下であった。Figure.1に示すように、紫外線照射量と亜硝酸塩の生成は、線形関係にある。

従属栄養細菌(HPC)の変化をFigure.2に示す。紫外線消毒により、1.8~5.5logの不活化が得られている。流量により、紫外線照射量が決まり、消毒に影響を及ぼす主要因となっていることがわかる。

Figure 2. UV power density and flow rate as related to removal of heterotrophic plate count from secondary effluent (Xie et al. 2003).



再生水への紫外線消毒の適用

2次処理水からの再生水を製造する場合、再生水は dual-membrane たとえば、MF膜処理をRO膜処理を行ったのち、紫外線消毒を行う。Figure.3に処理プロセスを示す。

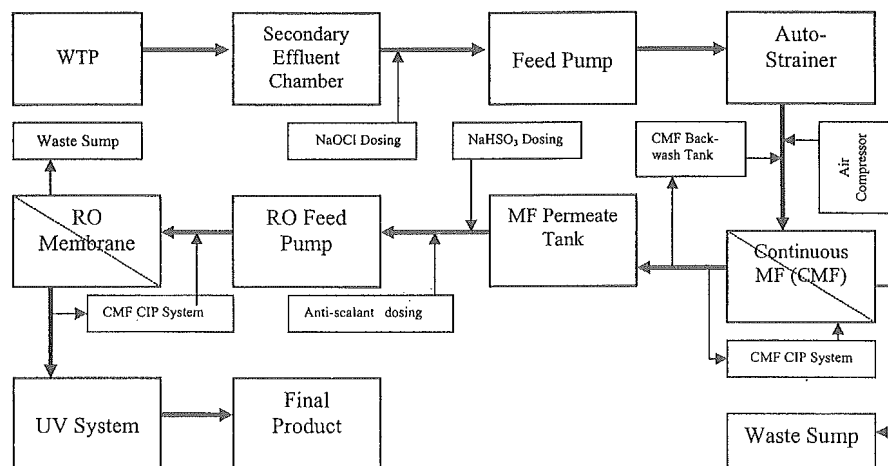


Figure 3. Block diagram of the water reclamation from secondary effluent (the MF is either the Continuous Microfiltration system or the submersed suction microfiltration system and the UV system is either low pressure high output or medium pressure unit).

Figure.4 に示すプロセスにおいて、multi-barrierにより、最終処理水の汚染を防いでいる。

10,000m³/dの実証実験により、組み合わせ処理の性能を確認後、Table2に示す実施設の建設を実施した。この3つの施設の合計施設能力は96,000m³/dである。

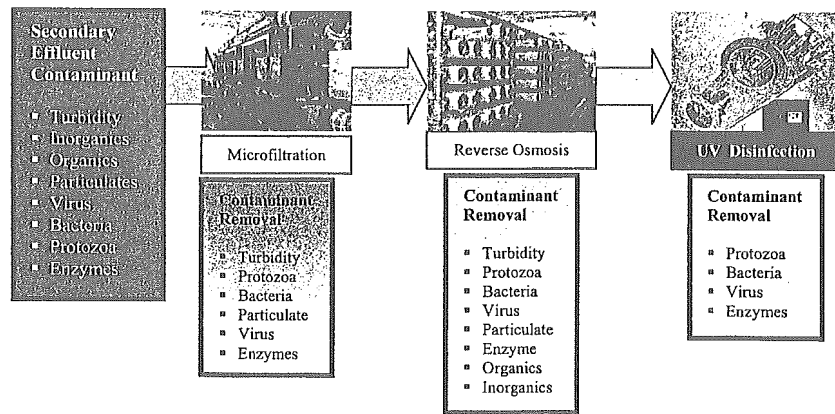


Figure 4. Multi-barrier approach for removal of contaminants in water reclamation process. Different MF, RO and UV systems might be employed according to local conditions.

