

# 下水道用紫外線消毒装置の実用化

Practical Ultraviolet Disinfection System for Sewage Effluent

小林 伸次

KOBAYASHI Shinji

波多野 晶紀

HATANO Akinori

林 幸司

HAYASHI Koji

下水の消毒は、従来、塩素を使用した薬品による消毒が行われてきたが、薬品による魚類への悪影響やトリハロメタンなどの副生成物が問題視され始めてきた。このため、最近、遺伝子伝達情報を持つDNA(デオキシリボ核酸)に直接作用する紫外線光による消毒が注目されている。

紫外線による消毒装置の実用化のポイントは、紫外線ランプと必要な消毒性能の達成である。開発した無電極紫外線ランプは、発光管外部に設けた3本の誘導コイルにより500Wの高周波電力を高密度で入力し、強力な紫外線の発生を実現した。また、消毒装置内の紫外線照射分布に対する水流の最適化により、殺菌率99.9%以上の消毒性能を達成し実用化に至った。

The chlorine disinfection method has been used for sewage treatment. However, it has begun to be regarded as detrimental due to the harmful chemical effects on marine life and the problem of sub-products (trihalomethane, etc.). Recently, the use of ultraviolet (UV) radiation to directly work on DNA has been attracting attention as a disinfection method.

Key points in the development of such a system are a high-intensity UV light source and a disinfection system that realizes colon bacillus removal. The use of RF-frequency power circuit technology has made an input power of 500 W possible, realizing a high-intensity and high-power UV light source. Optimization of the water current path in the sewage effluent disinfection system has realized a colon bacillus removal rate of 99.9%.

## 1 まえがき

下水の二次処理水の消毒手段として、塩素を使用した薬品による消毒が行われてきたが、薬品の注入過多や液漏れにより魚類に悪影響を与えたり、トリハロメタンなどの発癌(がん)性物質を生成したりして、問題視され始めている。このため、薬品を使用しない消毒手段として最近、遺伝子伝達情報を持つDNA(デオキシリボ核酸)に直接作用する紫外線光による消毒が注目されている<sup>(1)</sup>。

紫外線光が大腸菌などに照射されると、DNAの塩基列中のチミン(C)が並んでいる箇所、C=C(チミン二量体)が生成されDNAの複製が阻止される。これにより、細菌などの増殖を抑制し、その個体の死とともに絶滅する。この結果、環境にクリーンで、耐熱性、耐薬品性の菌やウイルスなどに対しても種類を問わず十分な消毒ができる。

紫外線消毒装置は、高周波発生器を内蔵する制御盤と紫外線照射モジュールから成り、比較的シンプルに構成される。そのため、塩素系消毒装置のように、維持管理に神経を使う薬品タンクや薬品ポンプなどの設備を必要としない点にメリットがある。更に、消毒は処理水が紫外線ランプの周囲を流れる間に行われ、処理水とランプとの接触時間も短時間で済むため接触水槽も不要となり、省スペースでの設置・増設

が可能となる。したがって、紫外線消毒装置は、下水処理場の最終沈殿池からの放流堰(せき)に設置され、紫外線光により消毒された水だけが河川に放流される場所に設置される場合が多い。

## 2 紫外線消毒装置

紫外線消毒装置の実用化のポイントは、強力な紫外線を発生する無電極紫外線ランプと紫外線照射モジュールの消毒性能の達成である。以下に、これらの2点を中心に述べる。

### 2.1 紫外線ランプ

紫外線による消毒は、DNAの紫外線吸収率の関係から、波長260nm付近の紫外線照射がもっとも効率的である<sup>(2)</sup>。一般的には“低圧水銀ランプ”が、消毒目的の紫外線光源として“殺菌ランプ”と呼ばれ利用されている。このランプは、波長254nmをもっとも効率よく発生する。

