

4. 2. 6	長期停止時の留意点	34
4. 2. 7	湿度対策	34
4. 2. 8	寒冷地での対策	34
4. 2. 9	水質管理	34
4. 3	定期点検	35
4. 4	異常時の対応	37
4. 4. 1	漏水異常	37
4. 4. 2	紫外線強度低下	38
4. 4. 3	水温異常	38
4. 4. 4	その他	39
4. 5	予備品	39
4. 6	紫外線ランプの廃棄及び回収	40
4. 7	安全管理	40
5.	事例紹介	43
5. 1	八戸圏域水道企業団 蟹沢浄水場	43
5. 2	熊本市水道局 亀井水源地	46
5. 3	熊本市水道局 一本木水源地	49
6.	参考資料	52
6. 1	紫外線消毒の歴史	52
6. 2	海外における導入状況	54
6. 2. 1	セイモア・キャピラノ浄水場	54
6. 2. 2	シダー浄水場	55
6. 3	日本における導入状況	56
6. 4	紫外線照射量	58
6. 4. 1	紫外線のエネルギー	58
6. 4. 2	紫外線ランプ出力、紫外線強度、紫外線照射量	58
6. 4. 3	紫外線の伝搬	60
6. 5	紫外線照射の効果と副生成物	63
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	63
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	65
6. 5. 3	消毒副生成物	66
6. 6	紫外線照射装置 JWRC 技術審査基準と適合認定	67
	索引	70
	「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	71

## 1. 基本的事項

### 1. 1 本書の目的

我が国の水道においては、平成 8 年に「水道におけるクリプトスポリジウム暫定対策指針」、平成 12 年に「水道施設の技術的基準を定める省令」が制定され、原水に耐塩素性病原生物が混入するおそれがある場合には、ろ過等の設備を設け、ろ過水濁度を 0.1 度以下に維持することとされてきた。

厚生労働省は、近年、紫外線処理によるクリプトスポリジウム及びジアルジア（以下、「クリプトスポリジウム等」という。）の不活化の有効性に関する知見が得られてきていること、ろ過と比べ簡便な手法として導入が可能であると考えられること等から、地表水以外の原水を対象に、紫外線処理を耐塩素性病原生物対策として位置づけ、「水道施設の技術的基準を定める省令」の一部改正するとともに、「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」（以下、「対策指針」という。）を策定し、平成 19 年 4 月 1 日より施行している<sup>1)</sup>。

厚生労働省の調査によると、平成 19 年度末時点で、クリプトスポリジウム等による汚染のおそれがある浄水施設は 6,872 施設であり、このうち 3,267 施設では予防対策について検討中である<sup>2)</sup>。これら検討中の施設は簡易水道等の小規模水道事業者によるものが多数を占めている。

一方、(財)水道技術研究センターの調査によると、紫外線処理設備は、上記対策指針が施行されてから約 2 年後の平成 20 年度末時点で、浄水場排水処理への適用事例を含めて 19 件導入されている<sup>3)</sup>。紫外線処理は既存の浄水施設にも比較的容易な方法で導入が可能であるため、今後急速に普及していくことが見込まれている。

水道の使命は「安全で良質な水を安定的に供給すること」であり、そのためにも設備の原理や構造を理解し、適切に運転、維持管理を行わなければならない。紫外線処理設備の運転、維持管理については対策指針において基本事項が示されているが、水道における導入事例が少ないこともあり、水道事業体の実務担当者を対象に、より具体的に運転操作や保守点検の運用の指針を示すマニュアルが求められている。

このため、本書は、地表水以外の水を原水とする紫外線処理設備の維持管理に関して、現時点の最新の情報や知見をとりまとめ、適切な維持管理の指針、あるいは導入検討時の参考資料となることを目的として作成されたものである。

## 1. 2 紫外線による不活化の特徴

塩素、二酸化塩素、オゾンなどの病原微生物を不活化するために必要な化学物質を加える方法と比較して、紫外線照射による不活化の最大の特徴は、紫外域の光エネルギーを微生物に加えることにあり、したがって、添加物の残留がなく、また、添加物による反応によって生じる副次的な生成物が非常に少ないという点にある。特に塩素添加の際に生じる可能性の高いトリハロメタン類、ハロ酢酸類や、オゾン処理の際に注意を要する臭素酸といった有害な副生成物に関して生成ポテンシャルが非常に小さいという特徴は大きな魅力である。

以下に紫外線による不活化の特徴を列挙する。

- ① 薬品などの物質を添加しないので、残留物が生じない。また、副生成物を生じる可能性が小さい。過剰に照射した場合の影響が少ない。pH の影響をほとんど受けない。
- ② 装置によっては短時間の紫外線照射で効果を得ることが可能である。通常の装置では照射時間は数秒である。したがって、設備をコンパクトにすることができる。
- ③ クリプトスポリジウム等は、少ない照射量でも効果的に不活化することが可能である。
- ④ 対象微生物の核酸を損傷することにより不活化する。
- ⑤ 紫外線照射後の微生物（特に細菌類）については、条件によって回復現象がみられる。特に1. 4. 3項で述べるように、近紫外を含む可視光照射によって、損傷が修復され、感染性が回復するおそれがある。クリプトスポリジウム、ジアルジアについては、感染性が回復する現象は見られないことが分かっている4), 5), 6)。

紫外線による不活化には以上のような特徴がある。海外においては浄水処理への適用に関して多くの実績があり、その効果は高いことが実証されているが、我が国においては浄水処理への適用例はまだ少なく、設置方法及び維持管理方法といった実用的な側面についての知見の積み重ねが必要である。

表1-1に塩素処理をはじめとする他の方法との特徴の比較を示す。

紫外線照射における副生成物については、6. 5. 3項で述べる。

表 1 - 1 紫外線処理と他の消毒方法との特徴比較 (参考文献<sup>7)</sup>より作成)

特徴比較項目	紫外線処理	塩素消毒	二酸化塩素消毒	クロラミン消毒	オゾン処理
残留効果	なし	あり	あり(残留性は塩素より高い)	あり(残留性は塩素よりやや高い)	30~40分で消失
不活化機構	紫外線吸収による核酸(DNA)の損傷	細胞膜損傷による細胞成分の漏出。細胞膜機能への直接作用。酵素の失活。ウイルスに対しては核酸の損傷	酵素の失活。ウイルスに対しては外被蛋白への致死的障害	基本的には塩素消毒と同じ	細胞膜の損傷による細胞成分の漏出。核酸の損傷
適正 pH 値	pH の影響はない	中性以下、pH7 に比べて pH9 では 10~20 倍、pH10 では約 60 倍の接触時間が必要	pH6~10 で効果変わらず、pH8.5 では塩素より効果大	中性域、pH が高い場合、塩素消毒ほどではないが効果が減少する	pH6~8.5 では、効果は変わらず
クリプトスポリウム等の不活化効果	効果的	ほとんど効果なし	塩素よりは効果的。オゾン併用により効果増	塩素と同様効果なし	注入率を増すことにより効果増。二酸化塩素併用により効果増
異臭味除去効果	藻臭には「効果あり」とされるが、その他の臭気には効果なし	植物性臭、魚臭腐敗臭、下水臭などに効果あり	塩素より効果的	効果は小さい。モノクロラミンは逆に異臭味を付加	ほとんどの臭気に効果がある。かび臭に対しては粒状活性炭との併用により更に効果的
鉄・マンガンの酸化	効果なし	効果あり	塩素より効果大、オゾンと同等	ほとんど効果なし	無機性、有機性を問わず効果大
他プロセスとの併用の必要性	最終消毒として塩素消毒を併用する必要あり	単独で適用可能	最終消毒として塩素消毒を併用する必要あり	単独で適用可能	粒状活性炭と組み合わせ、最終消毒として塩素消毒が必要
クリプト不活化に要する CT 値	1~10	1,600	70~115	—	2

注 1) 上表最下欄に示す CT 値は  $2\log_{10}$  (99%)不活化率に必要な値(マウス感染試験値)

