

# 紫外線による下水二次処理水の滅菌

## Ultraviolet Sterilization of Secondary Effluent



(環)製品開発室  
近 藤 展 生  
Nobuo Kondo  
加 治 正 廣  
Masahiro Kaji

Ultraviolet sterilization of secondary effluent from sewage treatment can eliminate the problems which conventional chlorine sterilization cannot solve such as adverse effect of residual chlorine on the aquatic flora and fauna, and formation of organic chlorine compounds in contact with the organic matter remaining in the treated water. In addition, ultraviolet sterilization does not entail any danger of overdosing since it does not add any chemicals. Its advantage includes short treating time, simple operation, and easy maintenance. This paper reports on the ultraviolet sterilization test for the secondary effluent.

### まえがき

下水二次処理水の滅菌には一般に塩素処理が用いられている。塩素処理は安価かつ薬注量の変更も容易で、さらに使用実績も長期にわたっており、今後とも重要な滅菌方法である<sup>1)</sup>。しかし、残留塩素が放流先の水生動植物に悪影響を及ぼすことや処理水中の有機物と反応し、有機塩素化合物を生成する等の問題がある。そのため、近年塩素処理以外の滅菌方法が検討され、一部では実用化されてきている。塩素処理以外の滅菌方法としては、オゾン処理法、膜分離法、紫外線照射法、二酸化塩素を使用する方法等があるが、これらのうち紫外線照射法は、最近では技術開発が急速に進んでおり、特に注目されるようになってきている。紫外線照射による滅菌では、塩素処理のように残留性がなく放流先の生態系に悪影響がない、過剰注入の恐れもなくトリハロメタン等の有機塩素化合物の生成がない、処理時間が短い、操作が簡単、維持管理が容易である等の多くの利点がある。

一方、下水二次処理水への適用に関しては歴史が浅く、紫外線ランプの劣化、石英ガラス保護管の汚染、紫外線照

射量と滅菌率の関係、光回復の度合い等十分に解明されているとはいえない点も多い。そこで、筆者らはこれらについて実験的な検討を行った。その結果、紫外線滅菌は短時間で高い滅菌率が得られる等、下水二次処理水に非常に効果的であることが確認出来たので、次にその概要を紹介する。

### 1. 紫外線による滅菌の原理

紫外線は光の一種で、その波長は100~400 nm で人の目には知覚できない。また、紫外線はその作用により、UV-A (波長315~400 nm, 色素沈着, 光化学作用), UV-B (波長280~315 nm, ビタミンの生成), UV-C (波長100~280 nm, 滅菌作用) に分けられる<sup>2)</sup>。

一方、紫外線は微生物の細胞内で特にDNA (核酸) に吸収され、その吸収波長は240~280 nm と滅菌効果を示す波長 (UV-C) の範囲内にあり、吸収された紫外線は生命維持と遺伝子の複製に必要なDNAの結合を破壊することが明らかになっている<sup>3)</sup>。これが紫外線を微生物の滅菌に利用出来る理由である。

紫外線滅菌の線源としては高圧、中圧、低圧ランプの3種類があるが<sup>4)</sup>、下水二次処理水の滅菌にはこれらのうち

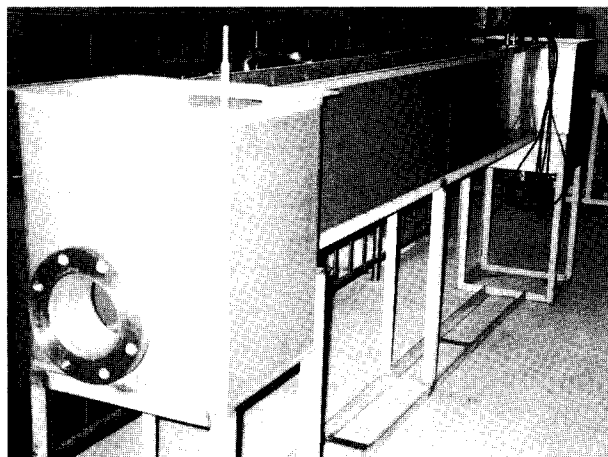


写真 1 実験装置  
Photo. 1 Test unit.