Table 2. Capacities of water reclamation plants and UV systems employed after the RO member unit operation.

| Water Reclamation Plant | Capacity (m ³ d ⁻¹) | UV System | In Operation Since |
|-------------------------|---|---|--------------------|
| A | 32,000 | 2+1 units of PHOTON® Medium Pressure system | January 2003 |
| B | 40,000 | 2+1 units of PHOTON® Medium Pressure system | December 2002 |
| C | 24,000 | BX 1200, Spektrotherm® HP lamps, Low Pressure High Output | May 2004 |
| D | 40,000 | To be determined | 2006 |

これら3つの再生処理施設においては、2種類の紫外線システムが導入されている。ひとつは、高出力低圧ランプであり、のこりの2つには、中圧ランプが用いられている。設計基準をTable.3に示す。

Table 3. Design criteria for ultraviolet system for disinfection in water reclamation.

| Parameters | Water Reclamation Plant | | | Remarks |
|--|-------------------------|--------|--------|---|
| | A | B | C | |
| UV Units | 2+1 | 2+1 | 2+1 | UV system is proceeded by automated strainer, MF and RO membrane unit operations. |
| Lamps per Unit | 2 | 2 | | |
| Power per Lamp (kW) | | | | |
| Lamp Life Span (hours) | 35,000 | 35,000 | 80,000 | |
| Feed Flow Rate (m ³ hr ⁻¹ unit ⁻¹) | 1,000 | 1,000 | 1,000 | |
| Max Feed Pressure (kPa) | 100 | 100 | 100 | |
| UV _{253.7nm} Transmittance (%) | 90 | 90 | 90 | |
| Min UV Fluence (mJ cm ⁻²) | 60 | 60 | 90 | |
| Virus Reduction (log) | >4 | >4 | >4 | |
| Bacteria Reduction (log) | >4 | >4 | >4 | |

ランプ寿命が終わるまで、60mJ/cm²の紫外線量を照射し、少なくとも、4log以上の不活化が得られるよう設計されている。

Table4 に示すように、MF膜、RO膜処理により汚染物質は完全に除去され、また、Table5 に示すよう病原体濃度も検出限界以下とされている。60mJ/cm²の紫外線照射量において、MS-2 大腸菌ファージサロゲートは、7log以上の不活化が得られた (Figure.5)。この結果より、MF膜、RO膜、紫外線消毒により、ウイルス、バクテリア、原虫類の水質項目においても高品質の水が得られていることがわかる。

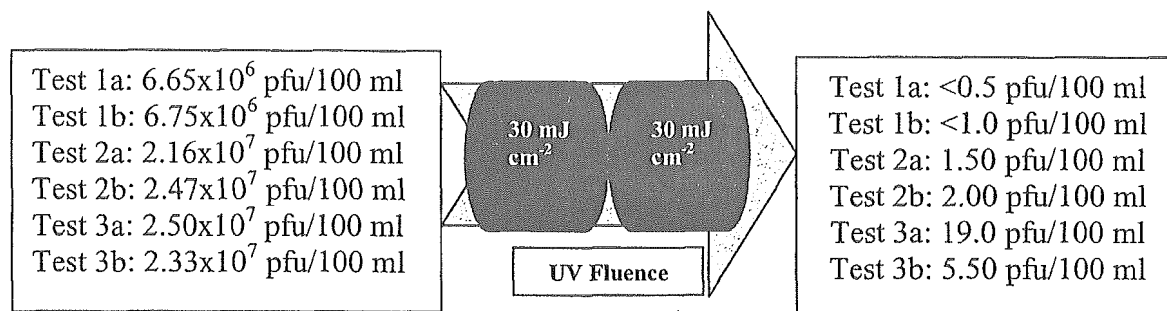


Figure 5. UV disinfection challenge tests with MS-2 coliphage surrogate at flow rate of 200 m³ hr⁻¹ (modified from Poon, 2002).

Table 4. The reclaimed water quality in comparison with USEPA and WHO drinking water standards/guidelines (Ong et al., 2002).