注 2) 上表最下欄に示す CT 値の単位は紫外線処理については  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、他は  $\text{mg}\cdot\text{min}/\text{L}$

注 3) 紫外線処理では  $10\text{mJ}/\text{cm}^2$  の照射量で  $3\log_{10}$  (99.9%)不活化可能とする文献<sup>8)</sup>有

### 1. 3 紫外線とは

紫外線は、その波長が可視光とX線との間、すなわち 100~400nm の範囲にある電磁波の1種であり、図1-1に示すように波長領域に応じて、さらに真空 UV(波長 100~200nm)、UV-C(波長 200~280nm)、UV-B(波長 280~315nm)、UV-A(波長 315~400nm)に分けられる。

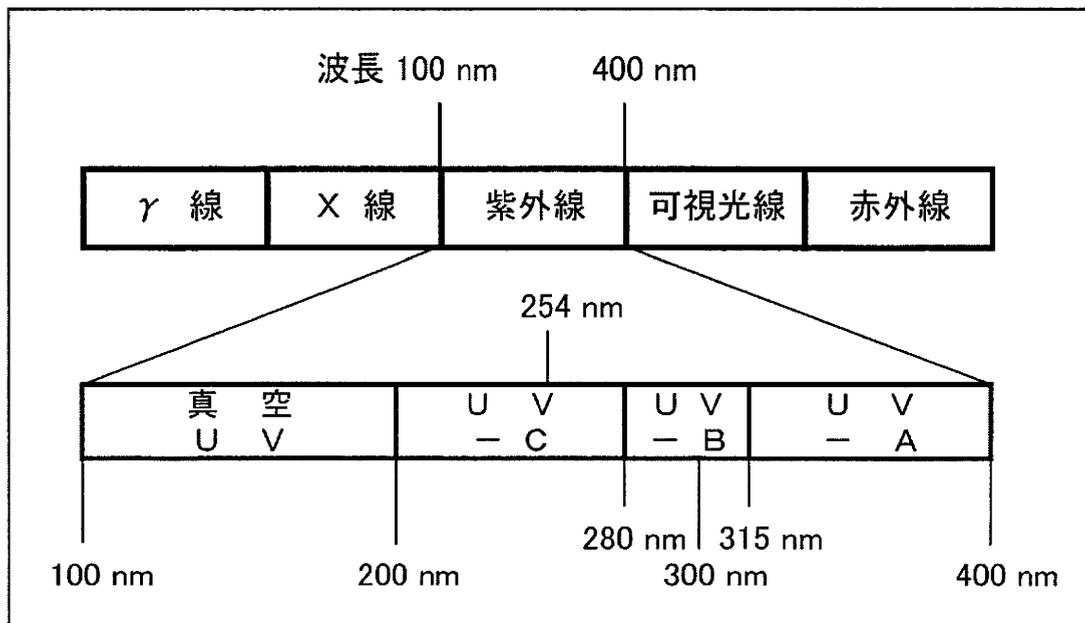


図1-1 電磁波と紫外線<sup>9)</sup>

真空 UV は不活化に非常に効果的であるが、水層では水に吸収されて急激に減衰するため、水処理には不向きである。一方、可視光線に近い波長領域の UV-A は波長が UV-C や UV-B に比べて長く光子当たりのエネルギーが少ない。そのため核酸に吸収されてダメージを与えるほどのエネルギーではないため、不活化効果は低い。したがって水処理における不活化目的としては、波長 200~300 nm の範囲のもの、すなわち UV-C と UV-B が、有効で実用的な紫外線ということになる。

紫外線は、混合ガスに電圧を加え光子を放出させることによって発生させる。発生する光の波長は、混合ガスの元素組成や封入圧力に依存するが、水処理用のほぼ全ての紫外線ランプは水銀蒸気を含む混合ガスを使用している。ランプ点灯時の水銀蒸気圧が 1~10 Pa 程度の低圧紫外線ランプと、40~400 KPa 程度の中圧紫外線ランプに分けられる。低圧紫外線ランプは主に波長 184.9 nm と 253.7 nm の紫外線が発生する。ただし、通常使用される低圧紫外線ランプの場合、ランプ管によって波長 184.9 nm の紫外光が吸収されるため、紫外域においては 253.7nm 光が照射エネルギーのほとんどを占めることになる。中圧紫外線ランプでは広範囲にわたるスペクトル光が発生する。

## 1. 4 紫外線による不活化の機構

### 1. 4. 1 不活化機構

塩素、二酸化塩素、クロラミン、オゾンなどによる微生物の不活化の機構は、細胞膜の損壊による細胞成分の漏出、生体反応に関わる酵素の失活が主であるとされるのに対して、紫外線照射による不活化は核酸（DNA(デオキシリボ核酸)もしくはRNA(リボ核酸))の損傷によるものとされている<sup>8),10)</sup>。

DNA中の塩基紫外域における吸光スペクトルは図1-2に示すように波長260nmと波長200nm付近にピークを、波長230nm付近に極小値を示し、波長300nm以上の紫外線はほとんど吸収しない。

紫外線ランプから照射される260nm付近の紫外光がDNA中の隣り合う塩基(特にチミン)に吸収されると、二量体となる。二量体が生じると遺伝子の複製ができない状態、すなわち増殖能力が失われ、病原微生物の場合、その感染能力を失う。

図1-3に一般的な不活化効果曲線を示す<sup>12)</sup>。260nm付近の紫外光が最も効率がよいことがわかる。図1-4にウイルスの一種である大腸菌ファージMS2とクリプトスポリジウムに対する各波長光の持つ不活化能力を示す。どちらの微生物に対しても、260nm付近の紫外光が有効に働くことが分かる。ウイルスであるMS2の場合、210nmの短波長光において不活化能力が高いが、クリプトスポリジウムに関しては高くない。これは、ウイルスに比べて複雑な構造をもつが故に、核酸を取り囲む様々な構成物質によって短波長光が吸収され、核酸に届かなくなるためであると考えられる。このように微生物によって波長依存性が異なるため、照射波長が異なるランプ(例えば、低圧紫外線ランプと中圧紫外線ランプ)では、この点に留意が必要である。

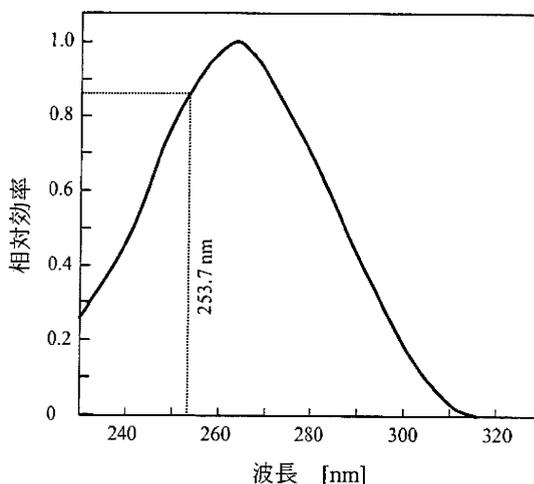
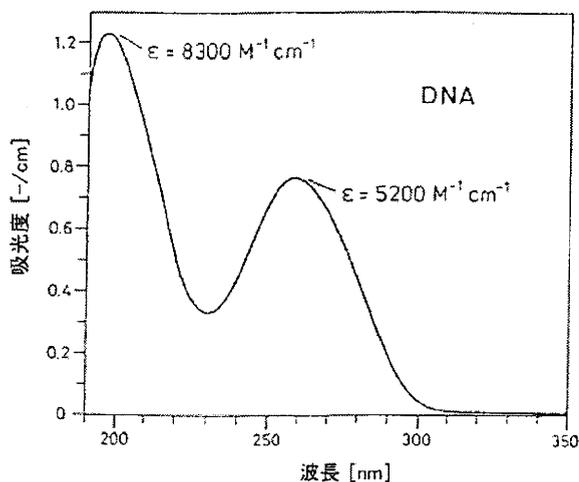


