

低圧ランプシステムの標準生物線量計の必要条件は下記のとおりである。

- 試験性能
- 生物線量計
- reference sensor
- plant sensor
- 実験条件
- 紫外線透過率
- REF

試験結果を用いて、ある一定の REF が設定されている条件下で、実験条件の限界値を設定することにより、適格な運転範囲をきめることが可能になる。

多色光の中圧ランプシステムを試験、運転する際の追加必要事項は、下記のとおりである。

多色光の照射による紫外線束の定義付け：下記の3種類に大別される。

- 1)絶対線量
- 2)対象微生物の紫外線耐性、若しくは、DNA 吸収スペクトル等による波長毎の重み付け
- 3)生物線量試験の結果に拠る REF

紫外線のスペクトル分布

紫外線透過率

微生物の波長毎の紫外線耐性

reference sensor 及び plant sensor の紫外線感度

Table 2 に生物線量試験の結果を示す。多くの実験施設において、REF は想定値より小さな値となっている。

Table 2 - Results of biosimetric type testing according to the Austrian National Standard M 5873 versus the UV fluence calculated by the manufacturer. Simultaneously performed tests with enterococci are shown for comparison.

Flow (m <sup>3</sup> /h)	Water Transmittance % (253,7 nm; 100 mm)	Reference Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	REF <sup>1)</sup> (J/m <sup>2</sup> ) measured	UV Fluence (J/m <sup>2</sup> ) calculated	reduction lg(N/No) <i>E. faecium</i>
0.49	10	- <sup>2)</sup>	< 200	400	> 6
0.49	82	- <sup>2)</sup>	< 200	400	> 6
19.0	37	16.5	293 ± 10	420	> 6
28.0	88	50.8	325 ± 13	420	> 6
90.0	80	39.4	447 ± 10	580	> 6
400.0	90	103.4	450 ± 15	340	> 6

<sup>1)</sup> Reduction Equivalent Fluence  
<sup>2)</sup> UV plant not equipped with a UV sensor

生物線量試験が最も紫外線消毒の性能を定量的に評価できることが示されてきている。紫外線消毒の実験プラントにおいて、生物線量試験を適用することにより、安全な水が得られるだけで

なく、エネルギーや建設材といったコストを抑えた最適紫外線消毒施設を設計することが可能となる。

## 結論

紫外線消毒による安全な水を給水するために、下記の提言を行なう。

1. 市販の紫外線消毒施設は、紫外線装置内に基準位置に、校正済みの紫外線センサーを取り付ける必要がある。そのセンサーは、公的は規格による検査が出来るよう、取り外しが可能なものとする必要がある。
2. 紫外線装置のフルスケールテストに生物線量計を用いることにより、最低条件における REF を計算することが出来る。Bacillus subtilis は、生物線量計に必要な要項を全て満たしている。
3. 紫外線装置の試験性能が微生物の必要条件を満たしているならば、alarm point 及び適格な使用範囲を決定できる。これらの値は、運転中の紫外線装置の性能をはかる客観的手段である。
4. 定期的に計測する微生物関連項目(E.coli, Enterococci)は水系関連微生物の代替としては、感度が高すぎるので、消毒後の水の安全確認は、水道事業体の実際の運転において、制御している評価されている技術パラメーターに基づいて行なうべきである。
5. 安全な水消毒における最小要求 REF を測定するには、健康に関わる微生物の紫外線耐性に関する正確なデータが必要である。文献若しくは筆者らの知見により、オーストリアでは、400J/m<sup>2</sup> の REF を遵守するように規定している。この紫外線量では、主要な健康に影響を及ぼす主要なバクテリア、ウイルス、原虫類を 4log 不活化するに充分である。
6. 中圧ランプシステムを採用する場合、生物線量計の波長毎の紫外線耐性、センサーの波長毎の紫外線耐性等を考慮に入れる必要がある。また、病原性微生物の波長毎の紫外線耐性に関する研究を行なう必要がある。

**Adenovirus type 2 の紫外線-塩素-クロラミンを用いた連続消毒**  
**Sequential Disinfection of adenovirus type 2 with UV-Chlorine-Chloramine**

Nicola A.Ballester , James P.Malley Jr.

概要：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、performed 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/cm<sup>2</sup> 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/cm<sup>2</sup> 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。

## 1. 背景

現在、アメリカでは、USEPA より、LT2ESWTR、S2D/DBPR が公布されている。LT2ESWTR は、公共の健康を保護する目的で作成され、特に *Cryptosporidium* 等の病原性微生物を対象にしている。一方、S2D/DBPR は、消毒副生成物の削減を主目的にしている。両者は、2005 年には、最終版が完成する予定である。

公共の健康を保護する目的の代替消毒剤として、クロラミンが注目を集めている。理由としては、トリハロメタンやハロ酢酸等の副生成物生成量が少なく、また、長時間残留性があることが挙げられる。

アメリカでは、表流水や地下水系の追加消毒剤として、紫外線消毒が注目されている。消毒副生成物を生成せず、味やにおいの問題が生じないという利点がある。

アメリカにおいて、耐性を有する微生物（例：*Cryptosporidium*）、味、におい、原水中の高濃度のアンモニア等の諸要因により、遊離塩素による消毒では、USEPA の定める微生物の不活化基準を満足するのが難しいのが現状である。紫外線消毒と低濃度の塩素/クロラミンの組み合わせにより、微生物の不活化基準を満足すると同時に、副生成物の生成量を最小にすることが可能である。

