

$$D = I \cdot t \quad (1-5)$$

ここで、D：紫外線照射量 [mJ/cm<sup>2</sup>]

I：紫外線強度 [mW/cm<sup>2</sup>]

t：暴露時間 [sec]

一般的に、個々の微生物に対する紫外線消毒の効果は、紫外線照射量と対数不活化率との関係（紫外線照射量－微生物応答曲線）で表される。

$$\text{対数不活化率} = \log_{10} (N_0/N) \quad (1-6)$$

ここで、N<sub>0</sub>：紫外線照射前の感染性を有する（若しくは生存している）  
微生物濃度

N：紫外線照射後の感染性を有する（若しくは生存している）  
微生物濃度

#### 6. 4. 3 紫外線の伝搬<sup>17)</sup>

ランプから照射された紫外線は可視光と同様、物質との相互作用により、反射、屈折、散乱、吸収という一連の過程を経て、微生物などの消毒対象物質に到達する。

反射（Reflection）とは、光が物質の表面にあたって伝搬方向が変わる現象をいう。反射には正反射（Specular Reflection）と乱反射（Diffuse Reflection）とがある。正反射は滑らかな研磨面で起こり、「入射角と反射角とは等しい」という反射の法則に従う。

乱反射はザラザラした面で起こり、入射角とは関係なく、あらゆる方向に光を散乱させる。紫外線照射槽内では、反射は照射槽壁のように紫外線を透過させない面で起こるが、石英製ランプスリーブ内面でも起こる。

入射光の強度と反射光の強度との関係は次式で表される。

$$I_R = \rho \cdot I_0 \quad (1-7)$$

ここで、

I<sub>R</sub>：反射光の強度 [mW/cm<sup>2</sup>]

I<sub>0</sub>：入射光の強度 [mW/cm<sup>2</sup>]

ρ：紫外線反射率 [-] ρ < 1

紫外線照射槽内部のように槽壁で無限回の反射が起こる場合には、反射光の総括的強度は（1-8）式で表される。

$$I_R = \rho \cdot I_0 / (1 - \rho) \quad (1-8)$$

したがって、紫外線照射槽内壁には反射率の高い材質のものを選定する必要がある。屈折（Refraction）とは、光がある媒質から別の媒質へと通過する際、光の伝搬方

向が変わる現象をいう。紫外線照射槽ではランプから照射された紫外線がランプとスリーブとの空隙やランプスリーブ及び水中を通過する際に屈折が起こる。このような伝搬方向の変化により、紫外線が消毒対象微生物に当たる角度が変わる。

散乱 (Scattering) とは、粒子との相互作用により光の伝搬方向が変わる現象をいう。粒子は光をあらゆる方向に散乱させ、入射光の光源方向にも散乱させる (後方散乱)。光の波長より大きい粒子では、より多くの光が前方に散乱するが、後方散乱も起きる。光の波長よりも小さい粒子による波長変化を伴わない散乱をレイリー散乱 (Reyleigh Scattering) という。レイリー散乱の特徴は散乱光強度が光の波長の 4 乗に逆比例することで、空が青く見えるのはこの散乱で説明されている。

吸収 (Absorption) とは、光がある物質内を通過することにより、他の形態のエネルギーに変換される現象をいう。物質による紫外線吸収は波長によって異なる。

照射槽の構成部や照射槽内の水は、それぞれの度合により紫外線を吸収する。

照射光の強度を  $I_0$ 、物質に吸収された後の透過光の強度を  $I_t$  とすると、透過度  $t$  [-] 及び透過率  $T$  [%] は次式で表される。

$$t = I_t/I_0 \quad T = 100 \times t = 100 \times I_t/I_0 \quad (1-9)$$

Lambert の法則により、光路長を  $l$ 、比例定数を  $k$  とすれば

$$\log_{10} (I_0/I_t) = \log_{10} (1/t) = -\log_{10} t = k \cdot l \quad (1-10)$$

$\log_{10} (I_0/I_t)$  を吸光度  $A$  とおけば

$$T = 100 \times 10^{-A} \quad (1-11)$$

Lambert と Beer の法則を組み合わせることにより、吸光度  $A$ 、光路長  $l$ 、物質の濃度  $C$  との関係は次式のような簡単な式で表される<sup>18)</sup>。

$$A = \varepsilon \cdot C \cdot l \quad (1-12)$$

$\varepsilon$  は物質の種類と光の波長によって決まる定数で吸光係数と呼ばれている。特に物質の濃度として  $1w/v\%$ 、光路長  $1cm$  のセルを用いた時の  $\varepsilon$  を比吸光係数といい、 $E$  ( $1\%$ ,  $1cm$ ) で表される。

浄水処理における紫外線消毒を効率良く行うためには、照射された紫外線が水中に存在する微生物に効果的に到達する必要がある。したがって、紫外線消毒の対象水としては、濁度、色度成分、紫外線吸収物質の少ない水、すなわち、紫外線吸光度の低い水が好ましい。したがって、浄水処理プロセスに組み込む場合は急速ろ過以降とするのが一般的である。図 6-5 に種々の液体の紫外線透過率の例<sup>19)</sup>を示す。