この殺菌ランプは、一般の照明用の蛍光灯と基本構造は同じだが、ランプ内部の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と、放電管の材質に紫外線光が透過する石英ガラスを使用している点が異なる。

しかし、この殺菌ランプを下水道向けに実用化するための問題点は、点灯寿命が短いことである。これはフィラメント

の断線やフィラメントの蒸発などにより放電管内面が黒化するため、紫外線出力が低下してくることが原因である。

当社は、殺菌能力向上のためにランプの高出力化を図るとともに、これらの問題を解決するため、高周波を応用した無電極放電型の紫外線ランプの開発を進めてきた。

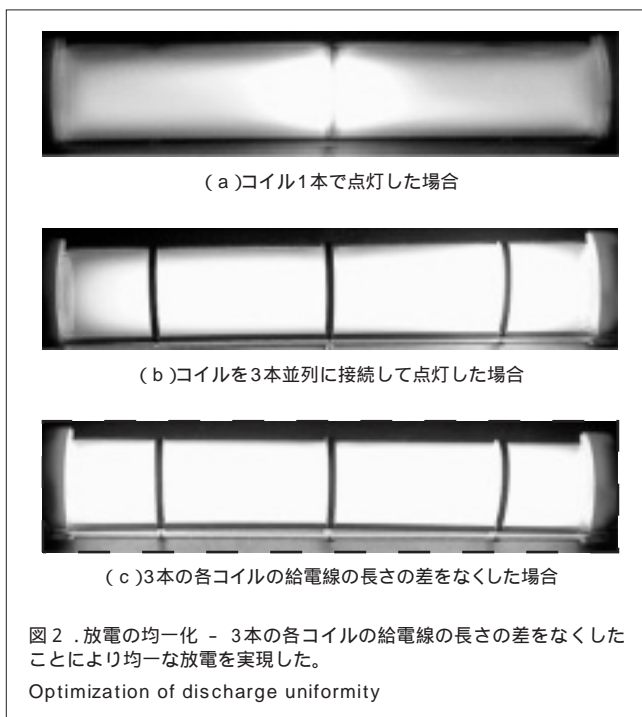
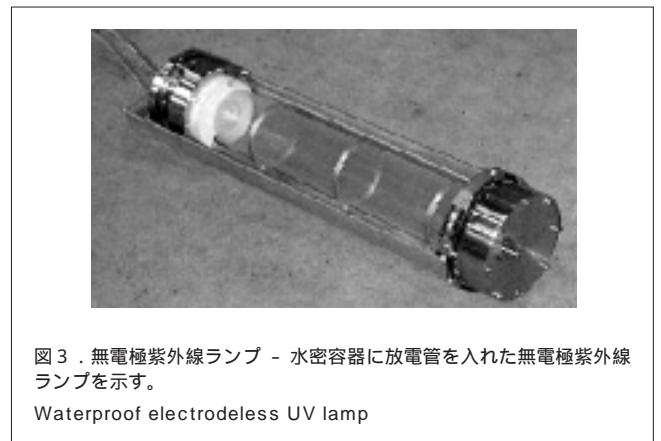
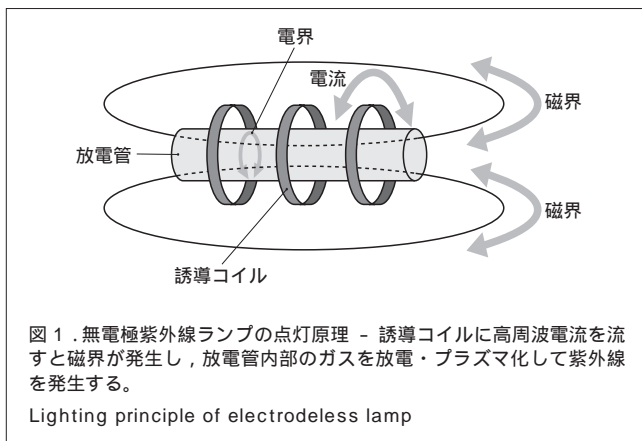
2.1.1 点灯原理 無電極紫外線ランプの原理を図1に示す。放電管(発光管)外部に設けられた3本の誘導コイル(1ターンの3並列接続)に高周波電流(13.56 MHz)を流すと、アンペールの法則により磁界が発生する。この磁界が放電管内部で電界を誘起し、封入されたガスを放電によりプラズマ化する。このプラズマから消毒に有効な紫外線が発生する。