## 2. 実験方法

### 実験手順

原水に Adenovirus を添加し、低圧紫外線、遊離塩素、performed chloramine、sequential chloramine、

紫外線消毒後の sequential chloramine、equential chloramine 後の紫外線消毒の各処理に対して実験を行った。

### Adenovirus 2 の培養と計数

Adenovirus type 2, adenoid 6 株は、人間の肺細胞により培養した。肺細胞の培養液としては、8.6mg/L のフェノールレッド、8%FBS 溶液、0.15% 重炭酸ナトリウム溶液、200  $\mu$ g/L のストレプトマイシン、200 unit/L のペニシリンを含む溶液を用いた。単層に Adenovirus を接種し、37°C にて 1.5 時間吸着後、2%FBS 溶液、重炭酸ナトリウム、抗生物質を添加した。培地の紫外線吸光度が増加しないように、フェノールレットは添加していない。培地は、24-36 時間 37°C にて培養した。その後、培地を -80°C にて凍結し、freezing-thawing 法を 3 度実施した。溶解物は、遠心沈降し、表面に浮かぶ浮遊物は 0.2  $\mu$ m のろ紙でろ過した。Adenovirus は、50% tissue culture infection dose(TCID 50)法(Meng et al,1996)により計数した。

### ベンチスケールでの低圧紫外線照射実験

高出力低圧紫外線ランプを平行ビーム装置に組み込み、実験を行った。到達紫外線量は、校正した線量計の値、流入水の 254nm の吸光度等より算出した。最低初期濃度  $10^8$ /mL TCID50 になるように、adenovirus を添加した。Adenovirus を添加した水の UV254 吸光度は、0.031~0.038/cm であった。

### 化学消毒手法

実験に用いるガラス器具と水は全て、塩素要求量が 0 になるよう処置した。塩素原液(5mg/L)と塩化アンモニウム(5%)は別々に準備した。遊離塩素の実験では、adenovirus を添加した実験水に塩素を添加した。Preformed chloramine の原液は、塩素とアンモニウムの原液を 3 : 1 の割合で混合させ作成した。混合液は pH8 に調整後、30 から 50 分攪拌し、クロラミンを生成した。Sequential chloramine の実験では、アンモニアと adenovirus を含む実験水に塩素を添加して実施した。アンモニア濃度は Nessler 法を、塩素濃度は、DPD 法にて測定した。実験時の水温は、22~23°C であり、同条件での実験を 3 回実施した。

### 連続実験

第 1 の実験として、adenovirus を添加した実験水にクロラミン添加後、紫外線の照射を実施した(40,60,80mJ/cm<sup>2</sup>)。第 2 の実験として、アンモニアの添加/非添加の両条件にて、紫外線照射後(40mJ/cm<sup>2</sup>)に遊離塩素、若しくは、sequential chloramines 添加を実施した。第 3 の実験として、高濃度のアンモニアを含む自然水にて実験を実施した。Iowa 州の Cedar Rapids におけるアンモニアの平均濃度は、0.5mg/L であり、紫外線消毒(40mJ/cm<sup>2</sup>)後に塩素を添加し、Cedar Rapids の処理水と同等の残留塩素が得られるように実施した。実験期間中の Cedar Rapids の最終処理水は、全塩

素濃度は、2.2-3.5mg/L、遊離塩素濃度は、0.32-0.69 mg/L で、塩素要求量は、0.85mg/L である。実験時の水温は、22~23℃であり、同条件での実験を少なくとも3回実施した。

## 結果

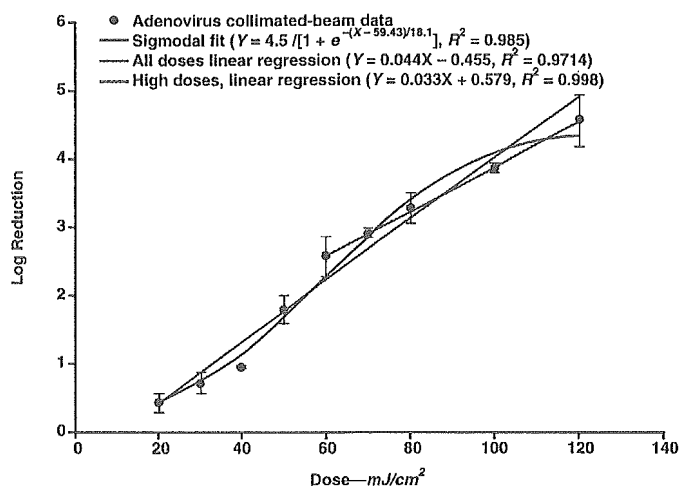
### Adenovirus 高出力低圧ランプの用量-応答曲線

高出力低圧ランプを用いた紫外線消毒の場合、照射線量と adenovirus の不活化率は直線の相関関係にあり、4log の不活化には 103mJ/cm<sup>2</sup> の紫外線量が必要であることが分かる(Figure.1)。

Figure.1 より、50mJ/cm<sup>2</sup> 以下の紫外線量では、肩が見受けられる。除去修復にもかかわらず、adenovirus の DNA 損傷は宿主細胞内に逆の形で現れる。筆者は、>50mJ/cm<sup>2</sup> の紫外線量では、adnovirus virion に損傷を与えるに十分な線量が照射されているので、高線量

条件では、直線の用量-応答曲線が成立すると仮定している。エス字型モデルの方が直線モデルより適合性が高く、その際には、4log の不活化に、97mJ/cm<sup>2</sup> の紫外線量が必要になる。60mJ/cm<sup>2</sup> 以上の紫外線量では、線形モデルの適合性が一番高い。

FIGURE 1 Different fits of adenovirus type 2 low-pressure, high-output collimated-beam tests