図1-2 DNAの紫外線吸収スペクトル例<sup>11)</sup> 図1-3 一般的な不活化効果曲線

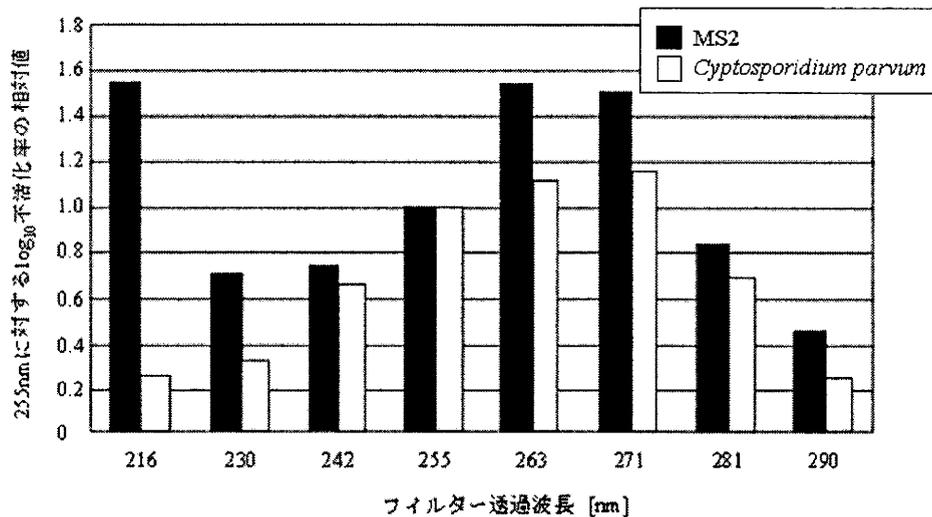


図1-4 クリプトスポリジウム及びMS2に対する各波長光の不活化能力<sup>13)</sup>

#### 1. 4. 2 クリプトスポリジウムに対する不活化効果

図1-5及び表1-2は、低圧紫外線ランプを用いた場合のクリプトスポリジウム不活化実験結果を示したものである。数多くの実験結果が記載されているが、脱囊試験（クリプトスポリジウムが外殻を破って中の感染体を排出するかどうかの試験）では、紫外線に対して非常に高い抵抗性を示しているが、細胞もしくは動物への感染試験によれば、紫外線に対して非常に低い抵抗性を示していることがわかる。これは紫外線の不活化機構が、感染体の遺伝子損傷を促して、感染力を失わせるものであり、クリプトスポリジウムを死に至らしめるものではないためである。この表のデータから照射量で10mJ/cm<sup>2</sup>を確保すれば、ほぼ3log<sub>10</sub> (99.9%)の不活化率を達成するものと考えられる。

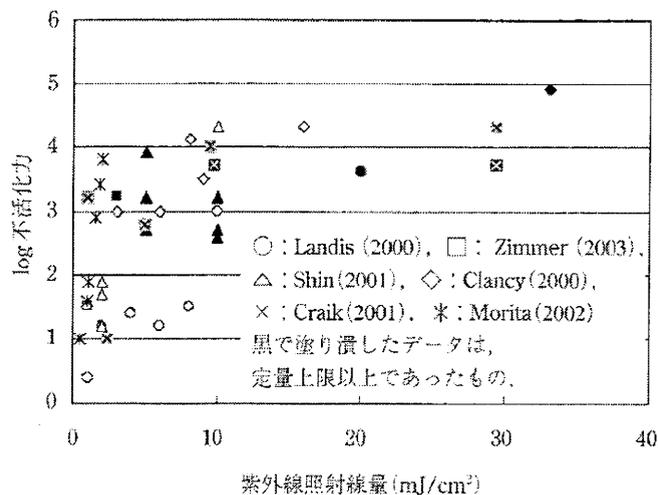


図1-5 低圧紫外線ランプによるクリプトスポリジウム不活化<sup>14)</sup>

表1-2 低圧紫外線ランプによるクリプトスポリジウム不活化<sup>14)</sup>

文献	照射線量率 (mW/cm <sup>2</sup> )	照射時間 (s)	照射線量 (mJ/cm <sup>2</sup> )	不活化力 (log)	評価方法	オーシストの株	水温 (℃)	液性 (-)
Ransome <i>et al.</i>	25	4.8	120	2	脱糞		10	0.001 M NaHCO <sub>3</sub>
Landis <i>et al.</i>			1	0.4	培養細胞感染 (HCT-8)		冷蔵温度	0.01 M PBS *2
			2	1.2				
			4	1.4				
			6	1.2				
			8	1.5				
		10	3.0					
		20	> 3.6					
Zimmer <i>et al.</i>			1	1.5 *1	培養細胞感染 (HCT-8)	Iowa		0.01 M PBS *2
			3	> 3.2 *1				
Shin <i>et al.</i>	0.06		2	1.7	培養細胞感染 (MDCK)	Iowa	23 - 25	PBS *2
	0.06		2	1.7				
	0.06		5	> 2.7				
	0.06		5	> 3.2				
	0.06		10	> 2.7				
	0.06		10	> 3.2				
	0.06		2	1.2	動物感染 (BALB/c マウス)			
	0.06		2	1.9				
	0.06		5	2.7				
	0.06		5	> 3.9				
0.06		10	> 2.6					
0.06		10	4.3					
Clancy <i>et al.</i>			3	3.0	動物感染 (CD-1 マウス)	Iowa		脱イオン水
			6	3.0				
			8	4.1				
			9	3.5				
			16	4.3				
		33	> 4.9					
Craik <i>et al.</i>	0.10	8.9	0.9	3.2	動物感染 (CD-1 マウス)	Iowa	20~22	0.05 M PB *3
	0.11	22	2.4	1.0				
	0.11	43.2	4.9	2.8				
	0.11	86.3	9.5	4.0				
	0.11	86	9.7	> 3.7				
	0.11	259	29.3	> 3.7				
	0.11	266.1	29.3	4.3				
0.11	1 034	116.9	3.6					
Morita <i>et al.</i>	0.10	5	0.5	1.0	動物感染 (Scid マウス)	HNJ-1	20	0.15 M PBS *2
	0.10	9	0.9	1.6				
	0.10	10	1.0	1.9				
	0.10	15	1.5	2.9				
	0.10	18	1.8	3.4				
	0.10	20	2.0	3.8				
	0.048	25	1.2	2.4				
	0.048	38	1.8	3.0				
	0.12	10	1.2	1.9				
	0.12	15	1.8	2.3				
	0.12	20	2.4	4.5				
	0.60	2	1.2	1.3				
	0.60	3	1.8	3.6				
	0.60	4	2.4	3.2				
	0.24	5	1.2	1.9				
	0.24	7	1.7	2.9				
	0.24	5	1.2	2.4				
	0.24	7	1.7	3.0				
	0.24	10	2.4	4.5				
	0.24	5	1.2	2.6				
	0.24	7	1.7	3.2				
	0.24	167	40.0	0.13				
	0.24	167	40.0	0.04				
	0.24	333	80.0	0.16				
	0.24	333	80.0	0.17				
	0.24	500	120	0.37				
0.24	500	120	0.58					
0.24	667	160	1.2					
0.24	667	160	1.1					
0.24	1 000	240	2.2					
0.24	1 000	240	2.0					
					脱糞		20	

\*1 複数回実験の平均値 \*2 PBS: リン酸塩緩衝液 \*3 PB: リン酸緩衝液

注) 表中の「照射線量率」とは「紫外線強度」、「照射線量」とは「紫外線照射量」の意味である。

### 1. 4. 3 回復現象

前述のように、紫外線照射によって微生物は核酸（DNA 又は RNA）の複製を阻害される結果、増殖能力を失うが代謝機能は維持しているため、微生物を死に至らしめているわけではない。

核酸中に形成された二量体の修復(repair)ができれば、再び増殖能力を回復(reactivation)することができる<sup>7)</sup>。微生物にはそのような酵素を有しているものがある。