2.1.2 均一な放電の実現 無電極紫外線ランプの高出力化を図るためには、大型の放電管に均一な放電を点弧することが不可欠である。コイル1本では、図2(a)に示した

ようにランプ全体を点灯させることができない。つまり、ランプを長くするにつれてコイルの数を増やす必要がある。しかし、高周波を利用しているため、3本ある誘導コイルまでの給電線の長さの差が生じると、その差がインダクタ成分の差となり高周波電流に差が出る。結果として図2(b)に示したように放電に偏りを生じる。したがって、給電線の長さの差をなくすように高周波回路の構成を行う必要があり、この技術により、図2(c)に示したような均一な放電を実現した。このときの紫外線(波長254 nm)の発光強度分布差は、全長にわたり±3%以下であった。

結果として、大型の放電管(長さ:500mm 直径:86mm)に、外部に設けられた3本の誘導コイルで500Wもの高周波電力を投入することを可能にした。

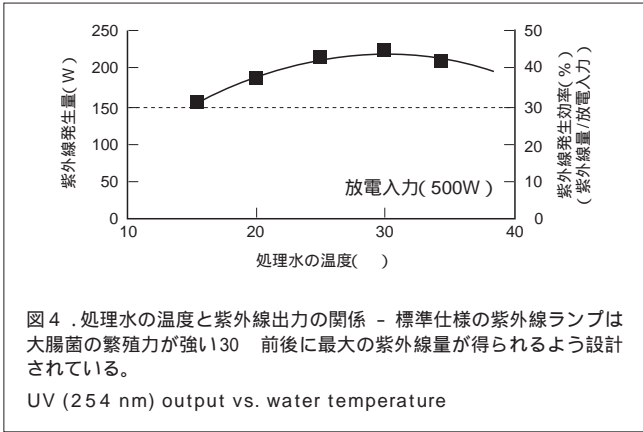
水密容器に放電管を入れた無電極紫外線ランプを図3に示す。この無電極紫外線ランプの放電入力は、従来のランプに比べ5倍以上大きいので、一度に大量の下水を処理することができる。



2.1.3 紫外線ランプと処理水温の関係 殺菌ランプから発生する紫外線の波長は、封入されたガスの圧力と水銀の蒸気圧の比によって変化する。封入されたガス圧力はほとんど変化しないため、一般に水銀の温度で決まる水銀の蒸気圧が紫外線発生量を決め、最適な値を超えると、消毒に寄与しない長波長側の発光が増える。

無電極紫外線ランプも例外ではなく、ランプの放電管のもっとも冷えた箇所(最冷点)の温度により水銀の蒸気圧が決まる。放電管を直接冷却した場合、その紫外線発生量の最大値は35 前後である。