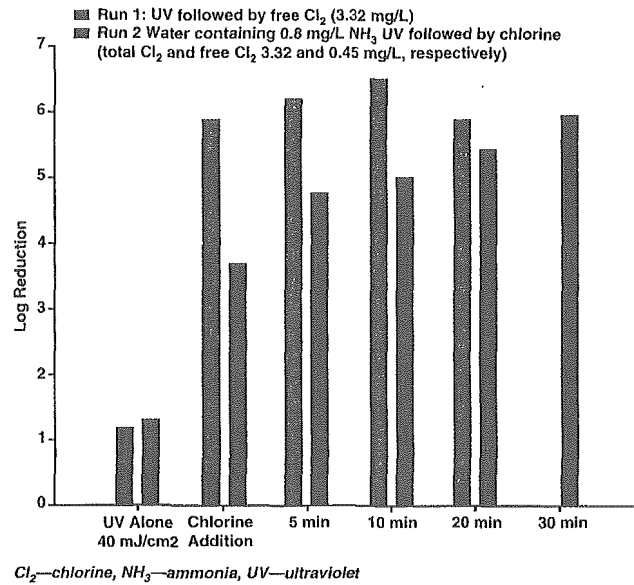
### adenovirus の化学消毒

実験室レベルの水に adenovirus を添加した場合、遊離塩素の平均 CT 値が 1.22mg-min/L(±0.242) で 3.72log の不活化が達成できた。Preformed chloramine の場合は、平均 CT 値が 264.5mg-min/L(±5.32)で 1.2log の不活化が可能であった。アンモニア存在下で塩素を追加した場合、平均 CT 値が 40.5mg-min/L(±5.21)で 1.07log の不活化が可能であった。

### 連続実験：UV-化学消毒

塩素要求量 0 の水及び実験室レベルの水にアンモニアを添加した実験水(0.8mg/L NH<sub>3</sub> as N)に紫外線照射後、塩素を添加することによる adenovirus の不活化実験を行った。40mJ/cm<sup>2</sup> の紫外線照射後、両実験水において 1.2log の不活化が確認された(Figure.2)。アンモニアを含まない実験水に対して、遊離塩素を添加した場合(残留塩素:0.29mg/L)で、>5log の不活化が可能であった(Figure.2)。0.8mg/L のアンモニアを含む実験水に対しては、塩素を添加した場合(残留塩素:3mg/L)にて、3.7log の不活化が可能であった(Figure.2)

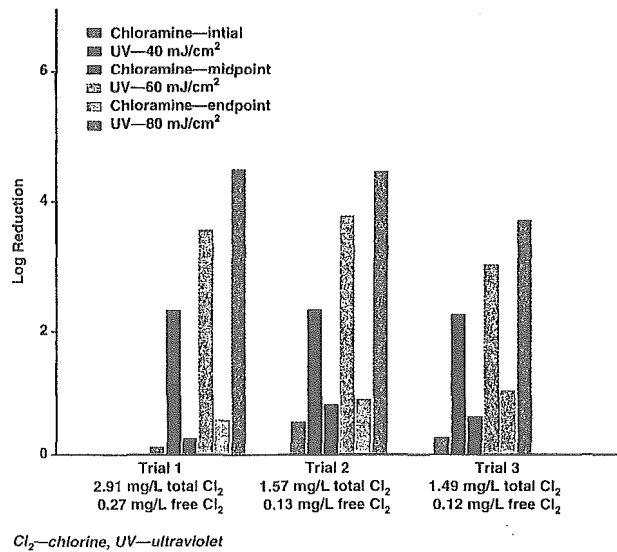
FIGURE 2 Sequential runs: UV-Cl<sub>2</sub>



連続実験：クロラミン

sequential chloramine の前処理後、紫外線照射実験を行った(Figure.3)。3段階の実験を行い、その際の残留結合塩素濃度は、2.64、1.44、1.37mg/Lである。各実験において、実験開始から終了までに要した時間は 30 分程度である。40mJ/cm<sup>2</sup> の紫外線量を照射する前の sequential chloramine 処理(CT 値の平均値 19.6mg-min/L)における不活化率は、<0.5log であった。Figure.3 に示すように、sequential chloramine 処理の前処理での処理性能に拠らず、40mJ/cm<sup>2</sup> の紫外線量照射により約 2log の不活化が可能であった(Figure.3)。また、60、

FIGURE 3 Adenovirus type 2 sequential runs: chloramines followed by UV doses of 40, 60, and 80 mJ/cm<sup>2</sup>



80mJ/cm<sup>2</sup> の紫外線量照射においては、それぞれ、3.4log、4.2log の不活化が可能であった(Figure.3)。

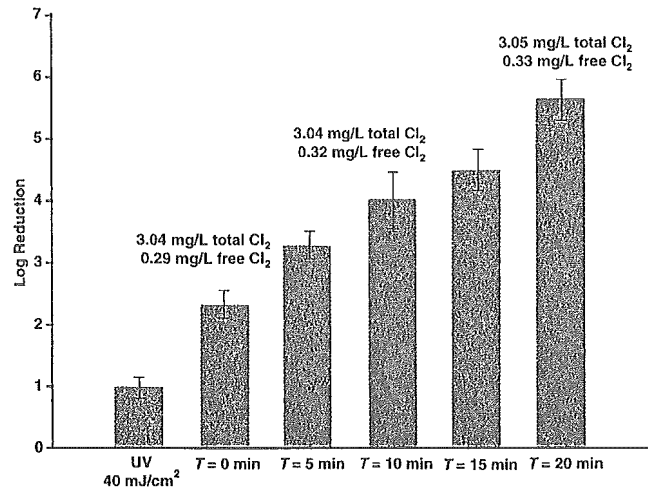
本実験結果より、UV-sequential chloramine 処理の方が、sequential chloramine - UV に比べ、高い不活化率が得られることが確認された。