このような微生物の持つ回復作用には、光を必要とする光回復と光を必要としない暗回復とがある<sup>10)</sup>。光回復では、修復酵素が波長 310~490nm(近紫外線 UV-A 及び可視光線)の光が照射されることによって活性化され、核酸の損傷部分が修復される。(図 1-6 参照)

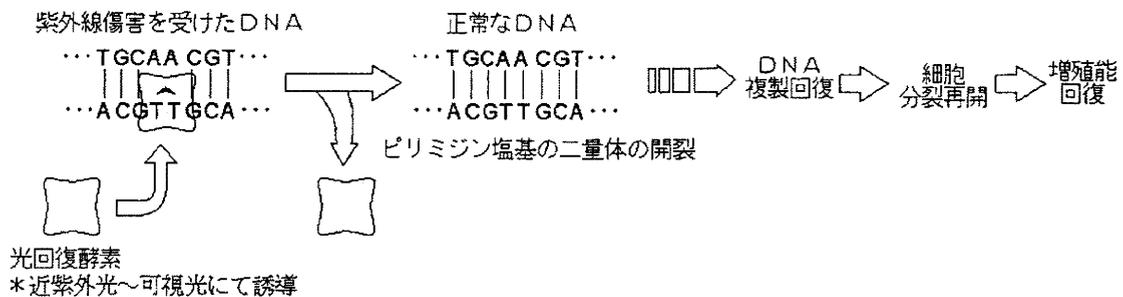


図 1-6 光回復機構の模式図<sup>7)</sup>

一方、暗回復は光エネルギーを必要としないが、一般的に光回復に比べて回復速度は非常に遅い。

このように核酸損傷が修復されて、微生物が再び増殖能力を回復するということは、病原微生物の場合に、その感染性が回復するおそれがあることを意味する。

Linden ら<sup>10)</sup>は紫外線照射において、通常の照射量(16 及び 40mJ/cm<sup>2</sup>)ではジアルジアの光回復あるいは暗回復は観察されなかったと報告している。

Shin ら<sup>15)</sup>は、クリプトスポリジウムは、紫外線によって不活化された後の感染力の回復が見られなかったことを報告している。Morita et al<sup>16)</sup>は、紫外線照射によって一旦不活化したクリプトスポリジウムオーシストの光回復と暗回復について検討しており、形成した二量体数が減少し、DNA 損傷部の修復が認められたものの、動物細胞への感染性は回復していないことを確認している(図 1-7 参照)。

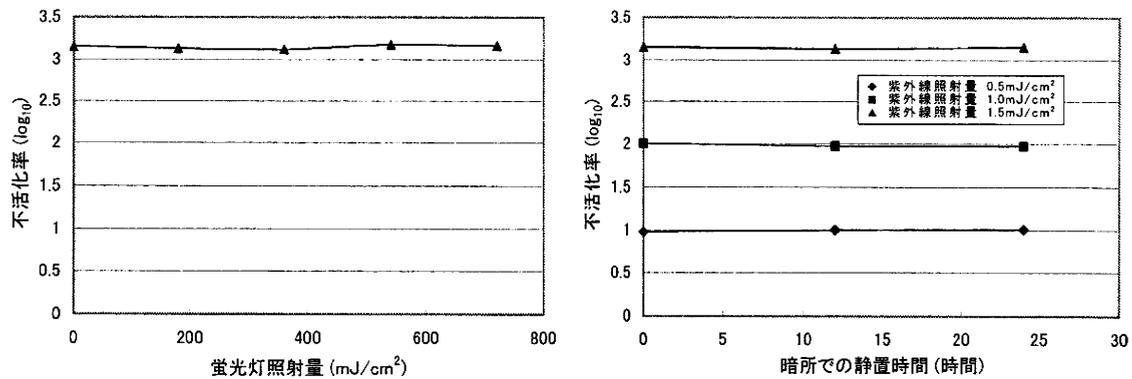


図1-7 紫外線照射によって不活化されたクリプトスポリジウムの  
光回復及び暗回復実験結果  
(参考文献<sup>15)</sup>の結果から作図 紫外線照射量 0.5~1.5 mJ/cm<sup>2</sup>)

#### 参考文献

- 1) 厚生労働省、水道水中のクリプトスポリジウム等対策の実施について（平成19年3月30日健水発第0330005号）
- 2) 厚生労働省、水道におけるクリプトスポリジウム等対策の実施状況について  
<http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/jouhou/suisitu/pdf/c5.pdf>
- 3) (財)水道技術研究センター、水道ホットニュース、第116号、2008
- 4) Kashimada, Kamiko, Yamamoto, and Ohgaki, "Assessment of photoreactivation following ultraviolet light disinfection" Wat.Sci.Tech. Vol.33 No.10-11, pp261-269,1996
- 5) 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
- 6) Rauth, "The physical state of viral nucleic acid and the sensitivity of viruses to ultraviolet light" Biophysical Journal, Vol.5 pp.257-273,1965
- 7) 「代替消毒剤の実用化に関するマニュアル」、(財)水道技術研究センター、2002年12月
- 8) WHO, "Guidelines for Drinking-water Quality THIRD EDITION", Geneva, 2004
- 9) ULTRAVIOLET DISINFECTION GUIDANCE MANUAL, EPA 815-D-03-007, June 2003 Draft
- 10) Linden, Shin, Faubert, Cairns, and Sobsey, "UV disinfection of Giardia lamblia cysts in water" Env.Sci.Tech. Vol.36, No. 11, pp2519-2522, 2002
- 11) Sonntag, "DISINFECTION BY FREE RADICALS AND UV-RADIATION" Wat. Supply, Vol.4 Mulhouse, pp 11-18,1986
- 12) Meulemann C.C.E.(1987), The basic principles of UV-disinfection of water, Ozone Sci. & Engin. 9, pp.299-314."
- 13) Linden, Shin and Sobsey, "Comparison of monochromatic and polychromatic

UV light fro disinfection efficacy. Proc. of AWWA Water Quality Tech. Conf., 2000

- 14) 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
- 15) 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
- 16) Morita, Namikoshi, Hirata, Oguma, Katayama, Ohgaki, Motoyama, and Fujiwara. "Efficacy of UV Irradiation in Inactivating *Cryptosporidium parvum* Oocyst" Appl. & Envir. Microbiol., Vol.68, No.11 pp.5387-.5393, 2002

## 2. 紫外線照射装置

紫外線照射装置は、紫外線照射部における紫外線ランプの組み込み位置により、内照式と外照式とに大別される。前者の例としてはランプの防水及び保護のためのランプスリーブに紫外線ランプを内挿したランプユニットを流水配管内（図2-1上、写真2-1左）、水路内（図2-1下、写真2-1右）又はタンク内に浸漬する装置、後者の例としては流水配管の一部を紫外線透過性の素材としてその外部から紫外線を照射する装置や、水面上部に配置した紫外線ランプから水表面を紫外線照射する装置などがある。

