

紫外線消毒法の現状
～光源開発の歴史と現在の状況～
Review of Ultraviolet disinfection

大瀧雅寛
Masahiro OTAKI

1. はじめに

現在、我が国では上下水道ともに塩素を主な消毒剤として使用している。第二次大戦後に GHQ の指導の下、上水道の塩素消毒が義務づけられて以来、我が国の水系感染症からの衛生保守に多大な貢献をしてきたことは重要な事実である。しかし近年塩素消毒処理の際に生成してしまう発ガン性物質が問題となり、その代替処理が盛んに検討された。候補としてはオゾン・クロラミン・紫外線・二酸化塩素などが挙げられてきたが、ここ数年の流れでは欧米を中心にどうやら紫外線が消毒が大きなウエイトを占めそうな勢いである。

その要因としては、

- 1)副生成物が生じにくい
- 2)維持管理が簡単である

といった紫外線消毒のもつ本来の特徴に加えて、欧米では

- 3)既に大規模なプラントを含めて実績がある。

という背景を持っていること、さらにここ数年の動きとして、

- 4)塩素消毒が効かない病原に効果があることが報告された。

という大きな追い風が吹いたということが挙げられる。

ヨーロッパのある試算では、全世界における消毒処理に関して、1997 年時点ではその割合が、塩素 87%、紫外線 10%、

その他 3%であったが、2005 年には塩素 55%、紫外線 30%、その他 5%と大幅に紫外線のシェアが伸びるであろうと報告している。

ここでは、この紫外線消毒について、その歴史を振り返り、かつ現時点での状況を解説することにする。

2. 紫外線消毒の歴史¹⁾

そもそも紫外線の発見は 1801 年の J.W.Ritter による可視光よりも短い波長の電磁波の確認に端を発する。その後、1877 年には Downs と Blunt により、この電磁波が細菌に関して影響を与えることが発見され研究が進められた。一方、光源の開発はその直ぐ後に始まっている。1892 年に Arons が水銀蒸気をガラスチューブに封入し、電圧をかけると紫外線が生じることを発見し、現在の紫外線ランプの源となった。その後 1905 年に Hereus がガラスチューブの代わりに石英ガラスを使った改良型のランプを発明し、現在の水銀ランプの原型がほぼできあがった。

水の消毒に実際に適用されたのはフランスの Marseille に導入されたのが始めてである。しかしこの装置には、ランプの不安定性、供給電源の不安定性などといった技術的問題を残したものであった。その後 1920 年には塩素を工業的に生成する方法が発明され、消毒の主役を塩素

に譲ることになるのである。

1940年には、水銀封入圧力を調節したランプの製造技術が進み、より安定した紫外線光源が開発された。この頃には水の紫外線消毒の適用例も多く報告されはじめているが、その多くは失敗例としての報告であった。

1955年には、スイスにおいて耐水圧型ランプを用いて、初めて上水道への適用が行われた。その後はヨーロッパ諸国を中心にその適用例は徐々に増えていった。

1970年代になると塩素消毒で生じるトリハロメタン(THM)類の問題がわき起こり、代替処理として紫外線消毒が注目されるようになった。さらに1990年代後半になると塩素消毒がほとんど効かない下痢症病原原虫であるクリプトスポリジウムに紫外線が有効であるという研究報告が相次ぎ、紫外線消毒の適用例の増加に拍車がかかることになる。