自然水での連続実験

Cedar Rapids の原水は、周辺にて農業が盛んであるため、一年を通じて高濃度のアンモニアを含む。原水中には、0.5mg/L のアンモニアが含まれ、40mJ/cm<sup>2</sup> の紫外線を照射した後、実際の浄水

処理での残留全塩素濃度(3mg/L)と同程度になるよう、塩素を追加した。全条件において、40mJ/cm<sup>2</sup>の紫外線量において、平均 1.02log の不活化が可能であった。塩素を追加 (CT値: 27.2mg-min/L) することにより、4log まで不活化が可能であった(Figure.4)。これより、本手法は、実条件においても、費用対効果が大きい手法であり、adenovirus を 4log 不活化可能であった。

FIGURE 4 Sequential runs with Cedar Rapids, Iowa, raw water—0.77 mg/L NH<sub>3</sub>, UV dose of 40 mJ/cm<sup>2</sup>, followed by Cl<sub>2</sub>

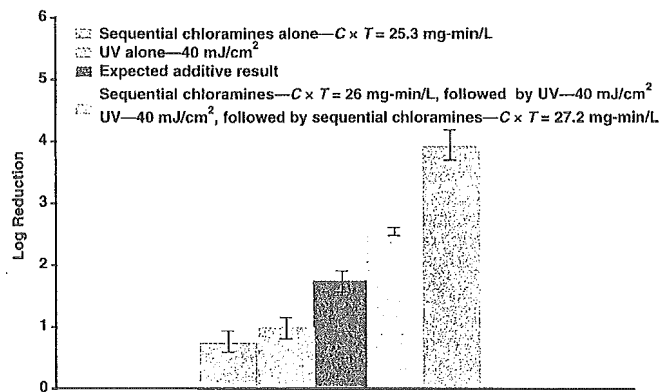


Cl<sub>2</sub>—chlorine, NH<sub>3</sub>—ammonia, T—time, UV—ultraviolet

### 結論

各消毒手法の比較を Figure.5 に示す。Figure.5 より、アンモニアを含む原水に対しては、UV-sequential chloramin 処理が最も adenovirus type 2 の不活化に効果的であることが分かる。

FIGURE 5 Comparison of disinfection methods



UV—ultraviolet

### 既存紫外線消毒施設への紫外線消毒ガイドライン案の適用

#### Application of proposed UVDGM Requirements to an existing UV disinfection installation

Paul D,Swaim,Stuart B.Jeffcoat, J.Alan Roberson, Steve Via,Guy Pihera, William D.Bellamy.

概要：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。Tier 2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。

#### 1. Clayton Country Water Authority社 Freeman Road 紫外線消毒施設

Clayton Country Water Authority(CCWA)社の南アトランタにおいて、3つの浄水施設を運営している(給水人口：250,000人)。Freeman Roadの浄水施設では、表流水を処理しており、病原性微生物対策として、不活化能力及びコスト面を鑑み、紫外線消毒を採用している。紫外線消毒後、遊離塩素を添加している。紫外線消毒施設は、紫外線透過率は91%/cm(254nm)の際に、ランプ寿命が尽きるまで、50mJ/cm<sup>2</sup>の紫外線を照射できるよう設計されている。本施設において、Lamp-fouling/aging係数は0.6に設定している。施設能力としては、UV装置一つにつき、12mgd(45ML/d)若しくは、6mgd(23ML/D)処理できるよう設計している。

詳細設計を行なうため、非経済的要因、経済的要因を考慮し、競争入札により、紫外線消毒装置を選定した。選定した紫外線消毒装置は、低圧高出力(LPHO)ランプ10本3列からなる装置3台からなる。

UVDGMが発表される前に、本施設は計画・設計されたが、EPAの基準を満足している。紫外線装置の導入に際して、GAEPD(Georgia Environmental Protection Division)に基づく装置の性能検証を行なった。具体的には、対象微生物としてMS-2を添加したオンサイトの実証実験を実施し、その際、リグニンスルホン酸により、紫外線透過率の調整を行なった。CCWA社の紫外線消毒装置の契約は、性能保証に重きを置いており、性能検証の際に、規定の性能が得られない場合、所定の是正措置をとり、違約金が発生することになる。

#### 性能検証

Freeman Road 施設における紫外線装置の性能検証を2003年2月に実施した。

本性能検証は、種々の流量、水質条件における対象微生物の不活化の確認を行なった。同時期に、大学の実験室において、MS-2の用量一応答曲線を算出するための、紫外線照射実験を行った。



## 紫外線消毒ガイドライン（案） Tier1 基準との比較

紫外線消毒ガイドライン（案）の section 4 に記載されているように、Tier 1 手法による安全率は不確定性及び実験的方法による補正に基づき、決定される。適切に安全率を計算するには、実験条件をマニュアルの 4-17~4-21 に記載されている内容を遵守する必要がある。

Tier1 による評価を円滑に行なうため、16 の Tier1 基準案を Table1 にまとめた。各項目毎に比較は下記に示すとおりである。

**TABLE 1 Tier 1 criteria from the proposed Ultraviolet Disinfection Guidance Manual: A completed checklist for the Clayton County Water Authority Freeman Road ultraviolet system**