| Water Quality Parameters | Reclaimed Water | USEPA /WHO Standards |
|---|-----------------|-----------------------|
| Physical | | |
| Turbidity (NTU) | <5 | 5 / 5 |
| Colour (Hazen units) | <5 | 15 / 15 |
| Conductivity (µS/cm) | <200 | Not Specified (- / -) |
| pH Value | 7.0 – 8.5 | 6.5-8.5 / - |
| Total Dissolved Solids (mg/L) | <100 | 500 / 1000 |
| Total Organic Carbon (mg/L) | <0.5 | - / - |
| Total Alkalinity (CaCO ₃) (mg/L) | <20 | - / - |
| Total Hardness (CaCO ₃) (mg/L) | <20 | Not available |
| Chemical (mg l⁻¹) | | |
| Ammoniacal nitrogen (as N) | <0.5 | - / 1.5 |
| Chloride (Cl) | <20 | 250 / 250 |
| Fluoride (F) | <0.5 | 4 / 1.5 |
| Nitrate (NO ₃) | <15 | - / - |
| Silica (SiO ₂) | <3 | - / - |
| Sulphate (SO ₄) | <5 | 250 / 250 |
| Residual Chlorine (Cl, Total) | <2 | - / 5 |
| Total Trihalomethanes (as mg/l) | <0.08 | 0.08 / - |
| Metal (mg l⁻¹) | | |
| Aluminium | <0.1 | 0.05-0.2 / 0.2 |
| Barium (Ba) | <0.1 | 2 / 0.7 |
| Boron (B) | <0.5 | - / 0.9 |
| Calcium (Ca) | <20 | - / - |
| Copper (Cu) | <0.05 | 1.3 / 2 |
| Iron (Fe) | <0.04 | 0.3 / 0.3 |
| Manganese (Mn) | <0.05 | 0.05 / 0.5 |
| Sodium (Na) | <20 | - / 200 |
| Strontium (Sr) | <0.1 | - / - |
| Zinc (Zn) | <0.1 | 5 / 3 |
| Bacteriological | | |
| Total Coliform Bacteria (cuf 100 ml ⁻¹) | Not detectable | Not detectable |
| Enterovirus | Not detectable | Not detectable |

Table 5. Summary of reclaimed water microbiological results at the demonstration plant (Ong et al., 2002).

| Parameter | Unit | Min | Max | Mean | No. Samples | No. Detectable | No. Non-Detectable |
|--|----------------------------|-----|-------|--------|-------------|----------------|--------------------|
| Faecal Coliforms | cfu 100 ml ⁻¹ | ND | ND | NC | 99 | 0 | 99 |
| Total Coliforms | cfu 100 ml ⁻¹ | ND | ND | NC | 99 | 0 | 99 |
| HPC | cfu 100 ml ⁻¹ | 1.1 | 80 | 52 | 97 | 80 | 17 |
| Coliphage-somatic ⁽¹⁾ | pfu 100 ml ⁻¹ | ND | ND | NC | 87 | 0 | 87 |
| Coliphage-male specific ⁽¹⁾ | pfu 100 ml ⁻¹ | ND | ND | NC | 87 | 0 | 87 |
| Enterococcus | cfu 100 ml ⁻¹ | ND | 2E-01 | NC | 99 | 1 | 98 |
| <i>Clostridium perfringens</i> | cfu 100 ml ⁻¹ | ND | ND | NC | 91 | 0 | 91 |
| <i>Giardia</i> | cyst 100 l ⁻¹ | ND | ND | NC | 16 | 0 | 16 |
| <i>Cryptosporidium</i> | oocyst 100 l ⁻¹ | ND | ND | NC | 17 | 0 | 17 |
| <i>Enterovirus</i> | present/absent | - | - | absent | 21 | 0 | 21 |

(1) These parameters are additional to those listed in the USEPA and WHO standard/guidelines.

(2) ND=Not detectable; NC=Not calculated.

飲料水における紫外線消毒一試案

シンガポールには、飲料水を供給する6つの浄水場がある(Table.6)。これらの施設においては、主要な消毒剤として、オゾン、塩素ガス、クロラミンが利用されている。紫外線消毒は、従来の消毒剤に比べ利点があり、北米やヨーロッパにおいても導入が進んでおり、シンガポールにおいても紫外線消毒を導入することは効果があると思われる。

紫外線消毒を導入するに当たり、下記の手順を踏む必要がある。(1)生物線量計の開発(2)実証実験および生物線量計による検証(3)実証及び技術の承認(4)実証された技術のフルスケール施設への導入

Table 6. Water production capacity at different waterworks.

| Waterworks | Design Capacity (thousand m ³ d ⁻¹) | Primary Disinfectant | Remarks |
|-------------|--|----------------------|---|
| WW1 | 135 | Ozone | Production varies in each plant and changes with operation protocols. |
| WW2 | 72 | Chlorine gas | |
| WW3-Phase I | 270 | Chlorine gas | |
| Phase II | 270 | Chlorine gas | |
| WW4 | 360 | Ozone | |
| WW5-Phase I | 1,125 | Chloramine | |
| -Phase II | | Chloramine | |
| -Phase III | | Ozone | |
| WW6 | 200 | Chlorine gas | |
| | Note: UK gallon | | |