3. 紫外線光源ランプについて

紫外光とは図1の様に400nm以下の電磁波のことを示す。特にUV-Cの領域の紫外光は消毒作用が大きいという特徴がある。

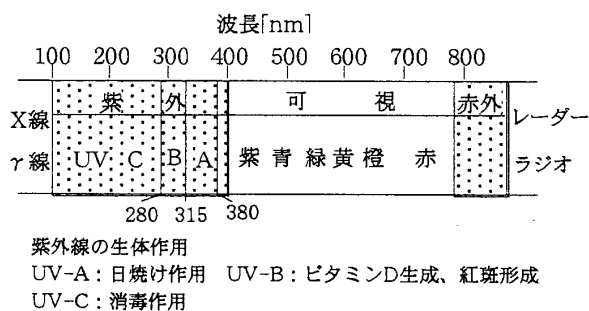


図1 電磁波の波長とその特徴²⁾

現在、主に使用されているのは低圧水銀ランプ、中圧水銀ランプの2種である。

それぞれの特徴を次に示す。

3.1. 低圧水銀ランプ

水銀封入圧力が0.007 mmHg程度のランプ。封入するチューブを石英管の代わりに、白色蛍光塗料を塗ったガラス管にすれば、通常の蛍光灯である。これまで最も一般的に使用されてきた紫外線消毒用ランプであり実績も高い。従来より電源供給の安定器の信頼性に問題があったが、近年これは解消され、安定した紫外光供給が達成されるようになった。またランプの寿命も延びており、10,000時間を超えるものも開発されている。長寿命化は、ランプの交換頻度を少なくし、維持管理費の削減につながる。

その他の長所として

- 1)消毒効果のある紫外光へのエネルギー変換効率が高い。
- 2)安価である。

といった点が挙げられる。一方、短所としては

- 1)ランプ一本当たりの出力が弱いため、多数本必要となる。
- 2)温度変化に影響を受ける。

といった点が上げられる。ただしこの短所を補うべく、高出力の低圧水銀ランプが開発された。

このランプは水銀封入圧力を従来型より40%程度高くし、運転電流を従来の10~15倍である5 At程度にして運転温度を従来の5倍の180~200℃で運転しているものである。これにより、紫外光へのエネルギー変換効率を高くしたまま、一本当たりの出力を上げることに成功している。このランプでは、多数本のランプが必要ではないため、装置の簡略化、維持管理費の削減などが見込めることに

なる。

3.2. 中圧水銀ランプ

このランプは比較的近年開発されたものであり、水銀封入圧力を $10^2 \sim 10^4$ mmHg としたランプである。ランプの運転温度は $600 \sim 800^\circ\text{C}$ と非常に高く、そのため電極などには耐熱性の材料を用いる必要がある。紫外光の出力は通常の高圧水銀ランプの 50~80 倍と非常に高い。ランプ寿命は高圧水銀ランプに比べると短く、4,000~8,000 時間と言われている。ただしこれは入力電力に大きく依存し、入力が大きいと寿命も短くなってしまふ。

このランプの主な長所は以下の通り。

1) 一本当たりの出力が高いため、ランプ本数の少数化が見込める。従って、装置の簡略化による初期設備コストを低くでき、ランプの清掃や交換に関する手間といった維持管理費を抑えることが出来る。近年では、自動クリーニング装置をもつランプユニットも開発されている。

2) 水温による温度依存性が小さいので安定した消毒効率が見込める。

一方、短所は以下の通り。

1) 紫外光以外の光も出てしまうので (図 2 参照)、エネルギー変換効率が低くなる。高圧水銀ランプが 30~35% であるのに対し、中圧水銀ランプは 5~7% しかない。従ってその分、必要な紫外光を得るための電力消費量が大きくなり、維持管理費において不利になる。

2) 高価である。ただし製造本数が増えれば製造元における製造コストの合理化により価格は下がるであろう。

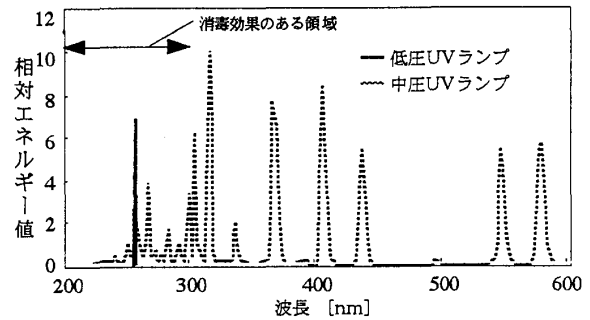


図 2 両ランプの照射波長スペクトル

4. 紫外線ランプの設置方法³⁾

4.1. オープンチャンネル型

開水路に、ランプを浸せきさせる方法である。ランプを流れ方向に垂直に立てる形式と、水平に設置する形式がある (図 3 参照)。この方式は、ランプの交換などの維持管理が容易である、損失水頭が小さくて済み、自然流下でも良いなどの長所がある。