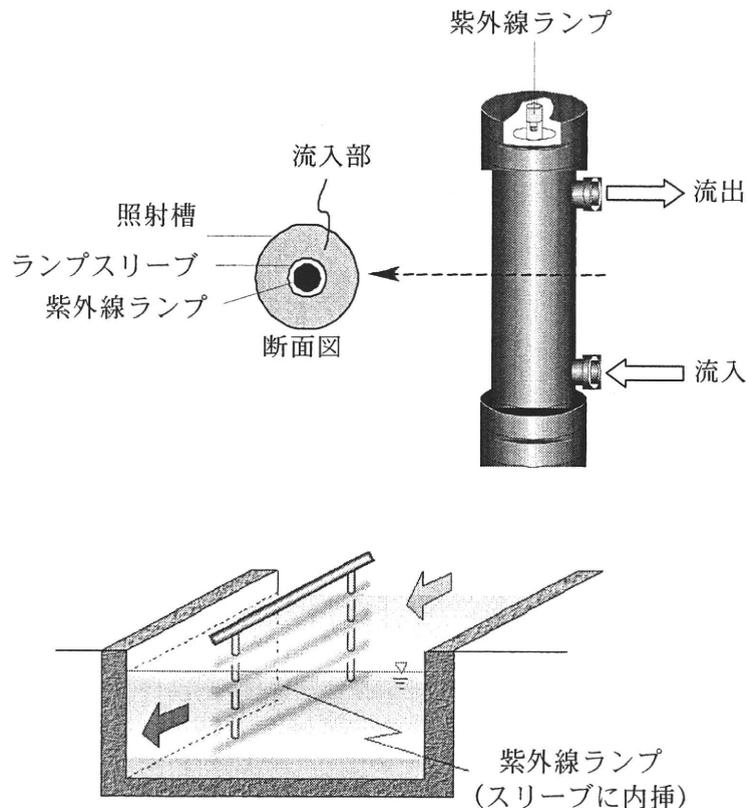


図2-1 内照式紫外線照射装置照射部の構造（上：管路型、下：開水路型）<sup>1)</sup>

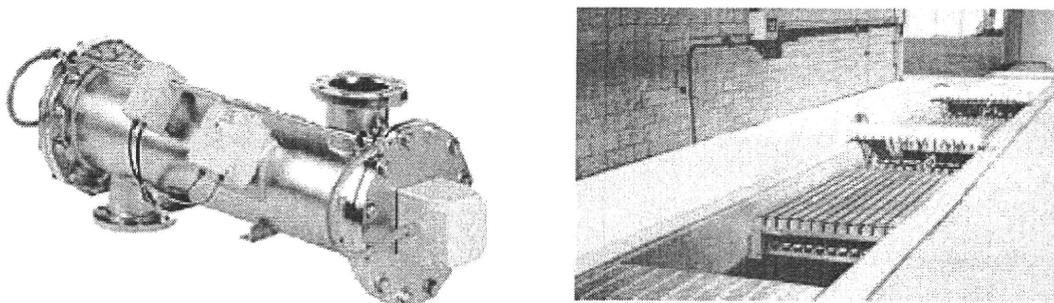


写真2-1 内照式紫外線照射装置照射部の例（左：管路型、右：開水路型）<sup>2)</sup>

ここでは、浄水プロセスに主に利用される管路型内照式の紫外線照射装置について示す。紫外線照射装置は、紫外線照射槽と付属制御盤とで構成される非常にシンプルな構造である。紫外線照射槽は、図2-2に示すとおり、照射槽、紫外線ランプ、ランプスリーブ、紫外線センサ等のさまざまな部品から構成されており、紫外線ランプはランプスリーブ内に装填されている。

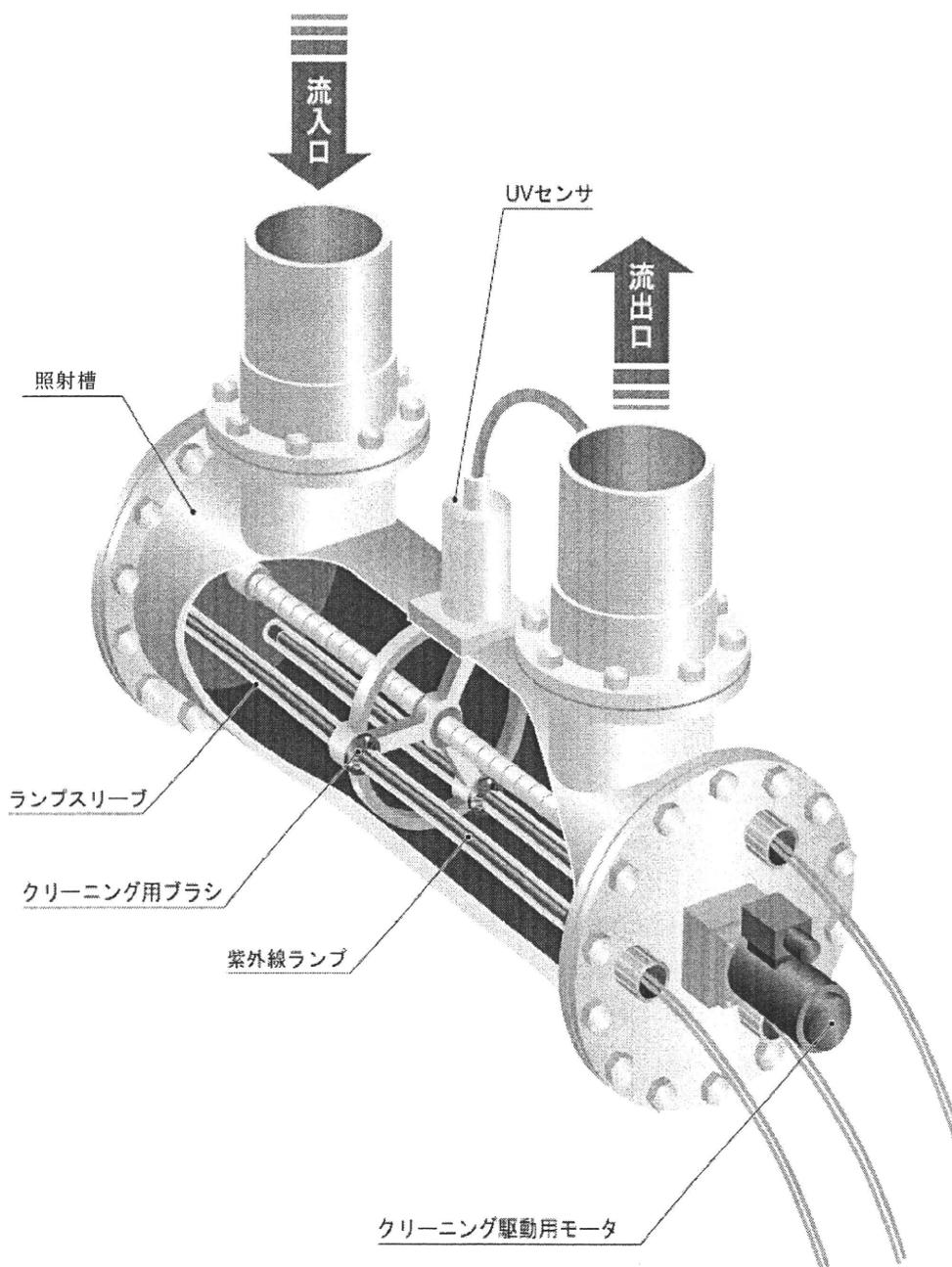


図2-2 紫外線照射槽の構成部品の例<sup>3)</sup>

厚生労働省の「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針<sup>4)</sup>」(以下、「対策指針」という。)には、必要とされる機器と望ましいとされる機器が示されている。以下に、それぞれの機器の目的・役割、種類などについて説明する。

## 2. 1 対策指針で必要とされる機器

紫外線照射装置として必要不可欠な機器及び対策指針で必要とされる機器には、紫外線照射槽、紫外線ランプ、ランプスリーブ、紫外線強度計、安定器及び付属制御盤がある。

### 2. 1. 1 紫外線照射槽

紫外線照射槽とは、紫外線照射が一定の機能を保持させるため必要な機材をハウジングに装填し一体化したものであり、水流の偏りのない、所定の滞留時間が得られる構造のものである。

紫外線照射槽の形状は円筒形のものが多く、様々な処理水出入口位置や紫外線ランプの設置方向があり、例えば、図2-3左、図2-3右（参考文献5）を一部改編）のような事例がある。ランプの点灯状態が垂直（図2-3a）、水平（図2-3b）、c）、その他となっているタイプがあり、また、流れに対してランプ配置が平行（図2-3a）、b）、c）、クロス（図2-3d）、その他のタイプがある。その他にもサイクロン型や外部照射型などがある。