生物線量計の開発

生物線量計は、ヨーロッパ(ONORM,2001;Cabaj et al,2002)や北米(USEPA, 2003: Malley,2000; Clancy et al)等の例を参照に開発される。最低等価紫外線照射量(REF)に応じて、指標となる微生物及び水系病原性微生物が選定される。熱帯条件における病原性微生物は、太陽による紫外線照射を長時間、高強度で受けているため、他の地域に比べ、紫外線耐性が強い可能性がある、そのため、熱帯の病原性微生物の消毒に際しては、生物線量計、REFが異なる可能性がある。

実証実験および生物線量計による検証

試験室実験により得られた生物線量形の実験に基づき、高出力低圧ランプ若しくは低圧ランプのパイロットプラント施設が計画、設置される。この施設(20-30m³/hr)の性能は、少なくとも6ヶ月以上計測をおこなう。この結果より、浄水場の一つにおいて技術の実証を行う際に必要な、最低REFを決定する。

実証及び技術の承認

パイロットスケールでの実験がうまくいけば実施での紫外線消毒を実施する。その際の検討項目は下記の通りである。(1)流入水質(2)水系病原性微生物のスペクトル感受性に基づくランプ及びシステムの選定(3)施設能力及び四季の変動(4)施設の改良及びコスト(5)性能検証(6)塩素消毒。実証がうまくいけば、標準手法及びガイドラインを作成し、他の浄水場建設の際の参考となる。

実証された技術のフルスケール施設への導入

紫外線消毒施設の実証で得られた知見は他の浄水場においても、非常に重要なものとなる。

飲料水の紫外線消毒—必要事項、試験、調査：オーストラリア国家規格 M5873-1、M5873-2 の実例
UV drinking Water Disinfection-Requirement, Testing and Surveillance : Exemplified by the
Austrian National Standards M5873-1 And M 5873-2

Regina Sommer, Alexanader Cabaj, Thomas Haider, Georg Hirschman

序文：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。

安全な紫外線消毒のための必要事項

安全な水を供給する際の USEPA における基準は、バクテリア、ウイルスは、4log の不活化が必要であり、原虫類は、3log の不活化である。この基準を満たすためには、紫外線照射は、次の3段階の手法により、有用であることを示す必要がある。

- ①水系伝染性微生物の紫外線耐性の把握
- ②市販の紫外線装置の客観的評価
- ③調査

下記において、Austrian National Standards ÖNORM M 5873-1(2001)、ÖNORM M 5873-2(2003)の紹介を行なう。

紫外線源

紫外線源としては、単色の低圧ランプ(253.7nm)と、多色光の中圧ランプがあり、詳細を Table1 に示す。

Table 1: Some characteristics of low and medium pressure UV systems

| | Low pressure | Medium pressure |
|---------------------------------|---|--|
| UV-radiation (spectrum) | quasi monochromatic 253,7 nm | polychromatic 200 (240) – 400 nm |
| Energy consumption of the lamps | low (40 -100 W) | high (e.g. 7 kW) |
| Water flow | lower water flows (< 1000 m ³ /h) | higher water flows (>1000 m ³ /h) |
| Percentage UVC | 30% | 10% |
| Heat development | low | high |
| Influence on water components | so far known, no changes | Nitrite (< 240 nm) Assimilable organic carbon (AOC)? Gentoxic effective substances? |

低圧ランプと中圧ランプの違い

低圧ランプの生物線量計の適用手法は、中圧ランプにても適用可能であり、その際には、253.7nm に換算した Reduction Equivalent Fluence として評価される。

中圧ランプは、多色光を有するため下記の要件を満たす必要がある。①微生物、生物線量計の波長毎の紫外線耐性②対象微生物と同様の紫外線感度を有する紫外線センサー③適用原水と同様の紫外線透過率を有す適切な物質

中圧ランプにおいては、240nm 以下の波長において、硝酸塩を生成する可能性や、AOC の増加に伴い、予期しない物質が生成する可能性がある。(Haider et al.,2001、Haider et al.,2002、Haider et al.,2003、Ijpelaar et al.,2003)