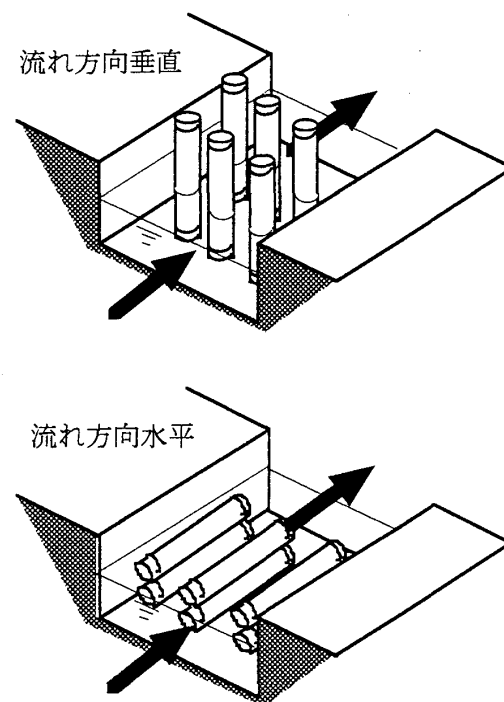


図 3 オープンチャンネル型の概念図

処理水は外気に曝されているため、こ

の方式は下排水処理への適用がほとんどである。

4.2. ユニット型

閉水路内にランプが組み込んであるタイプである。損失水頭が高くなるため、基本的にポンプが必要なため、コストがかかる。またランプの交換など維持管理が容易でない。ただし密閉型であるため、処理後の衛生的安全性は高くなるため、浄水処理への適用が主である。

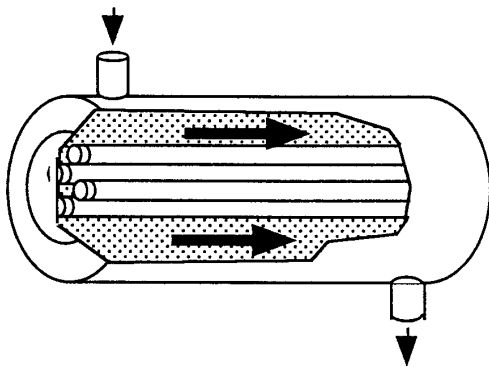


図4 ユニット型の概念図

5. 紫外線ランプの消毒効率の推定⁴⁾

設置する紫外線消毒装置が、必要な消毒効率を確保しているかは、そのシステム全体でどれだけの、消毒効果エネルギーを受け取ることができるかを推定もしくは実測しなければならない。通常ランプ一本の照射線量率を光量計にて測定し、その量を用いて照射部の形状、流動条件、壁面での反射率などを加味して、エネルギー量を算定する。ただし、装置の形状が複雑であると照射エネルギー分布の推定が困難であったり、流動モデルの確率が困難であったり、正しい推定を行うことは大変な作業である。

そこで生物線量計を用いる手法が開発され、装置全体で受け取るエネルギー量

の測定や確認に用いられている。この方法は、微生物と照射紫外線量率との関係が既知であり、かつ測定が簡単な微生物を用いる方法である。装置の通過前後の濃度を測定することにより、その微生物が受けた紫外線線量を算定する。一般に微生物は次の式に従って減少する。