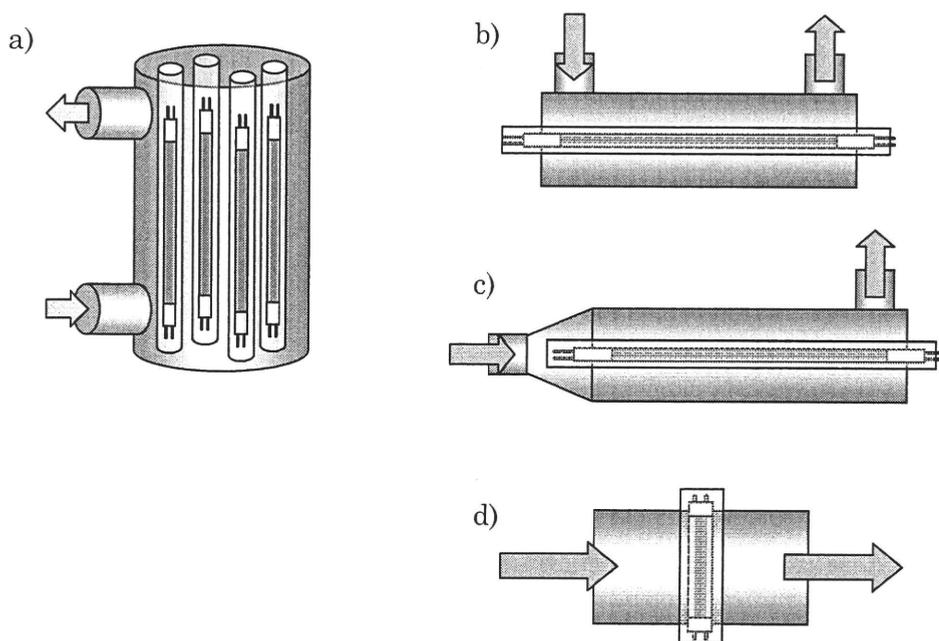


図2-3 紫外線照射槽の形状の事例

一般に、紫外線照射槽はステンレス製であり、内部には紫外線ランプを内装したランプスリーブが1本又は複数本あり、槽の表面又は内部に紫外線強度計の受光部である紫外線センサがある。

## 2. 1. 2 紫外線ランプ

### (1) ランプの種類

紫外線処理に用いられる紫外線ランプには、アルゴンやネオンなどの不活性な希ガスとともに水銀が封入されており、電極から発せられた電子線が水銀蒸気に当たり、電子の運動エネルギーが光エネルギーへと変換される。低圧紫外線ランプの基本的な構造は一般の蛍光灯と同じであるが、通常の高圧紫外線ランプではランプ内壁に蛍光体が塗布されているため、紫外光が可視光へと変換される。これに対して、低圧紫外線ランプでは蛍光体が塗布されていないため発生した紫外線がそのままランプから放射される。

ランプ内の点灯時の水銀蒸気圧の違いにより、低圧、中圧に分類され、発生する紫外線の波長分布に違いが生じる。ここでいう中圧紫外線ランプを高圧水銀灯と呼ぶこともある。点灯中の水銀蒸気分圧が 10 Pa を超えないものを低圧、40 kPa 以上のものは中圧紫外線ランプである。低圧の場合、適温（40℃）の水銀は基本的に 253.7 nm の単色紫外線を発生させる。中圧の場合、高い動作温度（600~900℃）では、水銀原子同士の衝突頻度が増加し広範囲な波長（多色）の紫外線が高光度で発生する。紫外線ランプの構造を

図 2-4 に示す。

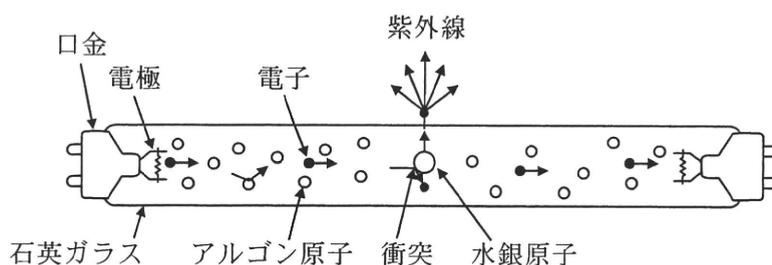


図 2-4 紫外線ランプの構造（参考文献<sup>6)</sup>を改編）

### (2) 波長分布

低圧紫外線ランプは、図 2-5 に示すような発光波長分布を示し、波長 253.7 nm の UV-C が主たる発光波長である。不活化効果の高い波長を効率良く発光する特徴がある。

中圧紫外線ランプの出力波長分布の例をランプ A、ランプ B として図 2-6 に示す。中圧紫外線ランプは UV-A から UV-C の紫外線を幅広く発する特徴があり、一般的に、中圧紫外線ランプは低圧紫外線ランプに比べて投入電力が大きい高出力のランプであるため、照射装置の小型化や大水量の処理が可能である。

図 2-7 は、低圧紫外線ランプ及び中圧紫外線ランプの出力分布を、DNA 吸収スペクトルと重ね合わせて示している。中圧紫外線ランプ 300 nm 以上の波長域には、DNA の吸収スペクトルがほとんどないことが分かる。

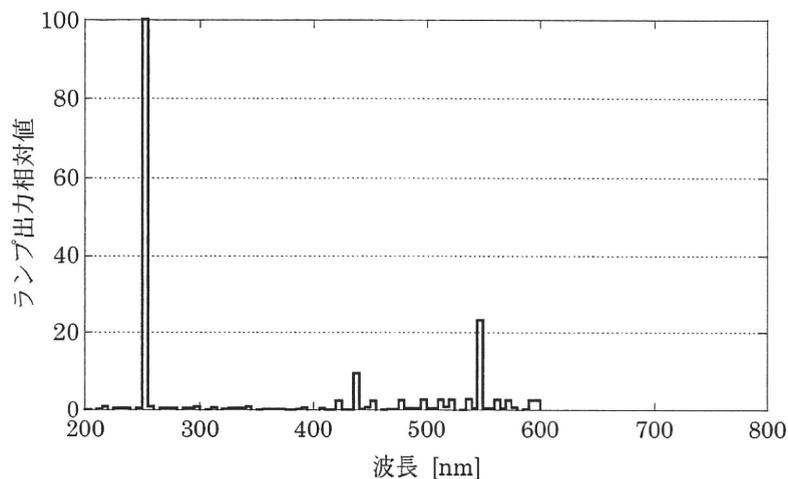


図 2-5 低圧紫外線ランプの波長分布とランプ出力相対値 (例) 7)

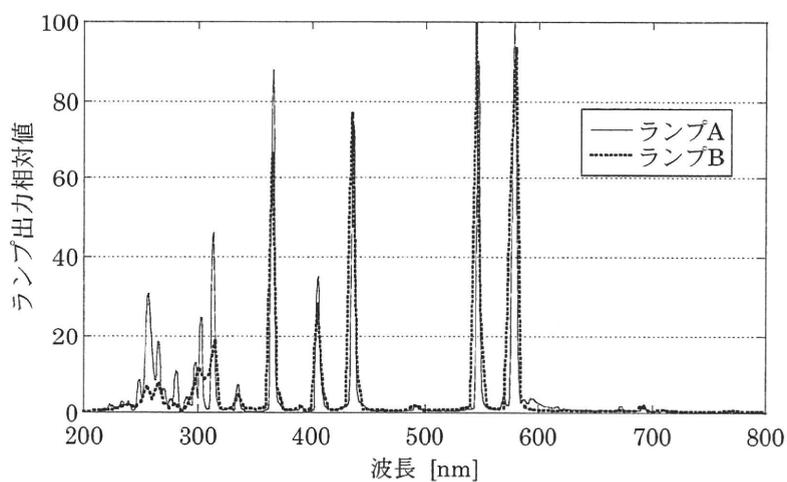


図 2-6 中圧紫外線ランプの波長分布とランプ出力相対値 (例) 7)