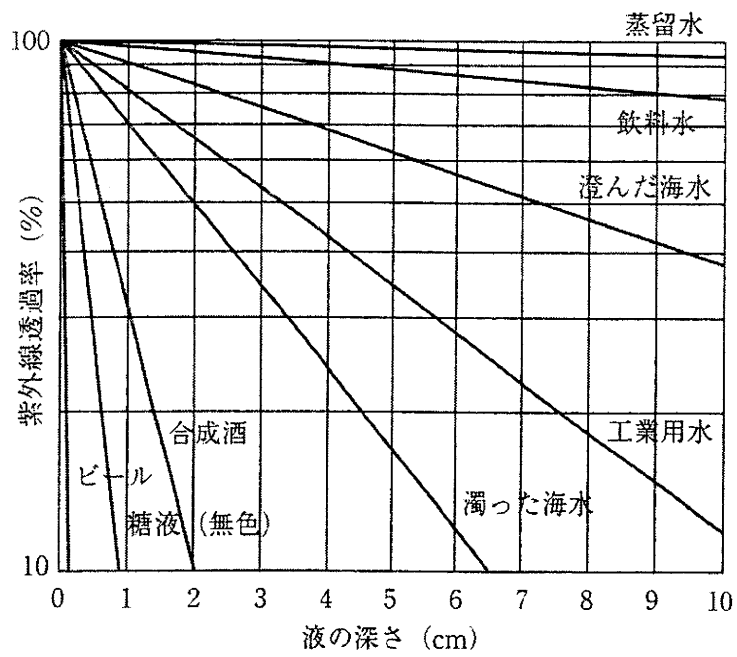


図 6 - 5 種々の液体の紫外線透過率の例<sup>19)</sup>

## 6. 5 紫外線照射の効果と副生成物

### 6. 5. 1 クリプトスポリジウム以外の微生物に対する不活化効果

#### (1) 細菌

表6-2は、様々な細菌（病原細菌を含む。）の90%不活化に必要な照射線量を示したものである。芽胞菌（*Bacillus*）などでは紫外線に対する抵抗性が比較的高いものも見られるが、多くは前述のクリプトスポリジウムと同様に抵抗性は低いと考えられている。病原細菌に注目してみると、サルモネラ症（*Salmonella enteris* など）、チフス菌（*Salmonella typhi*）、赤痢菌（*Shigella dysenteriae*）、ブドウ球菌（*Staphylococcus* など）、コレラ菌（*Vibrio cholerae*）などは紫外線に対して抵抗性が低く、不活化効果が高いことがわかる。

表6-2 紫外線の細菌不活化力<sup>20)</sup>

細菌	90%不活化に必要な線量 (mW·s/cm <sup>2</sup> )	不活化速度 (一次反応) (cm <sup>2</sup> /mW·s)	細菌	90%不活化に必要な線量 (mW·s/cm <sup>2</sup> )	不活化速度 (一次反応) (cm <sup>2</sup> /mW·s)
<i>Aeromonas hydrophila</i>	1.54	1.5	<i>Salmonella pratyphi</i>	3.2	0.72
<i>Bacillus anthracis</i>	4.5	0.51	<i>Salmonella typhi</i>	2.26	1.02
<i>Bacillus anthracis</i> spores	54.5	0.0422	<i>Salmonella typhi</i>	2.1	1.1
<i>Bacillus subtilis</i> spores	12	0.19	<i>Salmonella typhi</i>	2.5	0.92
<i>Campylobacter jejuni</i>	1.05	2.19	<i>Salmonella typhimurium</i>	8	0.29
<i>Clostridium tetani</i>	12	0.19	<i>Shigella dysenteriae</i>	2.2	1.05
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	3.4	0.68	<i>Shigella dysenteriae</i>	00.885	2.6
<i>Escherichia coli</i>	1.33	1.73	<i>Shigella flexneri</i>	1.7	1.4
<i>Escherichia coli</i>	3.2	0.72	<i>Shigella paradysenteriae</i>	1.7	1.4
<i>Escherichia coli</i>	3	0.77	<i>Shigella sonnei</i>	3	0.77
<i>Klebsiella terrigena</i>	2.61	0.882	<i>Staphylococcus aureus</i>	5	0.46
<i>Legionella pneumophila</i>	2.49	0.925	<i>Staphylococcus</i>	4.5	0.51
<i>Legionella pneumophila</i>	1	2.3	<i>Staphylococcus</i>	4.4	0.52
<i>Legionella pneumophila</i>	0.38	6.1	<i>Staphylococcus</i>	2.2	1
<i>Micrococcus radiodurans</i>	20.5	0.112	<i>Vibrio cholerae</i>	0.651	3.54
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	6	0.38	<i>Vibrio cholerae</i>	3.4	0.68
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5.5	0.42	<i>Vibrio comma</i>	6.5	0.35
<i>Salmonella enteris</i>	4	0.58	<i>Yershinia enterocolitica</i>	1.07	2.15
<i>Salmonella enteritidis</i>	4	0.58			

#### (2) ウイルス

表6-3は、様々なウイルス（病原ウイルス含む）の99%及び99.9%不活化に必要な照射線量を示したものである。細菌やクリプトスポリジウムと比べると抵抗性が高いものが多い。それらの不活化を考えると、数十 mJ/cm<sup>2</sup> というエネルギー量が必要であることがわかる。ウイルスは細菌やクリプトスポリジウムに比べ構造をなすタンパク質と封入される遺伝子からなっており、非常に単純な構造をしている。外側タンパクの紫外線吸収が高いためか、遺伝子の損傷が起こりにくい配列をしているのか、なぜウイルスの耐性が高いのか、今後検証する必要があると考えられる。

表 6 - 3 紫外線のウイルス不活化力（必要な線量を[mJ/cm<sup>2</sup>]単位で表示）<sup>20)</sup>

ウイルス種	99 %	99.9 %	実験条件	文献
Adenovirus 2	53	80	蒸留水	Ballester <i>et al.</i> , 2003
Adenovirus 40	60	90	蒸留水	Meng <i>et al.</i> , 1996
	102	153	地下水	Thurston <i>et al.</i> , 2003
Adenovirus 41	47	71	蒸留水	Meng <i>et al.</i> , 1996
	111	167	PBS	Ko <i>et al.</i> , 2003
Carine calicivirus	10	15	?	Husman, 2003
Feline calicivirus	14	21	地下水	Thurston <i>et al.</i> , 2003
	16	24	?	Husman, 2003
Coxsackievirus A - 9	24	36	海水中	Hill <i>et al.</i> , 1970
Coxsackievirus B - 1	31	46	海水中	Hill <i>et al.</i> , 1970
Echovirus 1	22	32	海水中	Hill <i>et al.</i> , 1970
Echovirus 11	24	36	海水中	Hill <i>et al.</i> , 1970
Hepatitis A	7	11	?	Wolfe, 1990
Mouse minute virus	5	7.7	PBS	Anderle, 2003
Porcine parvovirus 5	6.8	PBS	Anderle, 2003	
Poliovirus	15	23	? HOCairn, 1002	
Poliovirus 1	8	12	蒸留水	Meng <i>et al.</i> , 1996
	10	15	?	Wolfe, 1990
	22	32	海水中	Hill <i>et al.</i> , 1970
Poliovirus 2	24	36	海水中	Hill <i>et al.</i> , 1970
Poliovirus 3	21	31	海水中	Hill <i>et al.</i> , 1970
Reovirus 1	31	46	海水中	Hill <i>et al.</i> , 1970
Rotavirus	23	34	?	Cairn, 1992
Rotavirus SA - 11	16	24	?	Wolfe, 1990
MS2	28	42	蒸留水	Meng <i>et al.</i> , 1996
	58	87	BDF	Thurston <i>et al.</i> , 2003
PRD - 1	17	26	蒸留水	Meng <i>et al.</i> , 1996
Q β	41	54	PBS	Kamiko <i>et al.</i> , 1989
φ X174	4	6.7	PBS	Anderle, 2003