Topic	Requirement	Criterion Met?
Ultraviolet (UV) intensity sensors	UV reactors with MP* lamps should be equipped with one sensor per lamp. UV reactors with LP† or LPHO‡ lamps should be equipped with at least one sensor per bank of lamps.	Yes
	UV intensity sensors should view a point along the length of the lamp that is between the electrode (lamp end) and within 25% of the arc length away from the electrode.	No
	UV intensity sensors should have a spectral response that peaks between 250 and 280 nm. When the UV sensor is mounted on the UV reactor and views the lamps through water, its measurement of UV light greater than 300 nm should be less than 10% of the sensor's total measurement.	Yes
	The UV intensity sensors used during validation and the duty and reference sensors used during operation of the UV reactor at the WTP§ should provide NIST-traceable** measurements with an uncertainty of ±15% or less at an 80% confidence level.	No
	During operation of the UV reactor at the WTP, measurements made by the duty UV intensity sensor should be checked against a reference UV intensity sensor. If the duty sensor reads higher than the reference sensor, or substantially lower, it should be recalibrated.	Yes
	If the dose-monitoring strategy uses an online UVT†† monitor, the UV absorbance at 254 nm calculated from the measured UVT should have an uncertainty of ±10% or less at an 80% confidence level.	Not applicable
UV lamp output	The standard deviation of the UV output of LP or LPHO lamps should be 15% or less of the mean output. The standard deviation should be determined using either life-test or field-test data on aged lamps.	No
Flow measurements	The flow measurements made during validation and during operation of the UV reactor at the WTP should have an uncertainty of ±5% or less at an 80% confidence level.	Yes‡‡
Collimated-beam apparatus	The calculated dose delivered by the collimated-beam apparatus should have a measurement uncertainty of ±15% or less at an 80% confidence level.	Yes§§
Challenge microorganism dose-response	Over a range of doses within 1 log unit of the log inactivation demonstrated during validation, the UV sensitivity of the challenge microorganism should be ≤25 mJ/cm <sup>2</sup> per log inactivation. For example, if the challenge microorganism log inactivation measured by the UV reactor ranges between 1.5 and 3.5 log, the dose-response of the challenge microorganism should be ≤25 mJ/cm <sup>2</sup> per log inactivation between 0.5 and 4.5 log inactivation.	Yes
	If the dose-response of the challenge microorganism has a shoulder, that shoulder should not occur over a dose range greater than 50% of the reduction equivalent dose demonstrated during validation.	Yes
	If the dose-response demonstrates tailing, the tailing should not occur until 1 log reduction greater than the log reduction demonstrated during validation.	Yes
	A plot of dose versus log inactivation for the collimated-beam test should have an 80% confidence interval of 10% or less at the log inactivation demonstrated by the UV reactor.	No***
MP lamps	During validation, the UVT of the water at 254 nm should be greater than the values specified in Figure 4.6 for a given sensor-to-lamp water layer and UV-absorbing chemical.	Not applicable
Biosimetry sampling	Five influent and effluent samples should be collected for each test condition and evaluated as described in section C.4.9.5.	Yes†††
	The standard deviation of the challenge microorganism measured with the influent and effluent samples should be ≤0.20 log units.	Yes

\*Medium-pressure

†Low-pressure

‡Low-pressure, high-output

§Water treatment plant

\*\*National Institute of Standards and Technology

††Ultraviolet transmittance

‡‡Although the meter manufacturer did not provide uncertainty at the 80% confidence level, it is assumed that the stated accuracy (<1%) would result in compliance with this criterion.

§§The uncertainty of the collimated-beam dose calculation was quantified. However, it is not known if this calculated uncertainty corresponds to an 80% confidence level.

\*\*\*The explanation and examples in the UVDGM are not sufficient to allow conclusive determination of the value necessary for this criterion. Using one method, the researchers determined the value exceeded the Tier 1 criterion.

†††Five influent and effluent samples were collected and analyzed. However, Section C.4.9.5 requires measurement of concentration within 24 h, a condition that was not met.

Source: USEPA, 2003

### 紫外線強度計の数量

Freeman Road 浄水場では、1列につき、1コンの紫外線強度計を設置しており、基準を満足している。

### 紫外線強度計の設置場所

ランプ内の電極の長さは1,430mmであり、紫外線強度計は、通常、最も近い電極から、500mmの位置に設置した。故に、紫外線強度計は、電極より、電極長さの約35%離れた位置に設置していることになり、UVDGM案 Tier 1の基準(25%)を満足していない。

紫外線強度計製造メーカーによると電極からの距離が500mmの場合でも、300mmの場合と差異は生じないとのことである。

### 強度計のスペクトル応答

Freeman Road 施設で用いている紫外線強度計は、300nm以上の波長が及ぼす影響は1%未満であり、UVDGM案の基準を満足している。

### 紫外線強度計の校正元

紫外線強度の校正には、ドイツの基準器に準拠している。紫外線強度計メーカーによると、NIST規格に準拠するものとのことである。そのため、厳密に言えば、UVDGM(案)を満たしているとはいえない。USEPAは、UVDGM(案)において、他の国際規格を用いることを推奨している。

紫外線強度計メーカーに拠ると、基準となるセンサーとの誤差は3%であるが、許容範囲や信頼水準が明確にされていないので、UVDGM(案)の基準に対してのコメントは出来ない。

Australian National Standard(ONORM M 5873-1)に基づき、14種の紫外線強度計を試験したが、この際も、紫外線強度計の不確定要素については触れておらず、温度影響や感度、測定範囲、分解能等についてコメントを行なっている。ONORMの基準では、UVDGM(案)で触れている直線性等についても記載されていない。

UVDGM(案)において、紫外線強度計の不確定要素を計測するための方法論を明示することが望まれる。

### 紫外線強度計の校正

Freeman Road 施設では、紫外線強度計の校正は、UVDGM(案)に基づき、維持管理の一環として、実施していく予定である。

### UVT モニターの正確性

紫外線消毒装置は、紫外線強度/紫外線透過率 setpoint mode、若しくは、紫外線量の control mode(紫外線量調節が非常にうまく性能保証されれば)にて運転する予定である。今回、評価を行