$$\ln(N_{out}/N_{in}) = -k \cdot D = -k \cdot I \cdot t \quad (1)$$

N_{out} : 出口濃度、 N_{in} : 入口濃度

k : 定数 D : 紫外線線量

I : 線量率 t : 照射時間

図5で示すような、二重円筒管において、乱流、層流における照射線量推定モデルが成立しているかどうかを実験によって確かめた。

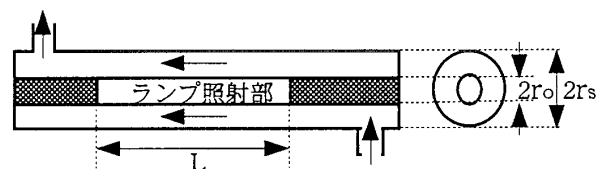


図5 二重円筒管の概念図

二重円筒管内の線量率分布は照射部表面の線量率を I_0 、外筒内壁の反射率を λ とすると次の様に表せる。

$$I_r = (r_o/r_s)I_0[\exp(-2.3A(r-r_o)) + \lambda \exp\{-2.3A(2r_s-r_o-r)\}] \quad (2)$$

I_r : 中心からの距離 r における線量率

A : 吸光度 λ : 反射率

5.1. 乱流の場合

二重円筒管内で粒子がランダムに動き

回り、管内流速がほぼ一様であると仮定できる。従って乱流の場合の対象微生物の不活化率の推定は、(2)式の積分で求められる管内の平均線量率 I_{avg} と平均滞留時間 τ を用いて(1)式で求められる。

5.2. 層流の場合

二重円筒管内流速が一様でないため、中心からの距離によって滞留時間が異なる。層流の場合の二重円筒管内流速は次の式で表される。

$$v_r = (\Delta P / L) (r_s^2 / 4\mu) \{1 - (r/r_s)^2 + (1-k^2) \ln(r/r_s) / \ln(1/k)\} \quad (3)$$

ΔP : 圧力損失 v_r : r における流速
 μ : 粘性係数 k : r_o/r_s

この流速分布と線量率分布を併せると層流の場合の不活化率の推定式は流量を Q とすれば、次式となる。

$$N_{out}/N_{in} = (2\pi/Q) \int_0^{r_s} v_r \exp(-I_r L/v_r / D) r dr \quad (4)$$

以上の推定式が正しいかどうか、紫外線照射による不活化率が既知である微生物を用いて確かめてみた。対象として、大腸菌ファージ $Q\beta$ を用いた。このファージ $Q\beta$ は測定結果の再現性がよく、かつ測定が簡便であるという長所をもつ。

$Q\beta$ の不活化速度定数 k はシャーレ実験より既知であり、 $0.17[\text{cm}^2/\text{mJ}]$ であることがわかっている。外筒内壁の反射率は実測できない。まず試料の吸光度を高くして、反射率の影響が無視できる状況にした。乱流条件において一定流量とし、 $Q\beta$ の不活化率を実測した。この

結果より実験結果から I_o を算定した。この I_o を用いて、様々な吸光度と流動条件における、不活化率算定値と実測値を示したのが、図6である。

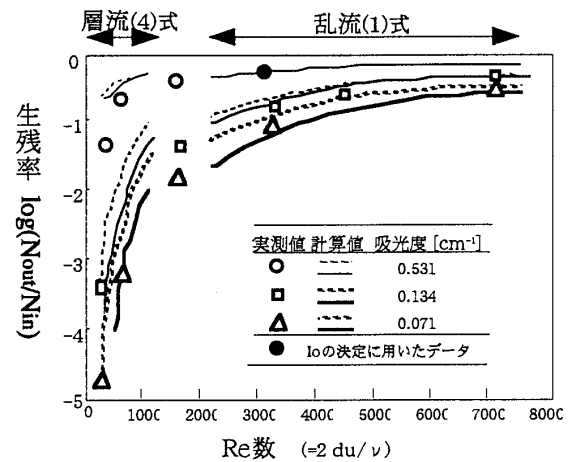


図6 実測値と算定値の比較⁵⁾

図6では層流、乱流とも実測値は反射率 0~100%を仮定した算定値の範囲に入っており、この算定モデルが、流動状況や吸光度による不活化率の変化の傾向を良く表しているといえる。

この方法を応用すれば、使用したい紫外線装置を用いて、流入流量と吸光度を変化させて、既知の微生物の不活化率を実測しておけば、各流量における様々な吸光度条件について、この装置特有の装置内平均線量を簡単に求めることが出来る。