### (3) 藻類

湖沼等の水源の保全や浄化を目的として、紫外線消毒の適用が検討・提案されている。ミクロキスティスエルギノーサに関する基礎的な研究例<sup>21)</sup>では、75 mJ/cm<sup>2</sup>の紫外線照射で死滅が観測され、また、37 mJ/cm<sup>2</sup>の紫外線照射した後に7日間培養を継続しても増殖が観察されなかったと報告されている。さらに、紫外線照射によって藻類細胞の浮遊力が消失し沈降性が高まる傾向があったとも報告されている。

このように紫外線処理は殺藻にも有効と考えられ、照射後に残留した細胞の死骸は凝集沈澱等によって容易に沈降分離が可能であり、浄水プロセスへの紫外線消毒の適用が期待される。ただし、実用上は原水の濁度成分等の影響（透過紫外線量の低下など）を考慮する必要がある。

### (4) その他の微生物

その他の微生物については、酵母やカビなどの糸状菌に関する不活化石例を表6-4に示した。糸状菌は細菌と異なり細胞壁を有しているため、一般的には細菌類よりも不活化されにくい傾向がある。

また、線虫や輪虫など活性炭漏出微小生物に対しても紫外線消毒は効果的な不活化が可能である。高度浄水処理実証プラントの活性炭処理水を対象に各種消毒剤による線虫及び輪虫の不活化効果を検討した結果、線虫・輪虫は紫外線照射によって動きが緩慢化し、紫外線照射量を高めると不活化された。線虫・輪虫の動きが緩慢化するため、低線量の紫外線照射であっても後段の砂ろ過において捕捉されやすく、微小生物の除去が可能である<sup>22)</sup>。

表 6 - 4 その他の微生物の紫外線に対する感受性～99.9%不活化に要する照射量～

		253.7 nm 照射量 [mJ/cm <sup>2</sup> ]	文献
酵母類	<i>Pichia miyagi</i>	38.4	23)
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> Untergar. Munchen	18.8	
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	13.2	16)
	<i>Saccharomyces sake</i>	19.6	23)
	<i>Saccharomyces</i> s p .	17.6	16)
	<i>Willia anomala</i>	37.8	23)
	<i>Zygo-Saccharomyces Barkeri</i>	21.1	
	カビ類	<i>Asperigillus flavus</i>	99～120
<i>Asperigillus glaucus</i>		88.2	23)
<i>Aspergillus niger</i>		264～330	16) 23)
<i>Mucor racemosus</i>		35.4	23)
<i>Oospora lactis</i>		10.2	
<i>Penicillim expansum</i>		22.2	
<i>Penicillium digitatum</i>		88.2	
<i>Penicillium roqueforti</i>		26.2～26.4	16) 23)
<i>Phizopus nigricans</i>		222	
線虫	nematoda	232.5 (99%)	24)

### 6. 5. 2 クリプトスポリジウム以外の微生物における光回復

鹿島田ら<sup>18)</sup>は生下水から採取・培養した従属栄養細菌、大腸菌、糞便性大腸菌に波長 254nm の単色紫外線を照射して不活化した後、蛍光灯からの光と太陽光を照射して、これら細菌の光回復について調査・研究している<sup>18),25)</sup>。

その結果として以下の知見を報告している。

- ① 蛍光灯照射により、従属栄養細菌、大腸菌及び糞便性大腸菌は明瞭に光回復を示したが、*E. coli* B と *E. coli* K12 A/λ (F<sup>+</sup>)においては、光回復は認められなかった。
- ② 大腸菌については太陽光によって、回復と不活化とが同時進行することが認められた。
- ③ 蛍光灯及び太陽光による光回復の検討には、代表波長として 360nm の光が適している。
- ④ 光回復速度は飽和型一次反応で近似できる。

光回復の実験データ例を図6-6に示す。

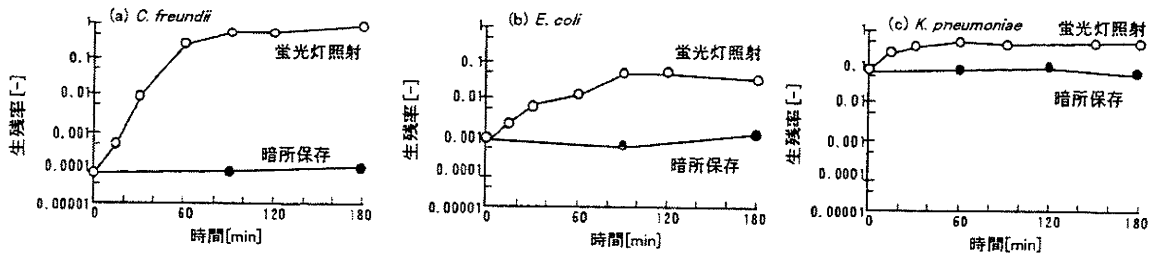


図6-6 各種細菌の光回復による生残率の時間変化<sup>26)</sup>

(不活化のための紫外線照射量：6.16 mJ/cm<sup>2</sup>、光回復のための可視光線線量率：0.15 mW/cm<sup>2</sup>)