った時点では、紫外線透過率モニターが UVDGM Tier 基準で求める 80%の信頼水準での不確定要素に関する知見はない。

### 紫外線ランプ出力

UVDGM(案)にて求められている LPHO システムのランプの変動に関する情報は現時点では、提出されていない。しかし、National Water Research Institute(NWRI)では、ランプのテストを行い、仮の集計結果として、ランプ変動は 10%以下であるとしている。旧世代のランプでは、順調な運転がなされていた場合、5,760 時間経過時点で、3.4%の減少にとどまっている。

Freeman Road WTP における各列の紫外線強度は、 $24.2 \pm 1.1 \text{mWs/cm}^2$ 、 $30.1 \pm 0.3 \text{mWs/cm}^2$ 、 $26.5 \pm 1.1 \text{mWs/cm}^2$ 、である。この際の標準偏差は、1.0~4.5%であり、基準の 15%を下回っている。

### 流量計

Freeman Road の実験施設では、各紫外線装置の前段に流量計を設定した。本流量計の設置時の精度は 1%であり、常に 3%以下を保持している。

### 紫外線照射装置

紫外線照射装置の性能検証は、実験室にて実施した。UVDGM(案)附表 E に記載されている実験条件を遵守した。例としては、水深 8.1cm、紫外線照射量が  $20 \text{mJ/cm}^2$  になるように、162 秒間紫外線を照射、ペトリ皿の計数は 0.998 とした。

実験において、紫外線照射量の計算の不確定性を定量するため、sum-of-square method を用いた。測定時の紫外線量の不確定性は、式 1 を元に算出した。その際の不確定性は 8.78~8.8%である。附表 E における不確定性の決定に際して、80%の信頼水準を含めているかは不明であるが、本手法は、E-6 ページと同様の手法で実施したので、UVDGM(案)の基準を満足するものと思われる。

### 用量-応答曲線感度

Table2 に集約される 4 つの実験において、対象微生物 MS-2 は 2.02~2.59log の不活化が行なわれた。

TABLE 2 Validation test results from Clayton County Water Authority Freeman Road Water Production Plant ultraviolet (UV) system, February 2003

Run	Flow mgd	Power Level %	UVT*	Influent MS2 pfu/ml	Log Influent MS2 pfu/ml	Standard Deviation Influent MS2	Effluent MS2 pfu/ml	Log Effluent MS2 pfu/ml	Standard Deviation Effluent MS2	Log Reduction	MS2 RED† mj/cm <sup>2</sup>
1F	5.4	50	91.2	222,295	5.35	0.05	569	2.76	0.197	2.59	57.3
2F	6.0	50	90.8	273,521	5.44	0.08	915	2.96	0.17	2.48	54.1
3F	6.5	50	90.7	271,766	5.43	0.11	2,008	3.30	0.10	2.13	44.6
4F	7.3	50	91.9	305,343	5.48	0.106	2,895	3.46	0.060	2.02	41.7
5F	7.4		91.9	344,866	5.54	0.06	374,088	5.57	0.10	-0.035	

\*Ultraviolet transmittance  
†Reduction equivalent dose

UVDGM(案)によると、対象微生物 MS-2 の紫外線感度は、MS2 1log の不活化に当り、25mJ/cm<sup>2</sup> 以下とされている。UVDGM(案)の 4-13 ページにて定められたフォーマットに従い、用量-応答曲線を Figure.1 にプロットした。この際の直線回帰式は、下記のとおりであり、R<sup>2</sup>=0.956 であった。

$$\text{不活化率(log)}=0.0362 \times \text{紫外線量}+0.594 \quad (1)$$

Figure.1 に示すように、多項式回帰の場合、下記のとおりであり、R<sup>2</sup>=0.959 であった。

$$\text{不活化率(log)}= -0.0002 \times (\text{紫外線量})^2+0.0587 \times (\text{紫外線量}) \quad (2)$$

(2)式によると 1.02、3.59log の不活化には、それぞれ、18.6mJ/cm<sup>2</sup>、86.9mJ/cm<sup>2</sup> の紫外線量が必要であり UVDGM(案)の各不活化に必要なとされる最大紫外線照射量が 25.5mJ/cm<sup>2</sup>、86.9mJ/cm<sup>2</sup> の基準を満たしている。

UVDGM(案)の 4-10 ページに記載されているように、最大及び最小の紫外線透過率の水質時の生物線量計による分析が必要である。Freeman Road での実験においては、最低紫外線透過率の際の実験は実施しているが、二つの水質条件時の複合データは収集していない。

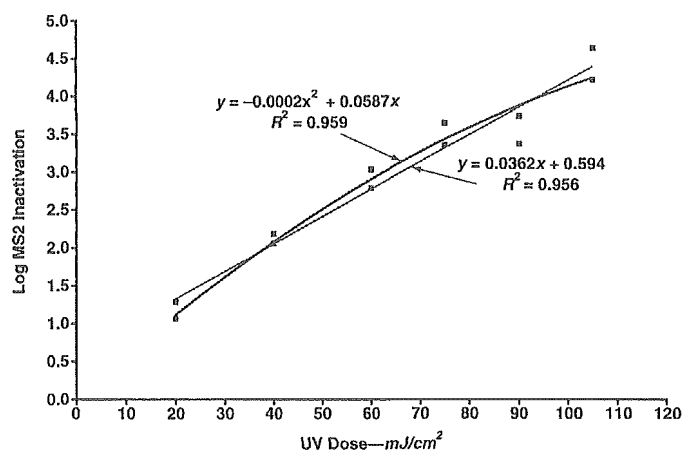
UVDGM(案)の C-28 ページによると、同一線量での実験は、少なくとも 3 回以上実施すべきとされている。Freeman Road の性能検証の際には、各線量に対して 2 回実験を行い、それぞれの実験に対し、2 回の分析を行なった。UVDGM(案)では、replicate plating に関する記載はない。