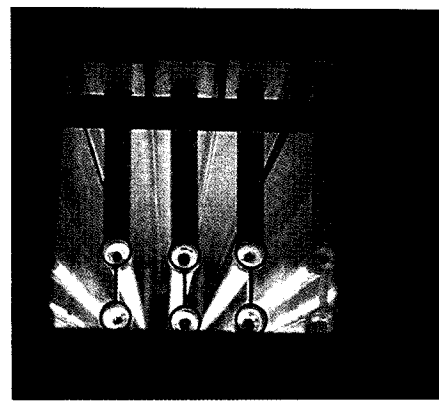
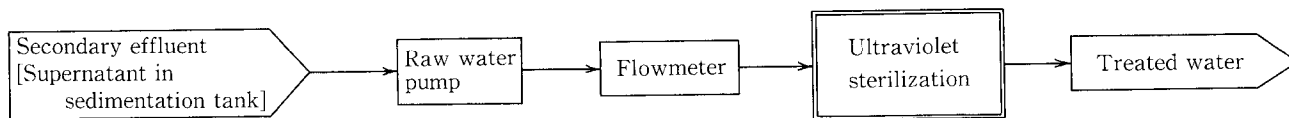
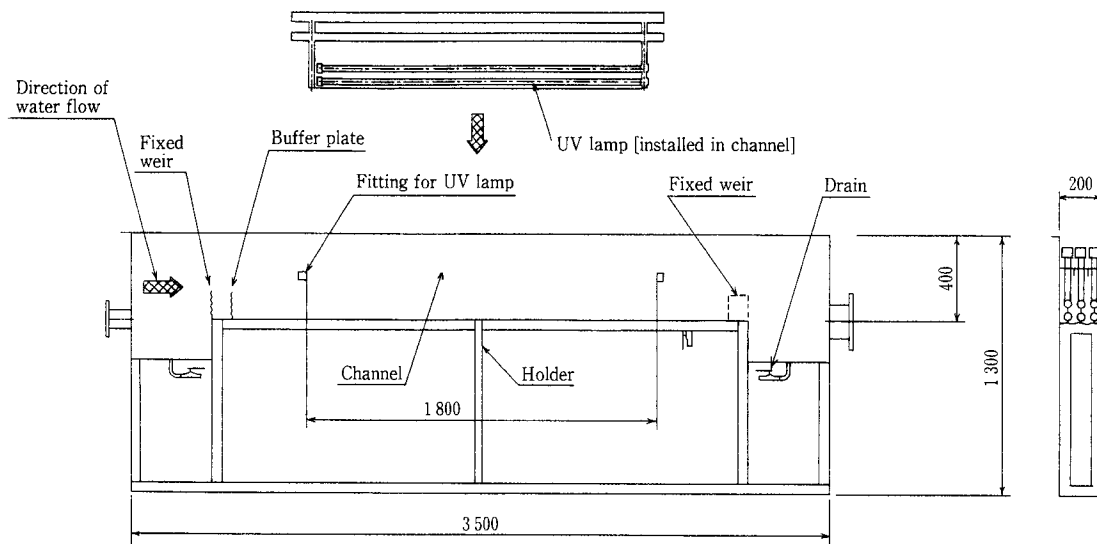


写真 2 オープンチャンネル水路内 (点灯時)  
Photo. 2 Open channel (irradiated).



第1図 実験装置のフローシート  
Fig. 1 Flow sheet of test unit.



第2図 実験装置の概要 (オープンチャンネル)  
Fig. 2 Outline of test unit (open channel type).