ウイルスは、別生物の細胞（宿主細胞）に寄生し、その細胞内の代謝機能をもって増殖するため、生細胞が備えている酵素のほとんどを有していない。したがって、上述のような核酸の修復に必要な酵素も持っていない。ただし、ウイルスの核酸が紫外線によって損傷を受けた場合でも、損傷核酸が寄生先の宿主細胞へ送り込まれた後、その細胞の酵素を使って修復されることも報告されている<sup>27)</sup>。

### 6. 5. 3 消毒副生成物

消毒副生成物は、紫外線照射の対象となる水の中に有機物が含まれると、光のエネルギーを吸収してラジカル反応により、有機物の結合又は分解が起こり生成する。その反応は反応物質と紫外線照射量に影響されるが、いずれも高い濃度の有機物と高いエネルギーの紫外線を必要とする。地下水、ろ過水（粒状活性炭処理水を含む）、浄水について、紫外線処理による消毒副生成物の濃度上昇はほとんど見られず、実際の浄水水質や消毒に使用される紫外線量では消毒副生成物はほとんど生成しない<sup>28) 29) 30) 31) 32) 33) 34)</sup>。

また変異原性については、浄水及び下水二次処理水に紫外線を照射した場合、のりの生育試験やメダカの急性毒性試験を含み変異原性の増加は認められていない<sup>23) 33) 34) 35)</sup>。

## 6. 6 紫外線照射装置 JWRC 技術審査基準と適合認定

### (1) 技術審査基準

厚生労働省は「水道施設の技術的基準を定める省令」の一部改正を行い、クリプトスポリジウム等の耐塩素性病原生物対策として「紫外線処理」を位置づけ、この改正省令は平成19年4月1日から施行されるとともに、新たに、「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」をとりまとめ、同日から適用された。

今後、水道事業者が紫外線処理設備の導入を検討するに当たっては、厚生労働省令で示されている「紫外線処理設備が備えるべき要件」の具体的な判断基準の検討・作成等に向けて、紫外線処理に関する技術的な情報等の知見の集積や各社が有する紫外線処理設備の技術な評価等が必要であると考えられる。

そこで、水道技術研究センターでは、学識経験者等で構成する検討委員会（委員長大垣眞一郎 東京大学大学院教授）を立ち上げ具体的な判断基準等について検討し、その成果として、耐塩素性病原生物対策としての紫外線ランプによる紫外線照射装置に係わる技術審査基準及び試験方法等についてとりまとめ、「紫外線照射装置 JWRC 技術審査基準（低圧紫外線ランプ編）」及び「紫外線照射装置 JWRC 技術審査基準（中圧紫外線ランプ編）」を制定した。

制定された技術審査基準は、①ランプの能力、②照射性能、③モニタリング性能、④浸出性、⑤耐圧性、⑥その他の性能から構成されている。

### (2) 適合認定

水道技術研究センターでは紫外線照射装置の性能及び品質等の適正化を図り、一定水準以上の紫外線照射装置の水道事業者等への供給及び紫外線処理技術の浄水施設への円滑かつ適切な導入の促進に資することを目的に、上記技術審査基準に基づきメーカー等からの依頼により紫外線照射装置に関する適合審査を実施している。



## 参考文献

- 1) Wilson, B.R., P. F. Rossler, E. Van Dellen, M. Abbaszadegan, and C. P. Gerba. Coliphage MS-2 as a UV water disinfection efficacy test surrogate for bacterial and viral pathogens. pp.219-235. Proceedings of the water quality technology conference, Nov.15-19, Toronto. 1992.
- 2) Chang, J. C. H., S. F. Osoff, D. C. Lobe, M. H. Dorfman, C. M. Dumais, R. G. Qualls and J. D. Johnson. UV inactivation of pathogenic and indicator microorganisms. Applied and Environmental Microbiology 49, No.6, pp.1361-1365. 1985.
- 3) Ransom, M. E. ,T. N. Whitmore, and E. G. Carrington. Effects of Disinfectants on Viability of *Cryptosporidium parvum* Oocysts, Water Supply (Amsterdam) , 11:103-117,1993.
- 4) Campbell, A. T., L. J. Robertson, M. R. Snowball and H. V. Smith. Inactivation of Oocysts of *Cryptosporidium parvum* by Ultraviolet Irradiation, Water Res. Vol.29 p.2583 1995.
- 5) Shin, Linden, Arrowood, and Sobsey, Low-pressure UV Inactivation and Subsequent DNA Repair Potential of *Cryptosporidium parvum* Oocysts, *Appl. & Envir. Microbiol.* Vol.67 No.7 p.3029, 2001
- 6) Clancy, J. L., Z. Bukhari, T. M. Hargy, J. R. Bolton, B. W. Dussert and M. M. Marshall. Using UV to Inactivate *Cryptosporidium*. Journal of the American Water Works Association 92, No.9, pp.97-104. 2000.
- 7) Mackey, Hargy, Wright, Malley Jr., and Cushing, Comparing *Cryptosporidium* and MS-2 Bioassays – Implications for Comparing UV Reactor Validation, *Jour.AWWA*, Vol.94 No.2 p.62 2002
- 8) Modifi, Baribeau, Rochell, Leon, Coffey, and Green, Disinfection of *Cryptosporidium parvum* with Polychromatic UV Light, *Jour.AWWA*, Vol.93 No.6 p.95 ,2001
- 9) Hargy et al., Shedding UV Light on the *Cryptosporidium* threat, Proc. Small Drinking Water & Wastewater Systems Conf., Phoenix, Ariz., 2000
- 10) Bukhari, Hargy, Bolton, Dussert, and Clancy, Medium-pressure UV Light for Oocyst Inactivation, *Jour. AWWA*, Vol.91 No.3 p.86, 1999
- 11) Morita, S., Nakanishi, A., Motoyama, N., Morioka, T. and Hirata, T. Efficacy of ultraviolet irradiation in inactivating *Cryptosporidium parvum* oocysts. Applied and Environmental Microbiology Vol.68, No.11, pp.5387-5393, 2002.
- 12) S. A. Craik, D. Weldon, G. R. Finch, J. R. Bolton, M. Belosevic. Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts using medium-and low-pressure ultraviolet radiation. Water Research, Vol. 35, No.6, pp.1387-1398. 2001.
- 13) World Health Organization, Guidelines for Drinking-water Quality. Vol.1: 3<sup>rd</sup>., 2004.
- 14) (財) 水道技術研究センター, 第 20 回海外水道技術視察調査団収集資料, 2008
- 15) (財) 水道技術研究センター, 水道ホットニュース, 第 116 号, 2008
- 16) 安藤茂, 佐藤邦夫, 田畑伸一, 紫外線による下水・排水の消毒, 用水と廃水, Vol.36, No.7, 1994.
- 17) ULTRAVIOLET DSINFECTATION GUIDANCE MANUAL, EPA815-D-03-007, June 2003 Draft
- 18) 鹿島田、大瀧、山本、大垣、「紫外線消毒における光回復」、用水と廃水、Vo.38, No.5, pp.359-364,1996
- 19) 日本水道協会水道技術総合研究所、「紫外線消毒処理の原理と実用化 ( I )」、水道協会雑誌、第 73 巻 第 5 号 ( 第 836 号 ) p.9, 2004