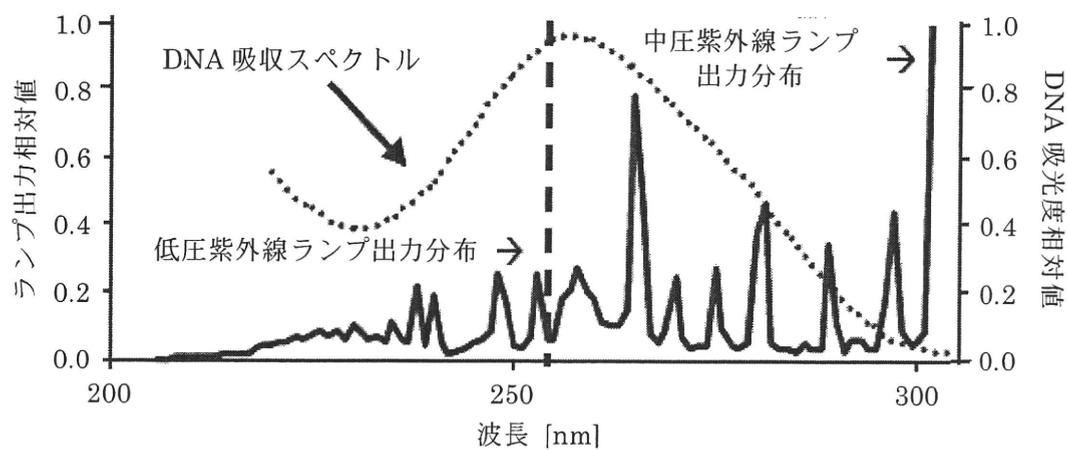


図 2-7 ランプ出力分布例と DNA 吸収スペクトルとの関係 2)

### (3) ランプの確認

紫外線ランプは照射時間とともに劣化し、出力が低下する。また、中圧紫外線ランプはスペクトルがシフトする可能性がある。ランプの劣化は、時間の経過とともに照射量の到達に影響を与えるため注意が必要である。

点灯を確認するとともに、ランプ運転時間（ランプ種類ごとの経時特性）、出力低下（許容限度）に基づく交換時期の把握に留意する。例えば図2-8に示したように、点灯時間によって紫外線強度維持率は低下する。ランプが切れた場合又は装置メーカーによる設定出力未滿に低下した場合、交換が必要である。また、ランプの頻繁な点灯・消灯は、ランプ寿命を著しく低下させる原因となる。

図2-9では、紫外線強度維持率が、点灯開始時間より85%、87.5%に低下した時点で電氣的に調整することで調光を行い、ランプ出力を調整している。

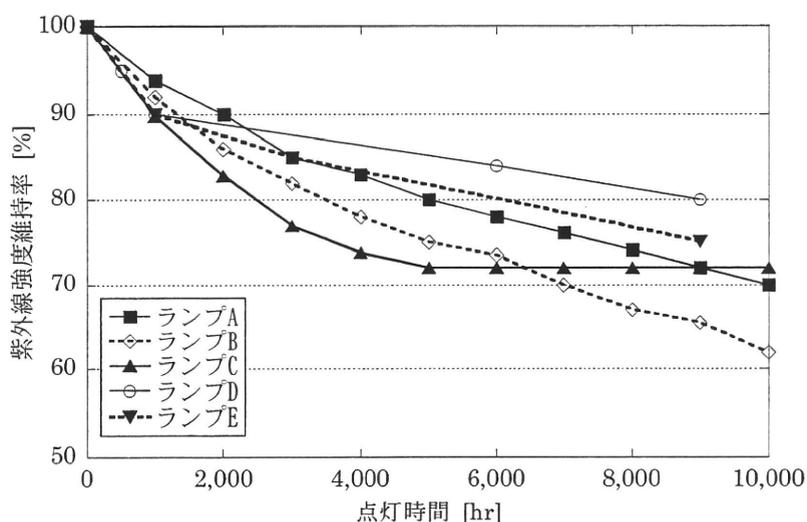


図2-8 低圧紫外線ランプの点灯時間と紫外線強度維持率の関係 (例)  
(参考文献<sup>8)</sup>を改編)

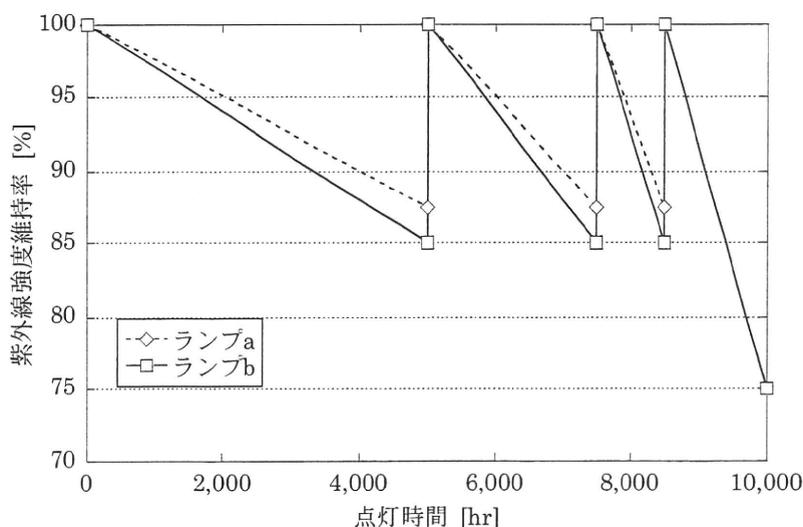


図2-9 中圧紫外線ランプの点灯時間と紫外線強度維持率の関係 (例)<sup>8)</sup>

#### (4) ランプの選定

これらのランプの選定に当たっては、水量や水質、適用位置を十分考慮する必要がある。表2-1は、これらのランプの特性をまとめたものであり、表2-2は低圧と中圧紫外線ランプの長所と短所をまとめたものである。

表2-1 紫外線ランプの特性

項目	低圧	中圧
波長	253.7 nm の単色光	不活化に有効な波長範囲を含む多色光
点灯時の水銀蒸気圧	1~10 Pa 程度	40~400 kPa 程度
動作温度	40~200 ℃	600~900 ℃
電気入力	0.4~10 W/cm	50~250 W/cm
殺菌に有効な紫外線出力	0.15~3.5 W/cm	5~30 W/cm
電力から不活化に有効な光への変換効率	20~40%	10~20%
アーク長	10~150 cm	5~120 cm
必要なランプ本数	多	少
寿命	8,000~12,000 時間	4,000~8,000 時間

表2-2 紫外線ランプの比較

	低圧	中圧
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>出力される波長が不活化に有効な 253.7 nm であり、不活化効率が高い</li> <li>ランプ 1 本当りでの消費電力が少ない</li> <li>変換効率が高い</li> <li>ランプの寿命が長い</li> <li>多灯装置のため、ランプ不点時の影響が少ない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ランプ 1 本当りでの出力が高いため、設備を小さくできる</li> <li>大容量の施設に対応できる</li> <li>処理水温度に影響されない</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>ランプ 1 本当りでの出力が小さいため、設備が大きくなる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>運転温度が高いため、ファウリングが加速される</li> <li>ランプの寿命が短い</li> <li>変換効率が低い</li> </ul>

#### 2. 1. 3 ランプスリーブ

ランプスリーブは、紫外線ランプを破損から保護し、最適な動作温度を保つために必要な部品であり、材質は石英である。直径は一般的に低圧紫外線ランプで 1.5~3.0 cm、中圧紫外線ランプで 2~10 cm となる。また、紫外線ランプ表面とランプスリーブ内面との距離は、0.5~2.0 cm 程度である。なお、ランプスリーブの厚さは一般的に 1.5~3 mm であり、主に 240 nm 以下の紫外線を吸収するものもある。このため、紫外線照射装置の設計に際しては、ランプスリーブにおける紫外線の吸収を考慮に入れる必要がある。図 2-10 に紫外線の波長別ランプスリーブ透過率の例を示す。オゾンレス石英は、ランプスリーブ外面のファウリングを防止する効果があるとされている。この他にも、ランプスリーブの割れ防止、割れた場合の飛散防止のためフッ素樹脂コーティングしたランプスリーブも使用されている。