第1表 実験装置の主要仕様  
Table 1 Main specifications of the test unit

Item	Main specification
Type	Open channel (submerged rack type)
Ultraviolet lamp	65 W×6 lamps
Electrical consumption	675 W
Installation method	Parallel in direction of water flow (2 lamps×3 racks)
Dimension of open channel	Length 3 500 mm×width 200 mm×depth 400 mm

低圧ランプが最も広く利用されている。このランプは滅菌に非常に効果的な254 nmの波長を効率的に発生するという特長を持っている。

なお、低圧水銀ランプの基本構造は一般の蛍光灯と同様であるが、ランプの内面に紫外線光を可視光に変換する蛍光物質が塗布されていない点、管の材質に紫外線を効率よく透過する石英ガラスを使用している点が異なっている。

## 2. 実験装置及び方法

### 2.1 実験装置

第1図及び第2図に今回用いた実験装置のフローシート

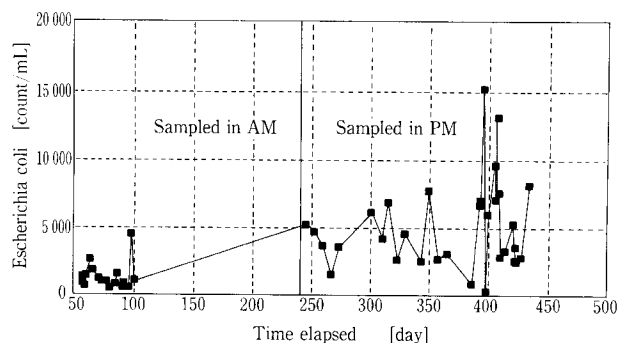
とオープンチャンネル (開水路) の概要を示す。また、装置写真を写真1に、点灯中の水銀ランプの状態を写真2に示す。

実験装置は大きく分けて原水供給ポンプ、紫外線照射部、流量計及び制御盤からなっており、紫外線照射部は

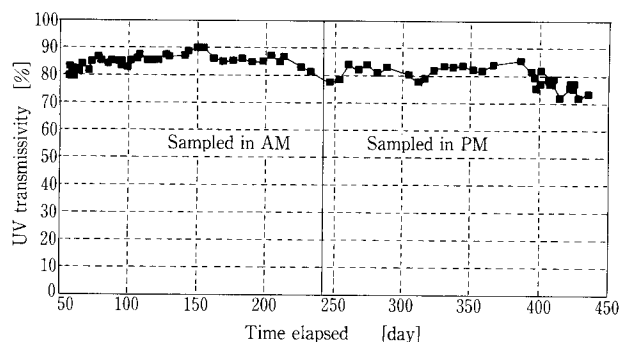
- ①低圧水銀ランプ
  - ②石英ガラス保護管 (以下単に保護管という)
  - ③保護管固定枠
  - ④ステンレス製オープンチャンネル (開水路)
- で構成されている。①、②の透明ガラス部材には石英ガラ

第 2 表 下水二次処理水の水質  
Table 2 Quality of secondary effluent.

Sampling time	16:00~17:00 (May 8, 1995~February 17, 1996)		
	Min. ~Max.	Average	
Escherichia coli	count/mL	250 ~ 15 000	5 000
Heterotrophic plate count	count/mL	6 500 ~ 190 000	98 000
TOC	mg/L	<10 ~ 20.2	—
COD	mg/L	11.3 ~ 19.8	15.7
Turbidity	degree	4.1 ~ 12.1	8.7
Ca hardness	mg/L, CaCO <sub>3</sub>	49.6 ~ 66.8	54.0
Transmissivity of UV	%	72.4 ~ 85.9	80.8
Water temprature	°C	15.0 ~ 30.3	20.9



第 3 図 大腸菌群数の経時変化  
Fig. 3 Change of escherichia coli with time elapsed.



第 4 図 紫外線透過率の経時変化  
Fig. 4 Change of UV transmissivity with time elapsed.

スが用いられており、④は SUS304 製で紫外線が反射されやすいように内面が研磨されている。

今回の実験で使用した紫外線ランプはランプ電力 65 W、紫外線出力 27 W、発光部長 1 500 mm、直径 15 mm の低圧水銀ランプであり、これを 6 本 (2 本/ラック × 3 ラック) 使用した。実験装置の主要仕様を第 1 表に示す。

## 2. 2 実験方法及び分析方法

### 1) 実験方法

本実験では、二次処理水 (最終沈殿池上澄水、以下原水という) を水中ポンプにより、ステンレス製開水路に導入し、そこで紫外線を照射、滅菌を行った。処理量は 25~31 m<sup>3</sup>/hr とした。この時の開水路内の滞留時間、すなわち紫外線照射時間は 5.5~4.5 秒である。