- 20) 平田強編,「紫外線照射 -水の消毒への適用性-」技報堂出版, 2008年3月
- 21) Z. B. Alam, M. Otaki, H. Furumai and S. Ohgaki, Direct and indirect inactivation of *Mycrocystis aeruginosa* by UV-radiation. *Wat. Res.*, 35(4), pp.1008-1014, 2001
- 22) 財団法人水道技術研究センター, 高効率浄水技術開発研究 (ACT21)「代替消毒剤の実用化に関するマニュアル」, 技術レポート No.41, 2002.
- 23) 日本下水道事業団技術開発部編,「最近の消毒技術の評価に関する報告書」, 1997
- 24) N. Matsumoto, T. Aizawa, S. Ohgaki, T. Hirata, K. Toyooka, T. Kanbayashi, Y. Tsutsumi, T. Hasegawa. Removal Methods of Nematoda contained in the effluent of activated carbon. 2001 World Water Congress of Int. Wat. Assoc., in press, 2001.
- 25) Kashimada, Kamiko, Yamamoto, and Ohgaki, "Assessment of photoreactivation following ultraviolet light disinfection" *Wat.Sci.Tech.* Vol.33 No.10-11, pp261-269,1996
- 26) 安藤、佐藤、田畑、「紫外線による下水・排水の消毒-その2 消毒の理論」、用水と廃水、Vol.36 No.7 p29-30, 1994
- 27) Rauth, "The physical state of viral nucleic acid and the sensitivity of viruses to ultraviolet light" *Biophysical Journal*, Vol.5 pp.257-273,1965
- 28) Malley, J.P., J.P. Shaw, and J.R. Ropp. Evaluation of by-products produced by treatment of groundwaters with ultraviolet irradiation. Denver, CO.: AWWA Research Foundation. 1995.
- 29) Zheng, M.S.A. Andrews, and J.R. Bolton. Impacts of medium pressure UV on THM and HAA formation in pre-UV chlorinated drinking water. Water Quality Technology Conference, October 31-November 3, Tampa, FL. 1999.
- 30) Kashinkunti, R., K. G. Linden, G. Shin, D. H. Metz, M. D. Sobsey, M. Moran and A. Samuelson. Achieving multi-barrier inactivation in Cincinnati: UV, byproducts, and biostability. *Journal of the American Water Works Association*. Submitted January 9, 2003.
- 31) Akhlaq, M. S., H. P. Schuchmann and C. von Sonntag. Degradation of the polysaccharide alginic acid: a comparison of the effects of the UV light and ozone. *Environmental Science and Technology* 24: pp.379-383. 1990.
- 32) Kruithof, J. C., R. C. van der Leer, W. A. M. Hijnen, P. A. N. M. Nuhn, F. A. P. Houtepen. and L. A. C. Feij. Ultra violet disinfection of carbon filtered drinking water. *Ozon+UV in the treatment of water and other liquids*. Edited by W. J. Masschelein. III 3.1-III 3.15. Berlin. 1989.
- 33) J. C. Kruithof, R. Chr. Van der Leer and W. A. M. Hijnen. Practical experiences with UV disinfection in the Netherland. *J. Water SRT-Aqua* Vol.41, No.2, pp.88-94. 1992.
- 34) Mic H. Stewart, Cordelia J Hwang, Patric A. Hacker, Richard S. Yates, Roy L. Wolf. Microbial and chemical implications of using ultraviolet irradiation for treatment of biological filter effluent, *Proc. AWWA Water Qual. Technol. Conf.*, 1993 (pt.2), pp.1313-1339. 1993.
- 35) 安藤茂, 城村幹彦, 下水処理水の紫外線消毒, 用水と廃水 Vol.38, No.4, pp.38-44. 1996.