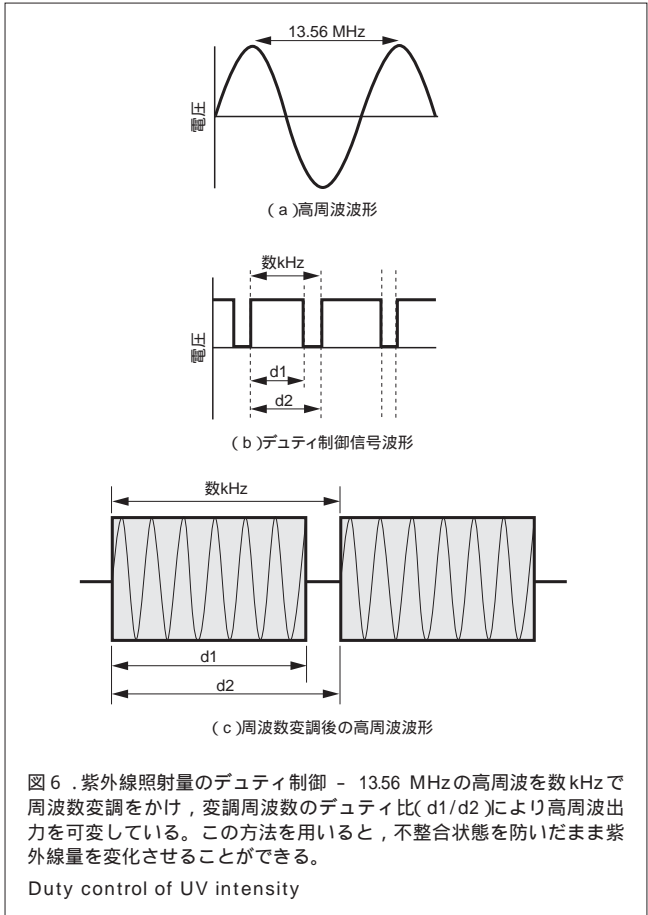
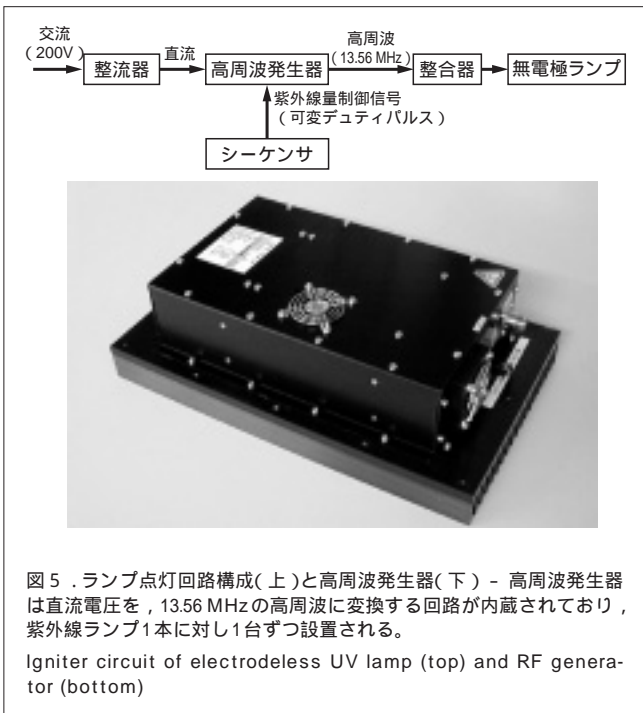
処理水の温度と消毒に寄与する波長254 nmの紫外線発生量の関係を図4に示す。大腸菌の繁殖力が強い30 前後にその最大の紫外線照射量が得られるように設計した。また、紫外線発生効率も最大で45%に達し、処理水温が15 から35 間において30%を超える高効率である。



2.1.4 紫外線照射量の制御 下水処理場で処理される処理水量は常に一定ではない。このため、処理水量の増減に合わせて紫外線照射量を制御する必要がある。後述するが、当社の無電極紫外線ランプ1本当たりの消毒処理能力は20 m<sup>3</sup>/hもの大容量である。このため、点灯本数を変えて対応するのではなく、紫外線ランプ単体からの紫外線照射量を調整する必要がある。

無電極紫外線ランプの点灯回路の構成と高周波発生器を図5に示す。この高周波発生器は、直流電圧を13.56 MHzの高周波に変換する回路が内蔵されており、紫外線ランプ1本に対し1台ずつ設置される。紫外線量を調整する制御回路はこの中に内蔵されており、シーケンサからの制御信号(可変デューティパルス信号)により放電入力を変え、紫外線照射量が調整される。

