

表2 アンケート回答 (排水プロセスに適用している施設)

No.	9	10	11	12	13
基本事項	水源種類	湧水	河川表流水	河川表流水	浅井戸
	施設能力 (m ³ /日)	500	1,300,000	1,300,000	40,200
	平均汚水量 (m ³ /日)	460	881,135	881,135	20,960
	ろ過方式	膜ろ過	急速ろ過	急速ろ過	膜ろ過
職員人数	巡回監視	70人	70人	1~2人	1~2人
運営方法	委託	直営	直営	委託	委託
紫外線処理の対象水	排水(膜ろ過洗浄排水)	排水(汚泥調整池上澄水)	排水(濃縮槽上澄水)	排水(膜ろ過洗浄排水)	排水(膜ろ過洗浄排水)
ランプの種類	低圧	低圧	低圧	低圧	低圧
形式	管路型	管路型	管路型	管路型	管路型
台数	1	4	4	2	2
紫外線処理設備の 結元	計画一日最大処理水量 (m ³ /日)	60	24,480	20,160	100
	1台当たりの最大処理水量 (m ³ /日)	60	8,160	6,720	—
	設置位置	排泥槽~河川放流	汚泥調整池上澄水~取水ポンプ井	濃縮槽上澄水~取水ポンプ井	膜ろ過洗浄排水~河川排水
	建設年月	平成19年6月	平成20年3月	平成20年3月	平成20年3月
	通水年月	平成19年12月	平成20年4月	平成20年4月	平成20年4月
対象水の 水質	濁度(平均) (度)	—	2.1	1.1	—
	濁度(最大) (度)	—	10	5	—
	色度(平均) (度)	—	—	—	—
	色度(最大) (度)	—	—	—	—
	UV吸光度(平均) 260nm,10mm	—	—	—	—
	UV吸光度(最大) 260nm,10mm	—	—	—	—
	硬度(平均) (mg/L)	—	—	—	—
	硬度(最大) (mg/L)	—	—	—	—
	鉄(平均) (mg/L)	—	—	—	—
	鉄(最大) (mg/L)	—	—	—	—
マンガン(平均) (mg/L)	—	—	—	—	
マンガン(最大) (mg/L)	—	—	—	—	
日常点検頻度	—	1回/日	1回/日	1回/週?	1回/週?
日常点検人数	—	1人	1人	1人	1人
装置内清掃点検頻度	—	1回/年	1回/年	—	—
強度計校正頻度	—	1回/年	1回/年	—	—
ランプ交換頻度	—	1.5年	1.5年	1年	1年
ランプスリープ交換頻度	—	5年	5年	5年	5年
紫外線強度計交換頻度	—	1.5年	1.5年	1年	1年
安定器交換頻度	—	7年	7年	8年	8年
維持管理マニュアルの有無	メーカーマニュアル	メーカーマニュアル	メーカーマニュアル	メーカーマニュアル	メーカーマニュアル

3. 2 地表水以外への適用における
紫外線処理設備維持管理マニュアル（案）

目 次

1. 基本的事項	1
1. 1 本書の目的	1
1. 2 紫外線による不活化の特徴	2
1. 3 紫外線とは	4
1. 4 紫外線による不活化の機構	5
1. 4. 1 不活化機構	5
1. 4. 2 クリプトスポリジウムに対する不活化効果	6
1. 4. 3 回復現象	8
2. 紫外線照射装置	11
2. 1 対策指針で必要とされる機器	13
2. 1. 1 紫外線照射槽	13
2. 1. 2 紫外線ランプ	14
2. 1. 3 ランプスリーブ	17
2. 1. 4 紫外線強度計	18
2. 1. 5 安定器	20
2. 1. 6 付属制御盤	21
2. 2 対策指針で望ましいとされる機器	22
2. 2. 1 自動洗浄装置	22
2. 2. 2 温度計	22
3. 地表水以外の水への適用における紫外線処理設備	24
3. 1 紫外線照射量	24
3. 2 適用水質	24
3. 3 設計上の留意点	25
3. 3. 1 原水水質の把握	25
3. 3. 2 計画処理水量	25
3. 3. 3 適用位置	25
3. 3. 4 紫外線照射装置の選定	26
3. 3. 5 付帯設備	27
3. 3. 6 設置上の留意点	27
4. 維持管理	30
4. 1 基本事項	30
4. 2 日常管理	30
4. 2. 1 運転制御方法	30
4. 2. 2 運転開始・停止時の留意点	31
4. 2. 3 紫外線ランプの交換	31
4. 2. 4 紫外線強度計	32
4. 2. 5 ランプスリーブの洗浄	33