## 索 引

<p style="text-align: center;">&lt;あ&gt;</p> <p>暗回復-----8</p> <p>安定器-----20</p> <p>ウイルス-----5,63</p> <p>塩素-----2,3</p> <p>温度計-----22</p> <p style="text-align: center;">&lt;か&gt;</p> <p>外照式-----11</p> <p>開水路型-----11</p> <p>核酸-----5,8</p> <p>管路型-----11</p> <p>クリプトスポリジウム-----6,24</p> <p>計画処理水量-----25</p> <p>硬度-----25,34</p> <p style="text-align: center;">&lt;さ&gt;</p> <p>細菌-----63</p> <p>ジアルジア-----24</p> <p>紫外線-----4</p> <p>紫外線照射装置-----11,26</p> <p>紫外線照射槽-----13</p> <p>紫外線ランプ-----4,14,31</p> <p>紫外線照射量-----24,58</p> <p>紫外線強度-----24,38,58</p> <p>紫外線強度計-----18,32</p> <p>紫外線透過率-----24,34,61</p> <p>紫外線吸光度-----24,34</p> <p>色度-----24,34</p> <p>湿度-----27,34</p> <p>自動洗浄装置-----22</p>	<p>消毒副生成物-----66</p> <p>水温-----22,38</p> <p>水銀-----14</p> <p>水質-----24,34</p> <p>藻類-----64</p> <p style="text-align: center;">&lt;た&gt;</p> <p>濁度-----24,34</p> <p>鉄分-----24,34</p> <p style="text-align: center;">&lt;な&gt;</p> <p>内照式-----11</p> <p style="text-align: center;">&lt;は&gt;</p> <p>廃棄-----40</p> <p>波長-----4,14</p> <p>光回復-----8,65</p> <p>微生物-----63,64</p> <p>ファウリング-----18</p> <p>不活化-----5,63</p> <p>付属制御盤-----21</p> <p style="text-align: center;">&lt;ま&gt;</p> <p>マンガン-----24,34</p> <p style="text-align: center;">&lt;ら&gt;</p> <p>ランプスリーブ-----17,33</p> <p>漏水-----37</p>
---	---

厚生労働科学研究費補助金による  
「健康リスク低減のための新たな浄水プロセスに関する研究」  
紫外線処理ワーキンググループ名簿  
(平成 21 年 3 月現在)

研究代表者	藤原 正弘	(水道技術研究センター)
研究分担者	安藤 茂	(水道技術研究センター)
	鈴木 泰博	(水道技術研究センター)
研究協力者	浅見 真理	(国立保健医療科学院)
	大瀧 雅寛	(お茶の水女子大学)
	神子 直之	(立命館大学)
	川崎 勇次	(八戸圏域水道企業団)
	小林 紀人	(神奈川県企業庁)
	藤岡 一人	(熊本市水道局※)
	岩崎 達行	(日本紫外線水処理技術協会)
	府中 裕一	(日本紫外線水処理技術協会)
	山越 裕司	(日本紫外線水処理技術協会)
	高嶋 渉	(水道技術研究センター)
	三井 康弘	(水道技術研究センター)
	原 敬一	(水道技術研究センター)

※平成 21 年 4 月より熊本市上下水道局

## 2. 3 紫外線照射試験結果（その1）

## 1. 目的

紫外線照射による副生成物生成の有無を確認することを目的とする。

## 2. 試験内容

### (1) 試験条件

試験条件は表 1 に示したとおりである。試験水の条件は 2 条件とし、条件 1 はトリハロメタンとアルデヒド、条件 2 は臭素酸及び亜硝酸態窒素の生成を確認するための条件である。紫外線照射は低圧及び中圧の 2 種類のランプを用い、それぞれ 1,000 mJ/cm<sup>2</sup>、10,000 mJ/cm<sup>2</sup>照射した。なお、照射方式は試水循環式で、試験水の温度は 20℃にコントロールした。

表 1 試験条件

項 目	条 件
試験方法	循環照射式
紫外線ランプ	低圧、中圧
照射量	0mJ/cm <sup>2</sup> 、1,000mJ/cm <sup>2</sup> 、10,000mJ/cm <sup>2</sup>
照射温度	20℃
試験水	条件 1 : 残留塩素 : 2 mg/L、臭化物イオン : 1mg/L、 TOC : 2 mg/L、pH : 7.0 条件 2 : 残留塩素 : 2 mg/L、臭化物イオン : 1mg/L、 TOC : 0 mg/L、硝酸態窒素 : 10mg/L、pH : 7.0

(注) 精製水に各物質を添加して調整した。

### (2) 水質分析項目

紫外線照射前、照射後の試料について、表 2 に示す水質項目を分析した。なお、分析方法は水道試験法に準拠した。トリハロメタン、臭素酸、塩素酸およびアルデヒド類の分析試料は照射終了後直ちに残留塩素を消去して分析に供した。

表 2 水質分析項目

水質項目	条件 1	条件 2
硝酸態窒素	—	○
亜硝酸態窒素	—	○
総トリハロメタン	○	—
クロロホルム	○	—
ジブロモクロロメタン	○	—
ブロモジクロロメタン	○	—
プロモホルム	○	—
臭素酸	○	○
TOC	○	○
残留塩素	○	○
塩素酸	○	○
アセトアルデヒド	○	—
ホルムアルデヒド	○	—

### 3. 試験方法

#### (1) 試薬

炭酸水素ナトリウム、臭化カリウムおよび硝酸ナトリウムは和光純薬 試薬特級を用いた。タンニン酸は和光純薬 化学用を使用した。次亜塩素酸ナトリウムは和光純薬 食品添加物（有効塩素濃度：13%）を精製水で希釈して用いた。その他の試薬も試薬特級を使用した。

#### (2) 試験水の調製

試験水の組成を表 3 に示す。条件 1 の TOC はタンニン酸により調整した。TOC を 2.0 mg/L にするためのタンニン酸濃度は 3.7 mg/L である。試験水は次亜塩素酸ナトリウム以外のすべての試薬を添加した後、0.01 M 硫酸で pH を調整してから定容した。次亜塩素酸ナトリウム希釈液を添加した後、再度 pH を調整し、塩素添加の 30 分後に紫外線照射を開始した。

表 3 試験水の組成

組成		条件 1	条件 2	備考
炭酸水素ナトリウム	mM	2.0	2.0	
タンニン酸	mg/L	3.7	—	TOC:2.0mg/L (条件 1 のみ)
臭化カリウム	mg/L	1.49	1.49	臭化物イオン：1 mg/L
硝酸ナトリウム	mg/L	—	60.7	硝酸態窒素：10 mg/L (条件 2 のみ)
塩素注入率	mg/L	12.0	2.0	残留塩素：2 mg/L
pH	—	7.0±0.2	7.0±0.2	0.01 M 硫酸で調整