放電入力の可変方法を、図6に示した。13.56 MHzの高周



波を1 ~ 10 kHzで周波数変調をかけ、変調周波数のデューティ比(d1/d2)により高周波出力を可変するデューティ制御方法を採用している。

この方法を用いると、高周波発生器からの高周波出力を可変させた場合でもコイルの両端にかかる電圧と流れる電流は変化せず、プラズマのインピーダンスの変化から生ずる不整合状態を防いだまま紫外線量を変化させることができる。

2.1.5 無電極紫外線ランプの寿命 紫外線ランプの寿命を決定する要因は、不点灯になるまでの時間(不点寿命)と経時劣化による紫外線出力の低下の2点である。

不点寿命は、フィラメントの消耗などに起因してランプが点灯しなくなる場合をいう。無電極ランプにすることにより、電極寿命に起因する不点寿命をなくすことに成功した。

したがって、無電極紫外線ランプの寿命は、紫外線出力の低下が初期出力の70%に減衰したときと規定されている。コイル近傍の放電管内部に金属酸化物が付着すること、あるいは、放電管を構成する石英ガラスが紫外線によって劣化し白色化することが、紫外線出力の低下の原因と考えられている。紫外線出力の低下の時間変化測定結果から、寿命約5万時間が見込まれている。

## 2.2 紫外線照射モジュール

紫外線照射モジュールは、紫外線ランプ、ランプ表面を定

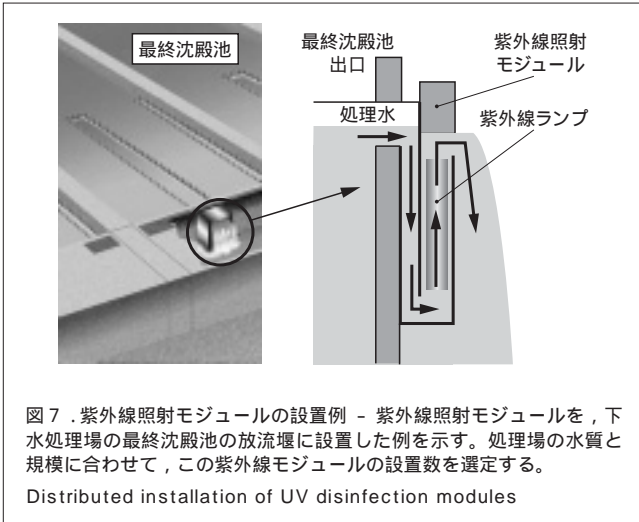


図7. 紫外線照射モジュールの設置例 - 紫外線照射モジュールを、下水処理場の最終沈殿池の放流堰に設置した例を示す。処理場の水質と規模に合わせて、この紫外線モジュールの設置数を選定する。  
Distributed installation of UV disinfection modules