一方、ランプの紫外線強度は実験で使用した 3 ラックのうち、特定のラックを 1 本定め、開水路内の水を抜いた状態で測定した。ここで、測定器としては TOPCON UVR-1 を用い、測定器とラックの間隔は 160 mm とした。また、本実験では浸漬ラック数を 3, 2, 1 本と変化させ、ランプ間隔を 65 mm, 98 mm, 195 mm にし、開水路内の全紫外線照射量を変化させるとともに、ランプ間隔の影響を調査した。光回復実験では、処理量 25 m<sup>3</sup>/hr 及び 31 m<sup>3</sup>/hr (紫外線照射時間 5.5 秒及び 4.5 秒) で滅菌処理した

水を三角フラスコに定量とり、可視光として日光及び蛍光灯を照射し、照射時間を 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 hr と変化させて実施した。

### 2) 分析方法

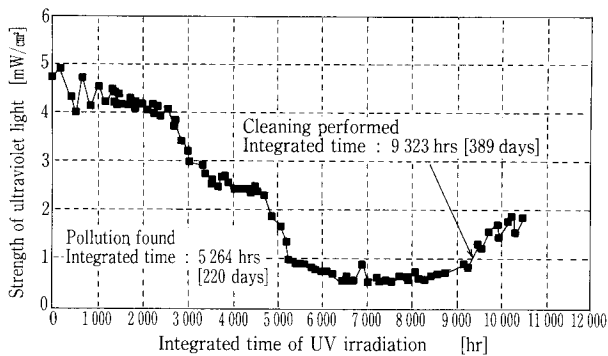
原水、処理水の分析は下水道試験方法に準拠して行ったが、大腸菌群数はデスオコシコール酸塩培地による平板法で、一般細菌は標準寒天培地を用いた方法で行った。

## 3. 実験結果及び考察

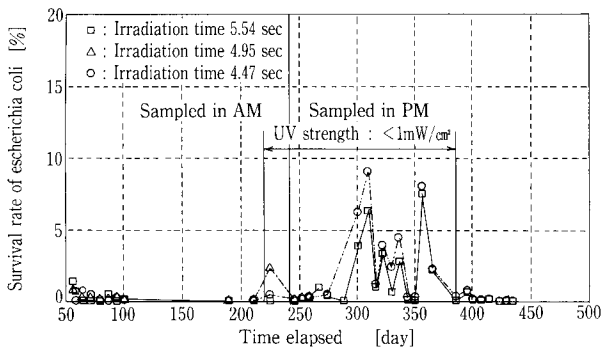
### 3. 1 原水の水質

第 3 図に原水中の大腸菌群数の経時変化を示す。図にも示すように大腸菌群数は 10<sup>2</sup>~10<sup>4</sup> 個/mL オーダーの間で変化しているが、大半は 10<sup>3</sup> 個/mL オーダー、即ち 10 000 個/mL 以下になっている。

紫外線滅菌では原水中を紫外線が十分に透過することが重要で、その指標として紫外線透過率がある。第 4 図には紫外線透過率の経時変化を示しているが、紫外線透過率は 70~90% の範囲内にあり、大半は 80% 以上と高い値を示している。また COD、濁度ともそれぞれ 10~21 mg/L、2~12 度の範囲内と比較的低い値であった。第 2 表に水質の一例を示す。これらより水質は良好に保たれており、本原水は紫外線滅菌に適していると考えられる。一方、第 3、4 図より明らかなように午前中の水質より午後の水質の方



第5図 紫外線強度の経時変化  
Fig. 5 Change of ultraviolet strength with time elapsed.



第6図 大腸菌群生存率の経時変化  
Fig. 6 Change of survival rate of escherichia coli with time elapsed.