図7はその一例である。例えば、 $1[\text{m}^3/\text{h}]$ の流量で処理水の吸光度が $0.1[\text{cm}^{-1}]$ の場合、図から装置内平均線量は $11[\text{mJ}/\text{cm}^2]$ であることが直ぐにわかる。また装置内平均線量を $40[\text{mJ}/\text{cm}^2]$ に設定したい場合、流量 $0.1[\text{m}^3/\text{h}]$ で運転する際には、処理対象水の吸光度が $0.18[\text{cm}^{-1}]$ 以下に保たれば、要求する線量率以上の消毒効率が確保されるこ

とになる。

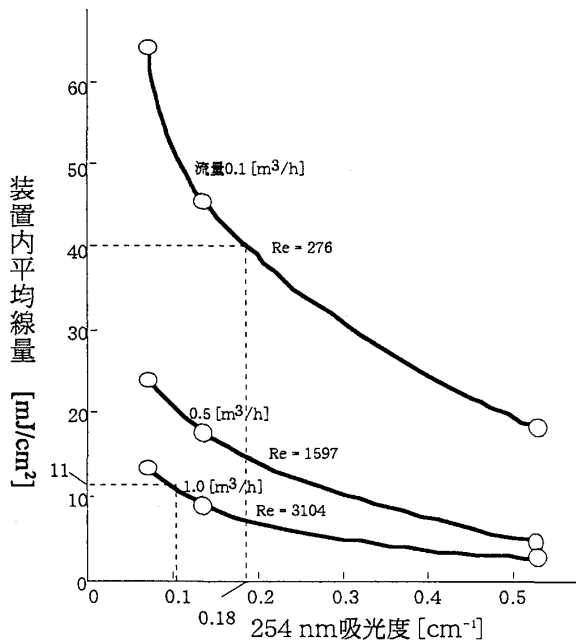


図7 吸光度、流量変化における装置内平均線量⁵⁾

紫外線ランプが低圧ランプであれば、照射波長である 254nm の吸光度が重要なパラメータであることは納得できよう。しかし中圧ランプの場合は、照射波長域が広く、どの波長の吸光度を代表すれば良いか、簡単には決められない。既存の研究によれば⁶⁾、二重円筒管装置を用いた検討結果により、254nm 吸光度の値を代表値として用いた場合でも、低圧ランプとほぼ同様にモデルの整合性、装置内線量の推定に用いることができることが示されている。

6. 今後の展望

光利用の水処理では、当然だが水の中に光が十分行き渡らなければその効果は発揮されない。また水中の濁りに病原微生物が付着して、光が当たらなくなるようなことも考えられる。すなわち光を遮

断するような懸濁物質が水中にある様な状況が、この処理の苦手とするところである。

病原微生物が高濃度で存在するような排水（例えば畜産排水）の中には、これら懸濁物質濃度が高い場合が多く、紫外線導入には二の足を踏むことがあった。しかしクリプトスポリジウムに対する有効性といった他の消毒方法に比べ、抜きんでている長所が見つかったことにより、装置設計の改善や適切な前処理の付加といった検討が進めば、厳しい条件に対しても応用範囲が広がっていく可能性は大いにあると考えられる。

参考文献

- 1) Sommer, R. , UV disinfection of drinking water in Europe: application and regulation, Proc. of The 1st Asia regional conferece on UV tech. for water, wastewater & Environment, 2002.
- 2) 石山栄一, 清涼飲料水製造における紫外線殺菌の利用, 食品機械装置, 30(8), 71-81, 1993
- 3) Wastewater disinfection, Water Environ. Federation, 1996.
- 4) Kamiko, N. et al., RNA coliphage Q β as bioindicator of ultraviolet disinfection processes, Wat. Sci. Tech., 21(3), 27-231, 1989.
- 5) 佐藤敦久ら, 水処理, 技報堂出版, 1992
- 6) 大瀧雅寛ら, 中圧紫外線照射装置のウイルス不活化への効果, 第 42 回全国水道研究発表会講演集, pp.593-595, 1991