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

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¹⁾。

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²⁾。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³⁾。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、水道事業者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. 2. 2 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
クリプトスポリジ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	塩素と同様ほとんど効果なし	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 mJ/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⁸⁾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。

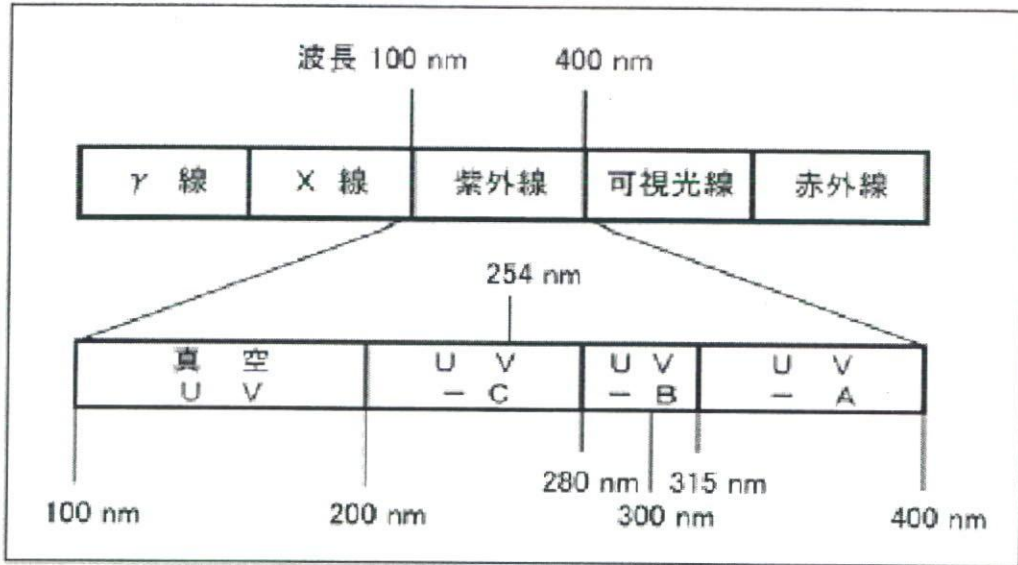


図1-1 電磁波と紫外線⁹⁾

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^{8),10)}。

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¹²⁾。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。