が悪化する傾向があり、紫外線滅菌を評価する場合は、午後の水質を基準にする方がよいといえる。

### 3.2 紫外線強度

第5図に紫外線強度の経時変化を示す。

紫外線強度は当初の4.5 mW/cm<sup>2</sup>程度から経過日数の増加とともに低下し、経過日数294日(ランプ積算時間7046 hr)では0.5 mW/cm<sup>2</sup>と低い値となっている。この紫外線強度の低下原因としてはランプ自身の経時的な劣化、水温の低下等が考えられる。しかし、経過日数220日(ランプ積算時間5264 hr)に保護管に無機イオンによると思われる汚染が、目視上確認されたことから無機イオンによるスケーリングが主因ではないかと考えられる。なお、本実験では長期的な保護管の汚染状態を確認することを目的の一つとしていたため保護管の洗浄は経過日数389日(ランプ積算時間9323 hr)まで全く行わなかった。このため紫外線強度が大きく低下したと考えられる。さらに、紫外線強度の測定距離を160 mmとランプ間隔に比べ長くとしたのも一因と推定される。

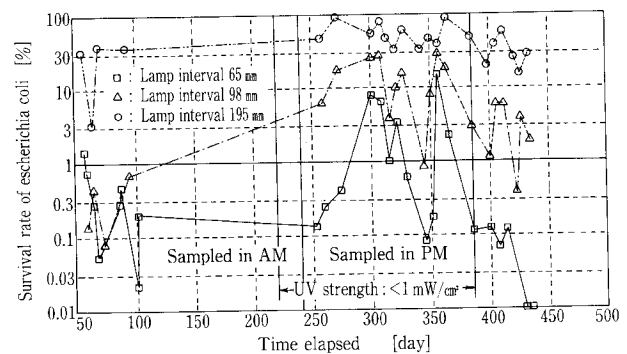
### 3.3 滅菌効果

#### 1) 大腸菌群生存率の経時変化

大腸菌群生存率の経時変化を第6図に示す。生存率は保護管の汚染が確認された経過日数220日までと保護管の洗浄を行った390日以降では1%以下となっている。また、この時の紫外線照射時間は5.5~4.5秒と非常に短時間であったが、大きな滅菌効果が得られていることが



第7図 紫外線照射量と大腸菌群生存率  
Fig. 7 UV irradiation rate and survival rate of escherichia coli.



第8図 大腸菌群生存率の経時変化(ランプ間隔)  
Fig. 8 Change of survival rate of escherichia coli with lamp interval.

わかる。経過日数220~390日の間は生存率は10%程度まで上昇している。この時の紫外線強度は第5図に示すように1 mW/cm<sup>2</sup>以下と低い値となっている。これらのことより、本実験範囲では紫外線強度が1 mW/cm<sup>2</sup>以上の場合、5秒前後という非常に短時間で生存率1%以下、すなわち99%以上の高滅菌率を得ることが出来るといえる。

#### 2) 紫外線照射量の影響

紫外線照射量は開水路内の全紫外線強度と照射時間の積で求めた値であるが、その照射量と大腸菌群生存率の関係を第7図に示す。

紫外線照射量30 mW·s/cm<sup>2</sup>以上で大腸菌群の生存率は1%以下と良好な状態に保たれていた。しかし、30 mW·s/cm<sup>2</sup>以下になると生存率はばらつきが大きく、不安定になるとともに低下している。このことから効果的な滅菌率を得るためには照射量を30 mW·s/cm<sup>2</sup>以上にすることが望ましいといえる。ただ、ランプ間隔を65 mmにした場合は、照射量20 mW·s/cm<sup>2</sup>以上で生存率は1%以下と良好となっている。

#### 3) ランプ間隔の影響

大腸菌群生存率に対するランプ間隔の影響を第8図に示す。

経過日数100日までの大腸菌群の生存率はランプ間隔65 mm, 98 mmで1%以下と良好な結果が得られている。これに対して、経過日数220日以降は、紫外線強度が1

第 3 表 光回復実験結果

Table 3 Result of photoreactivation.