UVDGM(案)の 4-10 ページによると、紫外線照射量は、対象微生物の不活化率が約 0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0log になるよう設定すべきとされている。Figure.1 では、不活化率が 0.5log となる紫外線量では実験を実施しておらず、実験した紫外線量での不活化率は、約 1.0、2.0、3.0、3.5、4.5log であった。5log の不活化を得るには、MS2 の流入水中濃度(235,000pfu/mL)を上げる必要がある。

UVDGM(案)の 4-13 ページによると、紫外線量と不活化率の線量-応答曲線の適合性を評価するための 3 つの基準が記載されている。この内、2 つは、Tier 1 基準の 4.6 節において、繰り返しの記載はされていないので、Tier 1 手法を遵守する必要があるかどうかは明確にされていない。

第 1 の基準は、95%信頼水準での regression equation coefficient が重要とされる。UVDGM(案)の附表 C において、p-statistics を用い係数を評価した例が記載されている。例えば、直線回帰の場合は、y 切片、傾きの p-statistic 値が 0.0067、4.2×10<sup>-8</sup> としている。

FIGURE 1 Freeman Road water production plant collimated-beam dose-response data with alternative curve



第2の基準は、80%信頼水準での用量-応答曲線のデータの信頼区間である。

第3の基準は、プロットした近似曲線とデータの差異である。UVDGM(案)の C-29 ページ及び Figure C-2 に例が記載されている。本実証データにおいて、直線回帰の場合、近似直線の上下に同数のプロットがあり、多項式回帰の場合、近似曲線の上部に5つのデータがあり、下部に7つのデータがあるので、両者とも、UVDGM(案)の基準を満足している。

### 用量-応答曲線の肩

Figure.1 に示されるように、低紫外線量の MS-2 不活化において、肩は生じていない。UVDGM(案)4章における、肩の有無の判定手法の説明は不十分である。

### 用量-応答曲線のテーリング

Figure.1 に示されるように、本データにおいてテーリングは確認されない。肩の項目と共に、UVDGM(案)において、テーリングの有無の判定手法の説明を追記することが望まれる。

Figure.1 において、105mJ/cm<sup>2</sup>の照射実験を行っていない場合、最大照射線量は 90mJ/cm<sup>2</sup> となり、この場合は不活化率 3.5log 付近で、テーリングが生じていることになる。

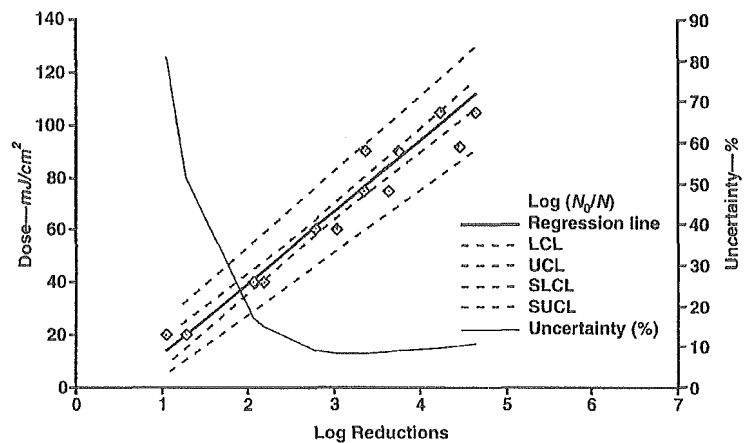
### 用量-応答曲線の 80%信頼区間

UCDGM(案)で提供されている情報では、80%上部・下部信頼区間を決定する適切な手法を決定することは出来ない。Tier 1 基準の 80%信頼区間での 10%以下の不活化率を適用することは難しい。Spreadsheet を用いた信頼区間の計算手法は複雑な統計的手法を理解する必要があり、技術者の多くは実行することが難しい。UVDGM(案)において、簡便な統計分析を開発し、導入する必要があると思われる。

Freeman Road 浄水場での実験データの 80%上部・下部信頼区

間の決定を spreadsheet を用いた計算手法及び、直接計算により実施した結果を Figure.2 に示す。

FIGURE 2 Freeman Road water production plant collimated-beam dose-response data with 80% confidence intervals



$N_0/N$ —Influent concentration divided by final concentration  
 LCL—lower confidence limit from statistical calculation  
 UCL—upper confidence limit from statistical calculation  
 SLCL—lower confidence limit calculated by the spreadsheet program  
 SUCL—upper confidence limit calculated by the spreadsheet program

2.06log 不活化での 80%信頼区間によると、紫外線照射量の上限界値は 54.4mJ/cm<sup>2</sup> であり、下

部限界は、 $28.8\text{mJ}/\text{cm}^2$ である。対して、直接計算での上部、下部限界値は、それぞれ、 $44.9$ 、 $37.9\text{mJ}/\text{cm}^2$ である。最終 UVDGM において信頼区間分析が必要とされるのであれば、段階的な統計式の使用手順を示すことが望まれる。一方、最終 UVDGM において spreadsheet 手法が採用されるのであれば、段階的なプログラムの使用手順を示すことが望まれる。

### 中圧ランプ

本項目は、LPHO ランプを使用している CCWA 社の施設には該当しない。

### 生物線量計のサンプリング、サンプリング数

Freeman Road 浄水場でのオンサイトの性能検証において、流入水、流出水のデータの収集及び解析は、計 5 回実施した。これは、UVDGM(案)の要求を満たしている。また、C-27 ページに「対象微生物は、サンプル回収後 24 時間以内に分析する必要がある」との記載があるが、本実験では、午後にサンプリングを行ない、翌日、実験室まで送付しており、24 時間以内に濃度分析を実施してない。実験室が敷地外にある場合、24 時間以内の分析は難しい。UVDGM(案)の基準において、オフサイト実験等において、試験方法に柔軟性を持たせることが望ましい。