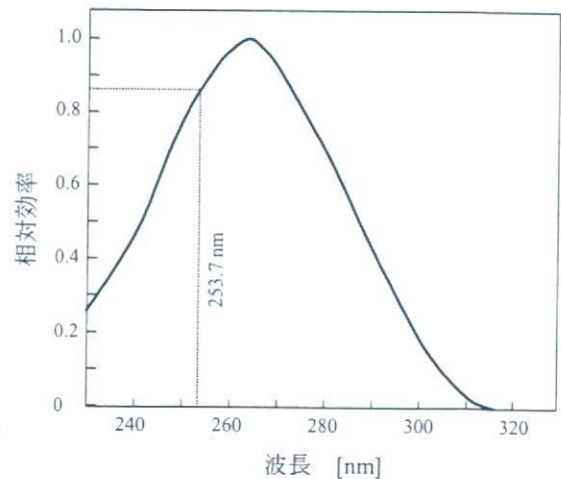
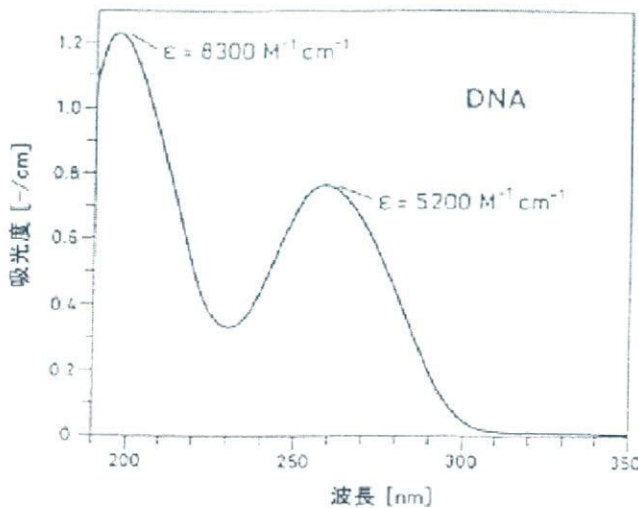


図1-2 DNAの紫外線吸収スペクトル例¹¹⁾ 図1-3 一般的な不活化効果曲線

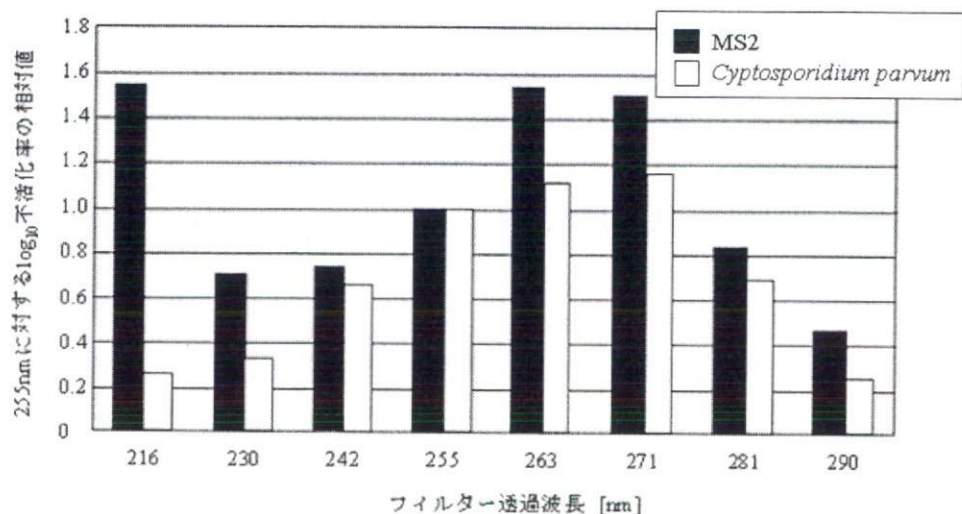


図1-4 クリプトスポリジウム及びMS2に対する各波長光の不活化能力¹³⁾

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/cm²を確保すれば、ほぼ3log₁₀ (99.9%)の不活化率を達成するものと考えられる。