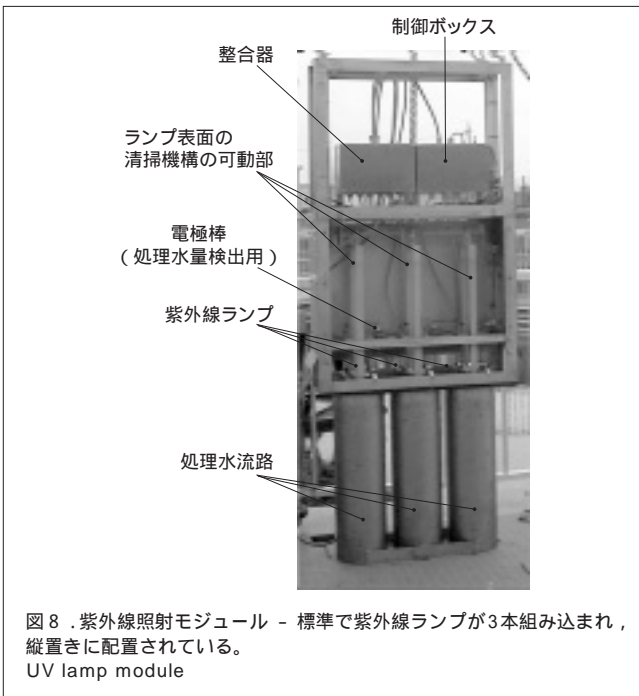


図8. 紫外線照射モジュール - 標準で紫外線ランプが3本組み込まれ、縦置きに配置されている。  
UV lamp module

期的に清掃する機構及び電子制御機器から成り、比較的シンプルに構成している。紫外線照射モジュールを下水処理場の最終沈殿池の放流堰に設置した例を図7に示す。処理場の水質と規模に合わせて、この紫外線照射モジュールの設置数を選定する。

紫外線照射モジュールを図8に示す。紫外線照射モジュールは、標準で紫外線ランプが3本組み込まれ、縦置きに配置されている。水密容器の石英ガラス管の表面を清掃する清掃機構や水位検出による流量モニタなどを備えている。また、処理水に応じて紫外線照射量を可変する機能も備えている。

2.3 消毒性能

ランプ1本当たりの消毒性能を図9に示す。この開発装置

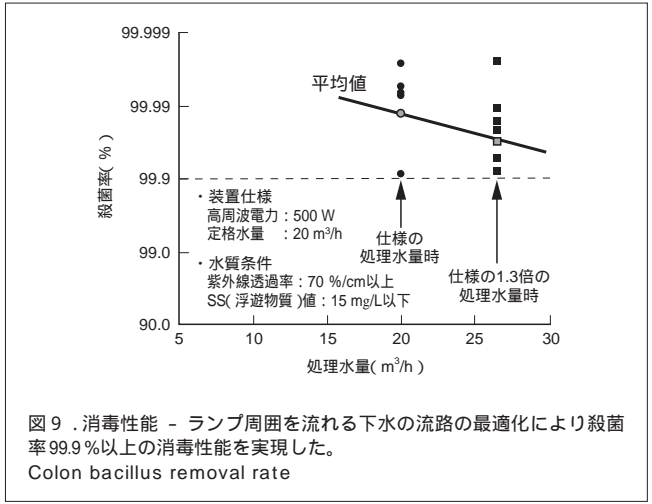


図9. 消毒性能 - ランプ周囲を流れる下水の流路の最適化により殺菌率99.9%以上の消毒性能を実現した。  
Colon bacillus removal rate

では、ランプ周囲を流れる下水の流路の最適化により、殺菌率99.9%以上の消毒性能を実現することができた。通常、大腸菌数は多くても数万個であるため、ランプ1本当たりの規定処理水量20 m<sup>3</sup>/h以下で紫外線処理した後は、完全滅菌か多くても数個の大腸菌しか検出されない。

3 あとがき

高周波放電を紫外線光源に適用することにより、環境に対してクリーンな紫外線消毒装置を実現した。今後、開発した紫外線消毒装置を、次世代の下水処理システムとして広く市場に投入していく。

文献

(1) 野津敬一. 紫外線の生物作用. 共立出版社. 1975, 13p.  
(2) 近藤宗平. 分子放射線生物学. 学会出版センター. 1984, 75p.



小林 伸次 KOBAYASHI Shinji  
電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 産業システム・パワエレ開発部。放電応用機器の開発に従事。応用物理学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center



波多野 晶紀 HATANO Akinori  
社会インフラシステム社 社会・産業システム事業部 公共システム技術第一部。水処理システムの開発に従事。  
Public & Industrial Systems Div.



林 幸司 HAYASHI Koji  
社会インフラシステム社 社会・産業システム事業部 公共システム技術第一部。環境機器のシステム設計に従事。  
Public & Industrial Systems Div.