### 生物線量計のサンプリング、標準偏差

Freeman Road Facility でのオンサイト性能検証の一環として、4 種の条件にて、実験を行った。4 種の実験において、流入水、流出水の標準偏差は、 $0.05$ - $0.11\log$ 、 $0.060$ - $0.197\log$  である。この値は、UVDGM(案)に記載されている、全ての条件における標準偏差が  $0.2\log$  以下であるように、との記載を満足している。

### Tier 1 との比較総論

Table 1 に示すように UVDGM(案) Tier 1 基準は 16 項目から成る。そのうち、14 項目に対して、CCWA 社の Freeman Road 紫外線消毒施設は該当しており、10 項目において基準を満足している。流量計や紫外線強度計、不確定要素、線量計の不確定要素等は十分な情報が無いため、基準との比較が出来ない。

Tier1 の基準のうち、4 つの基準を満足できていない。そのうちの一つは、線量-応答曲線の信頼区間であり、UVDGM(案)内に、計算及び比較を実施するために必要な情報が充分記載されていない。残り 3 つに関しては、製造会社の方で更なる知見を収集すれば、最終 UVDGM を満足する設備を製造することにより、基準を満たすことができると思われる。

以前の評価において、CCWA 社の Freeman Road 施設と性能検証は、UVDGM(案) Tier 1 の基準に厳密には、準拠していない。そのため、マニュアルの枠組みの中で、Tier2 分析手法が必要とされている。次節にて本分析手法に関して、記載する。

## UVDGM Tier2 分析

### RED(Reduction equivalent dose) bias

USEPA の計算手法を用いて RED bias を決定するために、Freeman Road 施設での実験結果データの選定を行った。Table2 に Freeman Road 施設の性能試験データを示す。本分析においては、単一の test point を選定した。

MS2 RED が、対象微生物の要求に最も近いため、Run4F の実験を選定した。Freeman Road 施設での Cryptosporidium の不活化目標は 2.5log であり、UVDGM(案)によると対応するベンチスケールでの紫外線要求量は 8.5mJ/cm<sup>2</sup> である。Run 4F では、2.02log の MS2 が不活化されているため、対応する RED は 41.7mJ/cm<sup>2</sup> となる。なお、Run1 F での RED bias は 2.21 であり、Run4F に比べ 2.3% 上昇している。

### Polychromatic bias

Polychromatic bias は LPHO ランプを用いている CCWA 社の施設では、関係ない。

### 拡大した Uncertainty safety 率

Uncertainty safety 率の拡大は、全安全率と対象の RED と共に、USEPA の安全率計算 worksheet の一環として、決定される。p.86 において、安全率の計算 worksheet が掲載されている。Run4F で得られた不活化データの中には、サンプル数や、標準偏差、対象微生物の不活化率、RED が含まれている。

各項目より、全体の安全率を 2.91 と算出した。そのため、2.5log の Cryptosporidium の不活化に際して、対象の RED は、24.76mJ/cm<sup>2</sup> であった(ベンチスケールの実験での紫外線要求量が 8.5mJ/cm<sup>2</sup> であり、安全率が 2.91 であるため)。この値は、UVDGM(案) Tier1 において、2.5log の Cryptosporidium の RED 値 28mJ/cm<sup>2</sup> より、小さな値となっている。Tier2 手法を用いることにより、Tier1 手法に比べ、紫外線要求量が約 12% 減少していることになる。

## 結論

本試みの目的は、USEPA の UVDGM(案)を実際の紫外線システムに適用することにより、その実効性に関して評価した。

UVDGM(案)の tier1 基準は、Table 1 に示すような 16 項目からなる。そのうち、14 項目に対して、CCWA 社の Freeman Road 紫外線消毒施設は該当しており、10 項目において基準を満足している。流量計や紫外線強度計、不確定要素、線量計の不確定要素等は十分な情報が無いため、基準との比較が出来ない。Tier1 の基準のうち、4 つの基準を満足できていない。そのうちの一つは、線量-応答曲線の信頼区間であり、UVDGM(案)内に、計算及び比較を実施するために必要な情報が充分記載されていない。Tier1 の基準を全ては、満たしていないため、Tier2 の分析が必要となる。Tier2 分析によると、施設の紫外線要求量は Tier1 に比べ 10~15% 低い値となる。

本件に関する成果として、CCWA 社の既存の設備が UVDGM(案)を満足することが実証された。

本分析に基づき、次の４点に関して、USEPA に提言を行なった。（１）流量計の要求事項の修正若しくは削除（２）UVDGM の利用者への、不確定要素の定量化に関する適切な方法論に関する情報提供（３）サンプリング及び実験手法に関して、必要な項目のみに限定する。（４）詳細な統計分析を容易に実施するため、明確な例示及び段階的統計的手法若しくはサポートツールの提供を行なう。

本提言に関して、USEPA 内にて検討してもらうことにより、最終 UVDGM が簡便で、実用に即したものになると思われる。



## 参 考 资 料

## 参考資料

本研究に御尽力・御協力を頂いた関係者名簿

氏名	所属
堤 行彦	株式会社クボタ 上水エンジニアリング 技術部 部長
杉本 隆仁	株式会社クボタ 上水エンジニアリング 部 大阪技術課 担当課長
巨勢 朗	日本光研工業株式会社 技術顧問
木村 繁夫	日本上下水道設計株式会社 水道事業本部 事業本部次長