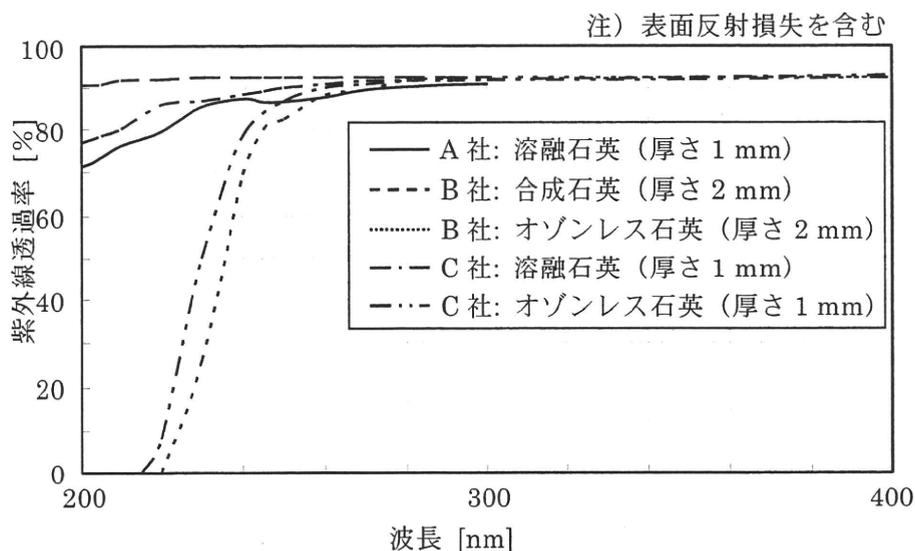


図2-10 紫外線の波長別ランプスリーブ透過率例<sup>9),10),11)</sup>

ランプスリーブの微細な割れやファウリング（汚染）により、紫外線強度は低下する。微細な割れは、内部応力や自動洗浄システムの故障、水撃、共振などの機械的な力によって起こる。ランプスリーブを手作業で洗浄する際にも微細な割れが生じることもあるため慎重な取り扱いが必要である。また、運転中にランプスリーブが割れると、水が内部に浸入し、紫外線ランプと水との温度差によって紫外線ランプが破損し、封入された水銀が漏れ出すおそれがあるため注意が必要である。

また、ランプスリーブ外面のファウリングは、主に水に含まれる硬度成分や金属イオンが原因で生じ、これらは洗浄によって定期的に除去する必要がある。

#### 2. 1. 4 紫外線強度計

紫外線強度計は、照射槽内の紫外線強度を測定する感光検出器である（写真2-2）。この強度計を使用することにより、照射槽内の特定位置の紫外線強度を測定できる。測定される値は、ランプ出力の設定、ランプの劣化、ランプスリーブの劣化、ランプスリーブのファウリング及び水の紫外線吸光度の変化により影響を受ける。紫外線強度計は、光学部品、光検出器、増幅器、ケース及び電気コネクタで構成される。なお、中圧紫外線ランプの強度を測定する際は、目的とする波長に応じて適宜受光部を変更する必要があるが、253.7 nm の波長を検出可能な受光部を選定するのが一般的である。中圧紫外線ランプの強度を測定する際の受光部の波長は、メーカーにより様々であるがその例を図2-11に示す。

紫外線強度計の型式は、湿式と乾式に分けられる。乾式強度計は、監視窓を通して紫外光を測定するものであるのに対し、湿式強度計は照射槽を流れる水に直接接触させて測定するものである。監視窓と湿式強度計の水との接触部分は、時間の経過とともに汚れる可能性があるため、ランプスリーブと同様に洗浄が必要である。

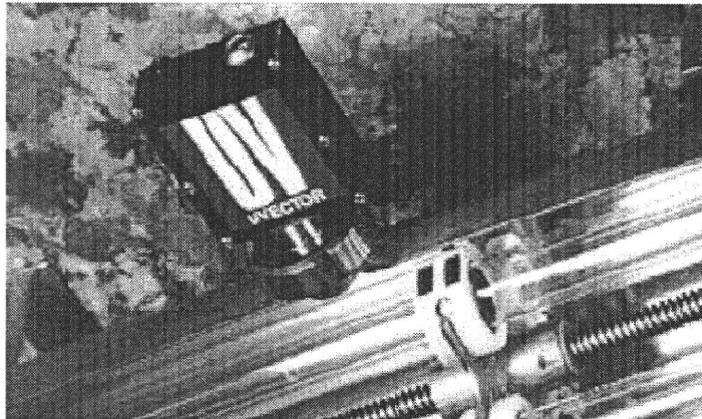


写真 2 - 2 湿式紫外線強度計の外観<sup>2)</sup>

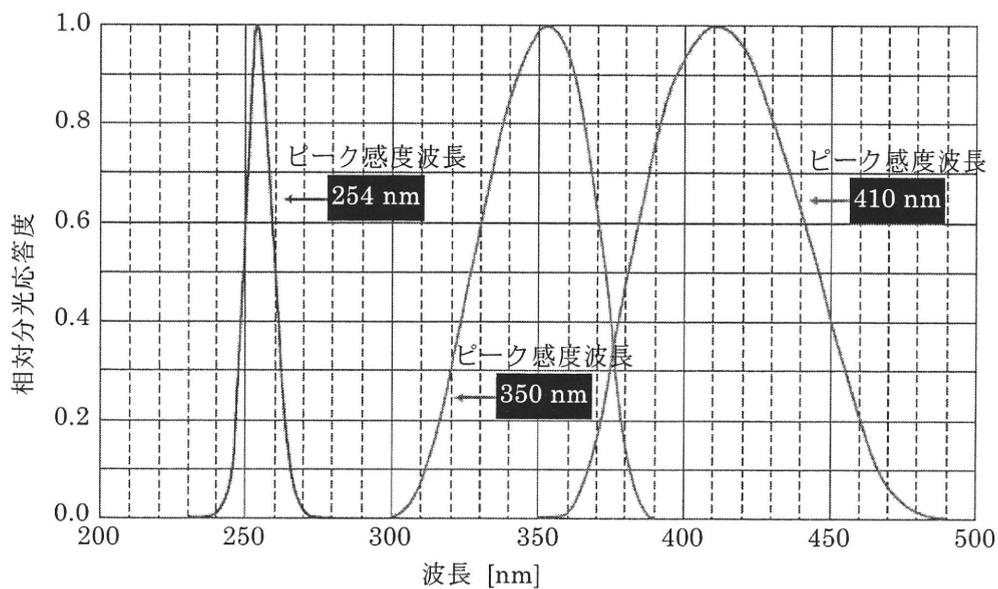


図 2 - 1 1 紫外線強度計の受光部の波長 (例)<sup>12)</sup>

物理的センサとして、光電管やシリコンフォトダイオードを用いた紫外線照度モニタが検出器として用いられている。物理的センサの構造については、代表例として UV-B センサを図 2 - 1 2 に示す。

石英ドームより入射した光が拡散板、干渉フィルタ、蛍光膜、ブロックフィルタを経て分光、変換される。計測すべき紫外線の波長域に応じて干渉フィルタの材質が適宜変更される。

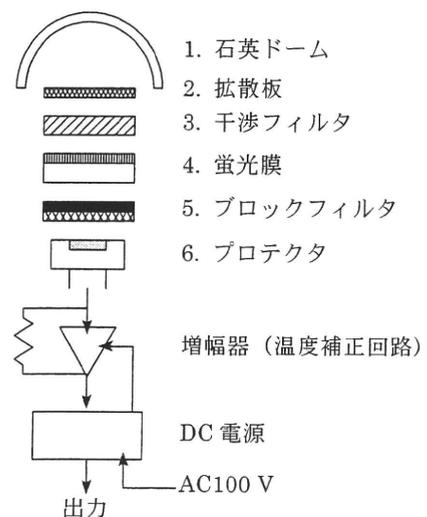


図 2 - 1 2 UV-B センサの構造<sup>1)</sup>