Weather		Fine			
Kind of light		Sunlight		Fluorescent light	
Escherichia coli in raw water count/mL		2 900			
Treated water m <sup>3</sup> /hr		25	31	25	31
Irradiation time hr	0	0	2	0	2
	0.5	17	33	3	0
	1.0	20	12	2	2
	1.5	23	9	4	1
	2.0	30	12	5	1
	3.0	4	1	6	4

(Unit: count/mL)

第 4 表 洗浄前後の紫外線強度

Table 4 Change of UV strength by cleaning. (Unit: mW/cm<sup>2</sup>)

Item	Pure Water	Alkali (1% NaOH)	Acid (1% HCl)
Before cleaning	0.65	0.63	0.70
After cleaning	0.68	0.69	0.92

mW/cm<sup>2</sup> 以下の場合を除き、ランプ間隔65 mmでは生存率1%以下、滅菌率99%以上と高く維持されているが、ランプ間隔98 mmでは生存率の大半が1%以上と滅菌効果が低下している。ランプ間隔195 mmは全期間を通じて生存率10%以上と高くなっている。以上のこと及び前述した紫外線照射量の影響等から、ランプ間隔を65 mmに保てば長期的な運転でも高い滅菌率を得ることができ、本実験範囲ではランプ間隔は65 mmが適切であるといえる。

### 3.4 光回復

紫外線照射は大腸菌群等の滅菌に関して有効であることは前述した通りであるが、滅菌後、可視光線にさらされると一旦破壊されたDNAが修復し、回復するという欠点がある。そこで、滅菌後の処理水を用いてその回復度合いがどの程度になるか調査した。なお、可視光線としては日光と蛍光灯を用いた。

第3表に光回復実験の結果の一例を示す。日光の場合、照射後0.5 hr から2.0 hr の間に、処理直後の0もしくは2個/mLから最大33個/mLまで回復している。しかし、3hr 経過後は数が急激に減少し、5個/mL以下となっている。これらより、日光照射前の10<sup>9</sup>個/mLオーダーの大腸菌群は最大回復数でも10<sup>1</sup>個/mLのオーダーとなり、本実験範囲内の光回復の度合いは10<sup>1</sup>倍であるといえる。蛍光灯の場合、照射時の増加とともに回復する傾向がみられるが、その度合いは非常に小さく、蛍光灯による回復は小さいと推定される。

### 3.5 保護管の洗浄

保護管が原水中に含まれる成分により汚染された場合、紫外線強度が低下し、滅菌率の悪化を招く。本実験でも第5図に示したように経過日数220日で、目視上保護管表面が白濁しているのが観察された。本実験では長期的な汚染状況を調査するためそのまま通水を継続し、経過日数389日に保護管の洗浄を実施した。その時の保護管の表面も白濁しており、薄いスケールが観察された。このスケールを洗浄し、洗浄液を分析したところ、Fe, Al, Caは含まれていたが、有機物は含まれておらず、保護管の付着物は原水中の無機イオンと考えられる。また、洗浄は純水、アルカリ、酸で行ったが、洗浄後の紫外線強度の回復度合いは酸洗浄が最も大きく、洗浄には酸が適している。洗浄前後の紫外線強度を第4表に示す。

一方、保護管の汚染が確認される直前に紫外線強度が2.5 mW/cm<sup>2</sup>から1 mW/cm<sup>2</sup>に急減しており、洗浄を行う時期であったと指定される。この時期はランプ積算時間にして4800 hr (経過日数200日)である。これらより、本実験範囲では保護管は、長期的には原水中の無機イオンにより汚染され、それを洗浄するには酸が効果的であるといえ、洗浄時期は半年程度と推定される。

### 3.6 紫外線ランプの寿命

本実験では438日にわたって実験を継続した。この期間中の紫外線ランプの強度は徐々に低下したが、保護管の汚染による強度低下時を除き、生存率は第6図に示すように1%以下と良好に保たれ、また保護管の洗浄により、生存率は1%以下に回復している。さらに本実験期間中、使用した6本のランプは全くランプ切れを起こさず、交換の必要はなかった。これらにより紫外線ランプは1.2年以上の寿命を持つことは明白であり、定期的に保護管の洗浄を行えば紫外線ランプの寿命は1.5年以上になると考えられる。

### 3.7 経済性の試算

紫外線滅菌方式に関して、処理量を100 000 m<sup>3</sup>/日の場合について建設費と運転費の試算を行った。結果を第5表に示す。第5表には塩素滅菌の各費用も併せて示している。表にも示すように紫外線滅菌は建設費(設備費と据付費)

第 5 表 経済性の試算

Table 5 Estimate of construction and running cost.