(3) 塩素注入率の決定

本照射試験の塩素注入率は塩素添加 5 時間後（対照試験の最長反応時間）の遊離残留塩素が 2 mg/L になる条件に設定した。塩素注入率を決定するため、各試験水に所定量の次亜塩素酸ナトリウム希釈液を添加し、30 分後、5 時間後の遊離残留塩素を測定した。結果を表 4 に示す。この結果から、塩素注入率は条件 1 が 12.0 mg/L、条件 2 が 2.0 mg/L とした。なお、次亜塩素酸ナトリウム希釈液の遊離残留塩素はヨウ素滴定で、試験水の遊離残留塩素は DPD 法で測定した。

表 4 塩素注入率の決定

塩素 注入率 (mg/L)	条件 1		塩素 注入率 (mg/L)	条件 2	
	残留塩素濃度(mg/L)			残留塩素濃度(mg/L)	
	30 分後	5 時間後		30 分後	5 時間後
5.0	0	0.0	2.0	1.9	1.8
10.0	1.4	0.0	3.0	2.8	2.6
11.0	1.8	0.6	4.0	4.0	3.6
12.0	3.0	1.9	-	-	-
13.0	4.0	2.5	-	-	-



#### (4) 紫外線照射装置

紫外線照射装置の主な仕様を表5に、低圧照射装置の概要を図1に、中圧照射装置の概要を図2に示す。紫外線照射は「紫外線照射が水道水質に与える影響に係る調査のためのJWRC被照射液調製方法（財）水道技術研究センター」に準拠して実施した。

照射装置の紫外線強度は事前の換算紫外線照射量（RED）試験により求めた。詳細は次項に記す。なお、紫外線ランプは30分間以上点灯して安定した後に照射試験を開始した。また、試験中の試験水はすべて褐色瓶に入れて恒温水槽に浸漬し、水温を20℃に保持した。

表5 照射試験の仕様

仕様	低圧紫外線水銀ランプ	中圧紫外線水銀ランプ
ランプ	50 W、発光長 425 mm	2,200 W、発光長 220 mm
照射管	合成石英製、内径 22 mm×長さ 350 mm×2 本 ランプと照射管の距離 30 mm	合成石英製、内径 22 mm×長さ 200 mm×1 本 ランプと照射管の距離 260 mm
紫外線強度	約 4.4 mW/cm <sup>2</sup>	約 24.8 mW/cm <sup>2</sup>
試験水の容量	2.0 L	2.0 L
循環水量	6.7 L/min	6.7 L/min

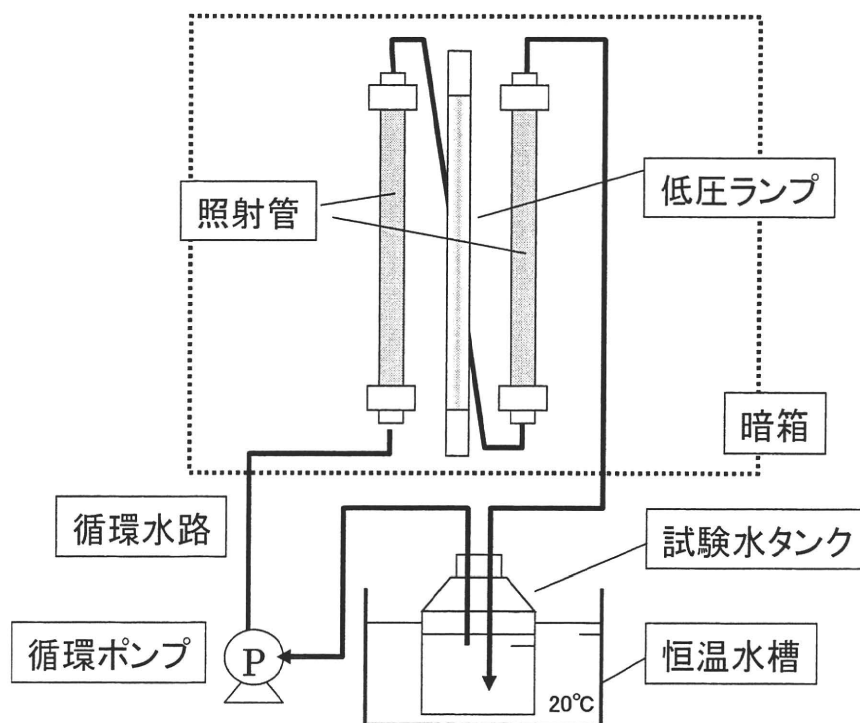


図1 低圧照射装置の概要

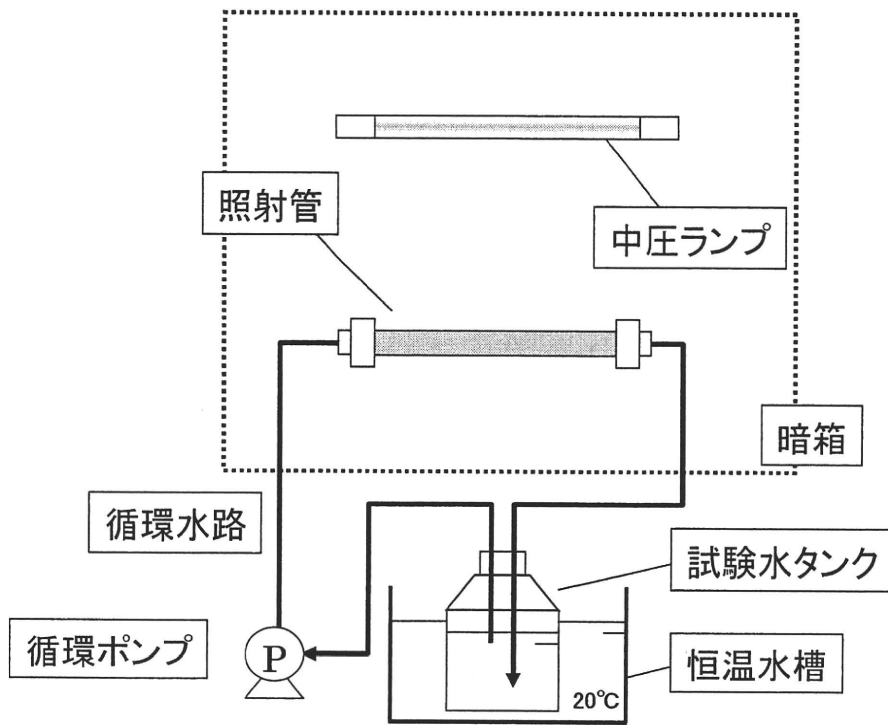


図 2 中圧照射装置の概要

#### (5) 紫外線強度

装置の紫外線強度は「紫外線照射が水道水質に与える影響に係る調査のための JWRC 被照射液調製方法（（財）水道技術研究センター）」に準拠し、換算紫外線照射量（RED）試験により求めた。