生物線量

生物線量の対象微生物として、MS2 大腸菌ファージがアメリカでは用いられることが多く、ヨーロッパでは、Bacillus subtilis spore を用いることが多い。これらの微生物を紫外線装置に暴露させ、紫外線処理前後の減少率 $\log(N/N_0)$ (N_0 : 初期濃度、 N : 照射後の濃度) を算出し、その値より、253.7nm における校正曲線を用いて UV253.7m,での紫外線量算出を行なう。この紫外線量を Reduction Equivalent Fluence(REF253.7nm)と呼ぶ。(Cabaj et al., 1996)

REF は、懸濁物質による照射線量分布の不均一、紫外線透過率、ランプ出力等に影響を受ける。中圧ランプの場合、個々の波長により微生物の紫外線耐性も考慮に入る。

定義

1. 生物線量計

REF を算出するために、実験室の装置において紫外線に対する挙動が既知の微生物を用いられている。

2. Reduction Equivalent Fluence(REF)

規格に基づき、生物線量計を用いて、決定した紫外線装置内の平均照射線量。「J/m²」の表記。

3. Reference irradiance

紫外線装置内に設置した紫外線センサーによる計測された照射量。「W/m²」の表記。

Reference irradiance は、紫外線出力、紫外線透過率、保護スリーブ内の膜生成等に地峡を受ける。

4. 最小 Reference irradiance

流量と紫外線透過率が既知の際に、REF400J/m²を満たす Reference irradiance。

5. 最大流量 Qmax

紫外線透過率と reference irradiance が既知の際に、REF400J/m²を満たす最大流量

6. センサー

Reference irradiance を測定するための電機光学システム

7. Reference sensor

プラント内のセンサーとは別に、257.3nm(←253.7nm の間違いと思われる)の波長にて、非定期的に reference irradiance を測定する校正済みのセンサー

8. プラントセンサー

プラント内にて、連続的に reference irradiance を測定するセンサー

9. 紫外線透過率(% T100)

40mm 以上の光路長をもつガラスセルを用いて、253.7nm の紫外線波長における紫外線透過率を分光光度計にて測定した。「%」表記。

10. Alarm point

運転パラメーター(reference irradiance、紫外線透過率)にて、適切な消毒が行なわれていることが保証できなくなる限界値

11. 容認できる運転範囲

最低 400J/m²が保証できる流量、Reference irradiance、紫外線透過率 の範囲

統一された条件での実験室での紫外線照射

a)253.7nm のパッチ装置(低圧ランプ)

紫外線の実験室装置を Figure.1 に示す。1列につき10の低圧水銀ランプ(EK36；長さ500mm、Katadyn)を水平に設置した。平行な紫外線のみ照射されるように100mmの開口を紫外線ランプ下に設置した。また、開口に光学ワ

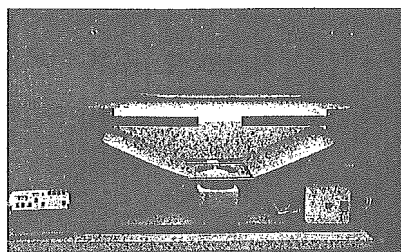


Figure 1 - Laboratory batch irradiation device according the requirements of Austrian National Standard M 5873 (safety front shield removed)

イヤメッシュを設置することにより、紫外線照射強度を2.0、0.2、0.02W/m²に調整が可能である。直径90mmの殺菌済みペトリ皿に対象の懸濁液(25mL)を添加し、常時攪拌しながら、紫外線照射を行なった。紫外線量は、オンラインのradiometer IL 1700SED 240(International Light)を用い

て、測定し、サンプルの透過率や液表面での反射(2.5%)を考慮に入れた。本装置は、Austrian National Standard M 5873-1、2 の必要事項を満足している。

平均紫外線束 E_0 (W/m^2) は、下記の式で表される

$$\overline{E_0} = \frac{E_{0,a}}{d} \times (1 - 10 \lg \tau_m \frac{d}{d_m}) - \lg \tau_m \frac{d_m}{d} \times \ln 10$$

$E_{0,a}$: 対象懸濁液表面での紫外線束(W/m^2)

d : 懸濁液までの距離(m)

d_m : 分光光度計での距離(m)