(Unit: YEN)

Treatment method		UV sterilization	Chlorination
Design cond.	Raw water	Escherichia coli : $10^4$ count/mL UV transmissivity : > 80 % SS : < 10 mg/L Water temperature : 10~30°C	
	Effluent	Escherichia coli : Under $3 \times 10^3$ count/mL	
Equipment cost		490 million	80 million
Installation cost		80 million	40 million
Running cost per year		35 million	65 million
Running cost per cubic meter		0.96	1.78

は塩素滅菌より高くなるが、運転費は半分になるという結果が得られた。

なお、試算は次の条件を前提として行った。また運転費には設備償却費は含んでいない。

- 1) UV ランプ: ランプ出力 1 KW, ランプ交換 1 年
- 2) 電力単位: 15 円/KWh
- 3) 塩素処理: 使用塩素は次亜塩素酸ナトリウム, 単価 55 円/kg, 注入量 3 mg/L, 有効塩素濃度 10 %

#### 4. まとめ

本実験では、次の結果が得られ、紫外線照射法は非常に有効で、塩素処理の代替技術として下水二次処理水の滅菌に十分適用出来ることがわかった。

- 1) 本実験で用いた二次処理水の大腸菌群数は  $10^3$  個/mL オーダーであり、紫外線透過率は 80 % 以上、COD、濁度はそれぞれ 10~21 mg/L, 2~12 度の範囲にあった。また水質は午後に悪化する傾向があった。
- 2) 紫外線ランプの強度は徐々に低下し、経過日数 200 日で 2.3 mW/cm<sup>2</sup>, 294 日で 0.5 mW/cm<sup>2</sup> と初期の 51 %, 11 % まで低下した。紫外線強度が低下した主因は無機イオンによる保護管の汚染と考えられ、その洗浄には酸が適していた。また洗浄は半年に 1 回が適当と考えられる。
- 3) 紫外線照射時間 5 秒前後と、非常に短時間で大腸菌群の滅菌を行うことができ、しかも生存率は 1 % 以下、すなわち 99 % 以上の滅菌率が得られる。この時の開水路内の紫外線照射量は 30 mW・s/cm<sup>2</sup> 以上必要である。
- 4) ランプ間隔 98 mm では経過日数が 100 日程度と短期間で

あれば大腸菌生存率 1 % 以下となるが、経過日数 400 日以上と長期間になると 65 mm が適切であった。

- 5) 光回復により大腸菌群は回復するが、その度合いは  $10^1$  倍で、生存率が 1 % 以下の場合、光回復があっても 3 000 個/mL という放流基準は十分に遵守出来る。
- 6) 紫外線ランプの寿命は 1.2 年以上であることが明らかとなり、適切な洗浄を組み合わせれば、ランプ寿命は 1.5 年以上と考えられる。

#### む す び

人々にやすらぎや快適さを与える親水空間の整備や自然の生態系の保護は、今後ますます必要になってくる。化学物質を直接注入せず、生態系への悪影響や有害物質の生成がなく、さらに非常に短時間で処理が可能な紫外線滅菌は、ますますその必要性が増加すると考えられる。本実験が今後の紫外線発展に役立てば幸いである。

なお、本実験は神戸市下水道局（現 神戸市建設局下水道部）よりの委託を受け、垂水処理場で行ったものであり、実験を行うにあたり様々のご指導、ご協力を賜った神戸市下水道局の関係者の方々に感謝いたします。

#### 〔参考文献〕

- 1) 大垣真一郎, 神子直之: 月間下水道, Vol. 18, No. 6, (1995), 環境新聞社, p. 20-23
- 2) 西山健之: PPM, Vol. 301, (1995/5), 日工フォーラム社, p. 36-42
- 3) 町田三一: 紫外線による水の消毒・殺菌と有害物質の効果的処理方法 (講習会テキスト), (1995/11), p. 1-9
- 4) (株) 日本フォトサイエンス: 紫外線殺菌 技術資料, FACT FILE L-107