RED 試験は「紫外線照射装置 JWRC 技術審査基準（中圧紫外線ランプ編）（（財）水道技術研究センター）」に準拠して実施した。

RED 試験は低圧 20.0 L、中圧 19.5 L の MS2 フェージ液に所定時間紫外線照射した後、フェージ生残率を求め、式 1 により RED[MS2] を算出した。ここでは、MS2 フェージの不活化速度定数 ( $D_0$ ) を 9.4 (実測値) とした。なお、MS2 フェージ液は水道水にチオ硫酸ナトリウム (最終濃度 10 mg/L) を添加して残留塩素を消去した後にフェージを加えて調製した。本フェージ液の紫外線透過率 (10 mm セル) は 220 nm で 37.9 %、254 nm で 96.0 % である。

図 3 に紫外線照射時間と RED[MS2] の関係を示す。各装置の 1 分間照射時の RED (近似式の傾き) を式 2 に代入し、紫外線強度を算出した。照射装置の紫外線強度は低圧が 4.4 mW/cm<sup>2</sup>、中圧が 24.8 mW/cm<sup>2</sup> である。

$$RED \text{ (mJ/cm}^2\text{)} = -D_0 \ln(S_0) \quad (\text{式 1})$$

ここで、 $D_0$  は MS2 フェージの不活化速度定数、 $S_0$  は MS2 フェージの生残率である。

$$I \text{ (mW/cm}^2\text{)} = (J \times V) / (t \times V_R) \quad (\text{式 2})$$

$$\text{低圧: } I \text{ (mW/cm}^2\text{)} = (3.48 \times 20.0 \times 1000) / (1 \times 60 \times \pi (2.2/2)^2 \times 35 \times 2) = 4.4$$

$$\text{中圧: } I \text{ (mW/cm}^2\text{)} = (5.81 \times 19.5 \times 1000) / (1 \times 60 \times \pi (2.2/2)^2 \times 20) = 24.8$$

ここで、 $I$  は紫外線強度 (mW/cm<sup>2</sup>)、 $J$  は紫外線照射量 (RED 値、mJ/cm<sup>2</sup>)、 $V$  は試験対象水量 (mL)、 $t$  は照射時間 (秒) そして  $V_R$  は照射管容積 (mL) である。

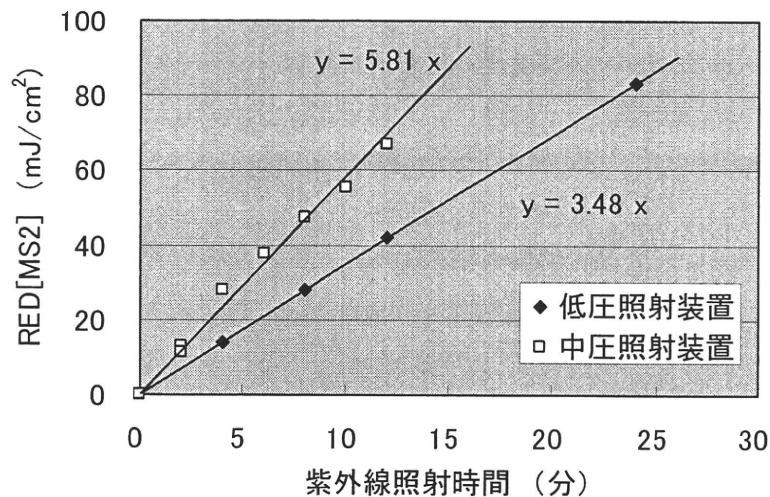


図3 各照射装置における紫外線照射時間と換算紫外線照射量 RED[MS2]の関係  
 ※ 試験水量は低圧 20L、中圧 19.5L の結果である。

(6) 照射条件

各試験条件の紫外線照射前後における紫外線透過率（10mm セル、254 nm）を表 6 に示す。なお、紫外線透過率は石英ガラス製 10mm セルを使用し、超純水をブランクとして測定した。

条件 1 の紫外線透過率は紫外線照射前が 80.8%であったが、1,000mJ/cm<sup>2</sup>照射後は低圧、中圧ともに 10%以上増加した。また、条件 2 の紫外線透過率は安定して高かった。そのため、ここでは紫外線透過率を考慮した照射時間の補正は行わないことにした。

表 7 に照射条件を示す。紫外線強度 I は低圧が 4.4 mW/cm<sup>2</sup>、中圧が 24.8 mW/cm<sup>2</sup>であり、試験時の試験水量 V は 2L、必要紫外線照射量は 1,000 mJ/cm<sup>2</sup> および 10,000 mJ/cm<sup>2</sup> の 2通りである。これらの値を式 3 に代入し、照射時間 t を求めた。

$$\begin{aligned}
 t \quad (\text{min}) &= J / (I \times (V_R / V)) && \text{(式 3)} \\
 &= (J \times V) / (I \times V_R)
 \end{aligned}$$

なお、本試験では、試験水に紫外線を照射しないで循環攪拌する対照試験を実施した。対照試験の反応時間は低圧ランプで 1,000 mJ/cm<sup>2</sup>、10,000 mJ/cm<sup>2</sup>照射する場合と同じ時間に設定した。各条件における反応時間は表 8 に示す。試験中の試験水はすべて褐色瓶に入れて恒温水槽に浸漬し、水温を 20℃に保持した。