τ_m : 距離 d_m の分光光度計にて、計測した懸濁液の internal transmittance(dm)

近年、多くの微生物の 253.7nm における紫外線耐性に関する情報が収集されており、その一部を Figure.2 に示す。

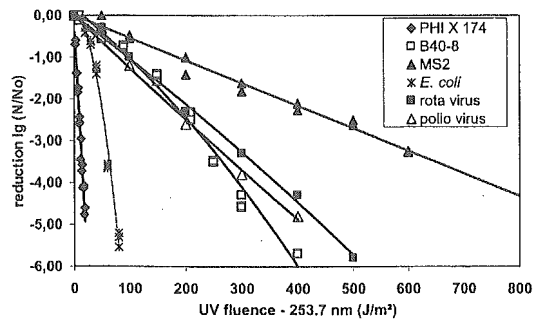


Figure 2. UV-253.7 nm inactivation of pathogenic (poliovirus, rotavirus) and indicator microorganisms (bacteriophages PHI X 174, MS2, B40-8 and bacteria *E. coli*, and spores of *B. subtilis*) under controlled and standardized batch conditions

Figure.3 に 7 種の *E.coli* 株の紫外線不活化曲線を示す。Figure.3 に示されるように、紫外線耐性は各々かなり異なる。

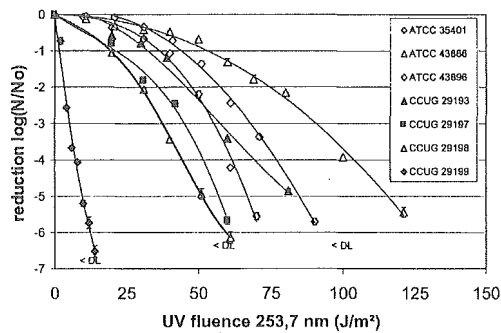


Figure 3. UV-253.7 nm inactivation of seven pathogenic *E. coli* strains, including EHEC O157:H7 strains: CCUG 29197, CCUG 29199, CCUG 29193 (29)

安全な水消毒の基準を考慮し、ウイルスを 4log 不活化するには、253.7nm の紫外線を 400J/m² 照射する必要がある。そのため、Austrian

National Standard M 5873 では、この数値を規定している。この値は、*E.coli* のように、光回復するバクテリアも対象としたものである。

b)253.7nm における生物線量計による校正(低圧ランプ)

半対数の不活化率は、下式で表される。

$$\lg \frac{N}{N_0} = \lg \left[1 - (1 - 10^{-k \times H_0})^{10^d} \right]$$

$\frac{N}{N_0}$: 生存率

k : 生存曲線の傾き (m^2/J)

H0 : 紫外線束(J/m^2)

d : 直線部の縦軸切片と原点の距離

100~800 J/m^2 の範囲内で少なくとも 8 つの紫外線束に対して生物線量計の校正を行なう必要がある。k,d のパラメーターを非線形回帰曲線(上式参照)より算出した。

定数 k,d は、ONORM M 5873-1,2 に拠れば、下記の範囲に収まると思われる。

$$k=0.0065 \pm 20\%(m^2/J)$$

$$d=0.7 \pm 30\%$$

REF は、下式で表される。

$$REF = -\frac{1}{k} \lg \left[1 - (1 - 10^{\lg \frac{N}{N_0}})^{10^{-d}} \right]$$

$\frac{N}{N_0}$: 紫外線消毒施設における生存率

Figure.4 に図解を示す。

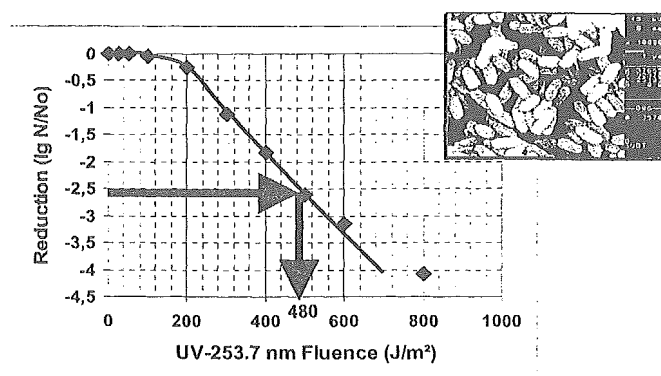


Figure 4. Principle of the analysis for the evaluation of the Reduction Equivalent Fluence during biosimetric type test.

c)異なる波長におけるパッチ装置(単色光分光器)

多色光による紫外線照射を行なう際には、対象微生物の各波長における紫外線感度が必要になる。この調査のために、照射原として 400W Cermax のキセノンランプと単色光分光器(Jobin-Yvon HL)を利用した。25mL 容器に 20mL のサンプルをいれ、常時攪拌しながら、紫外線照射を行なった。懸濁液表面の照射量は、分光放射計(Bentham DTM300)を用いて測定した。分光放射計の校正は、PTB(Physikalisch Technische Bundesanstalt,Braunschweig,Germany)に準拠した。単色光の帯域幅は 20nm である。懸濁液のスペクトル吸収は、分光光度計(1cm セル)にて測定した。

ONORM の生物線量計を用いた結果を Figure.5 に示す。2log 不活化するのに必要な紫外線量は

354nm では、 400J/m^2 であるが、352nm では、 8000000J/m^2 である。

単波長の不活化データより、対象微生物の各波長における紫外線耐性を把握することが出来る。Figure.6 に紫外線耐性係数 k と、肩幅の係数 d の各波長における変動を示す。

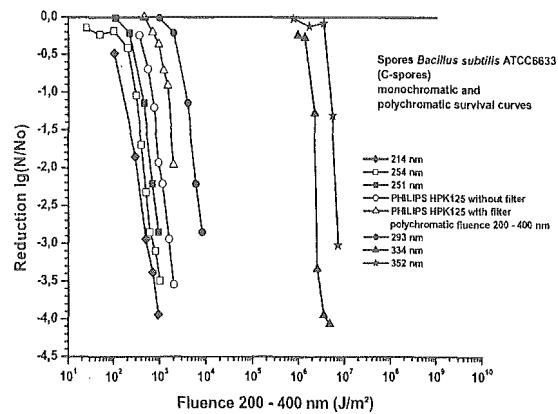


Figure 5. UV Inactivation of the ÖNORM biosimulator (spores of *B. subtilis* ATCC 6633) at different wavelengths.

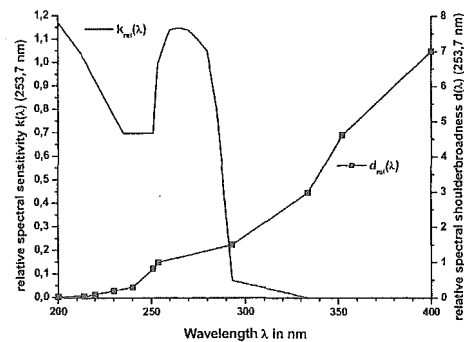


Figure 6. Spectral sensitivity (relative to the wavelength of 253.7 nm) of *Bacillus subtilis* spores ATCC 6633 used as biosimulator in the Austrian National Standards M 5873-1 and M 5873-2 expressed as wavelength dependence of k (UV sensitivity coefficient) and d (shoulder broadness coefficient).

REF 測定のための生物線量試験

各条件において、紫外線前後のサンプルを 5 回採取した。

Bacillus subtilis spore の濃度計測には、標準寒天培地に pour plate 法を用いた。 $37 \pm 1^\circ\text{C}$ にて 48 ± 4 時間培養し、希釈法により、1 皿につき、 $20 \sim 200$ のコロニーに収まるよう 3 皿に接種した。実験条件が均一であれば、5 個のサンプルの標準偏差は ± 0.2 の範囲に収まるはずである。

本試験の流れの中で、生物線量計の紫外線耐性に関しては、安定性を示すために、少なくとも 2 回は、生物線量計を含め試験水に対するバッチ実験を行う必要がある。この試験水には、それぞれ、 $200, 400, 600\text{J/m}^2$ の紫外線量を照射した場合、 k, d の値が、上記で示した標準不活化関数の範囲内に収まると思われる。

実験運転時の適格な運転及び調査範囲

1. REF 400J/m^2 を得られる Reference irradiance 時の最大流量より低くすることにより、的確な運転範囲を設置する。Alarm point と適格な運転範囲は、流量と reference irradiance から得られるデータにより決定される。

2. 紫外線施設の実施設の通常運転において、これらの項目が影響を与えると思われる。