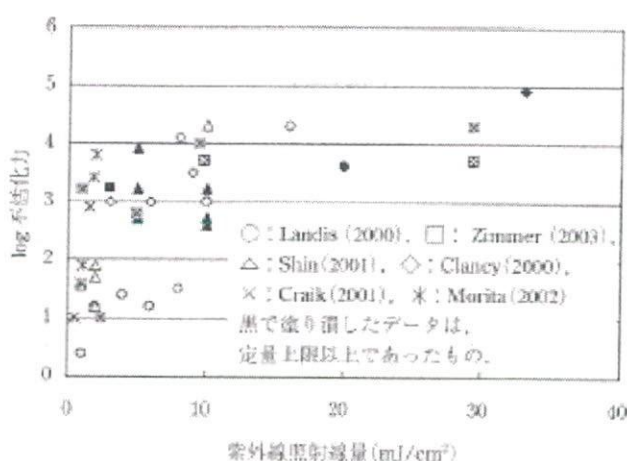


図1-5 低圧紫外線ランプによるクリプトスポリジウム不活化¹⁴⁾

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¹⁴⁾

文献	照射線量率 (mW/cm ²)	照射時間 (s)	照射線量 (mJ/cm ²)	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 ₃	
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	動物感染 (BALB/c マウス)				
	0.06		2	1.2					
	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)		20		
	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					HNJ-1
	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	脱糞	20			
	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						

*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⁷⁾。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¹⁰⁾。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)

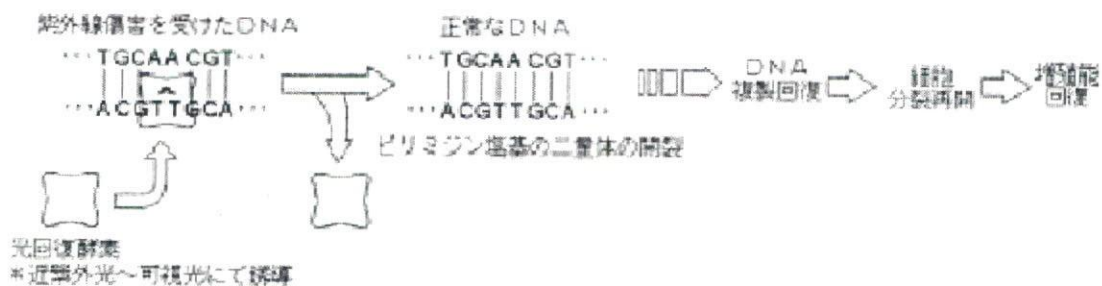


図 1-6 光回復機構の模式図⁷⁾

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事は、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¹⁰⁾は紫外線照射において、通常の照射量(16 及び 40mJ/cm²)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¹⁵⁾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 al¹⁶⁾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)。

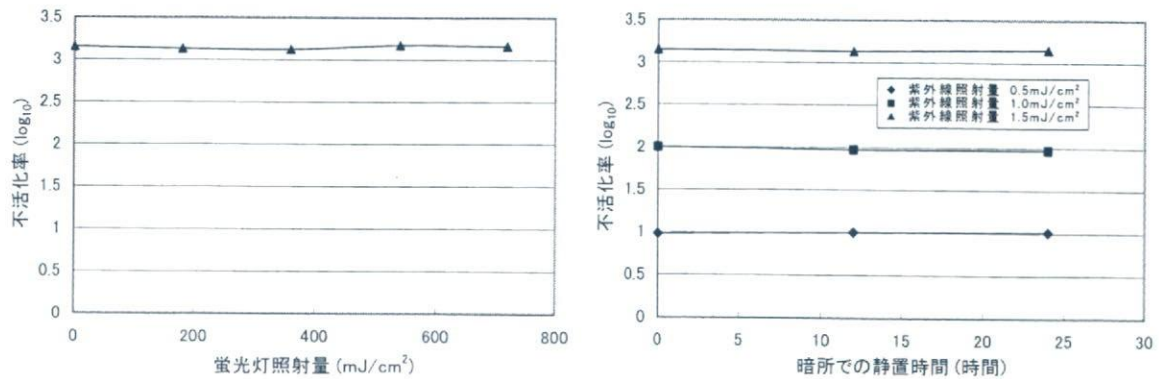


図 1-7 紫外線照射によって不活化されたクリプトスポリジウムの
光回復及び暗回復実験結果
(参考文献¹⁵⁾の結果から作図 紫外線照射量 0.5~1.5 mJ/cm²)

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 for 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

紫外線照射装置には、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。

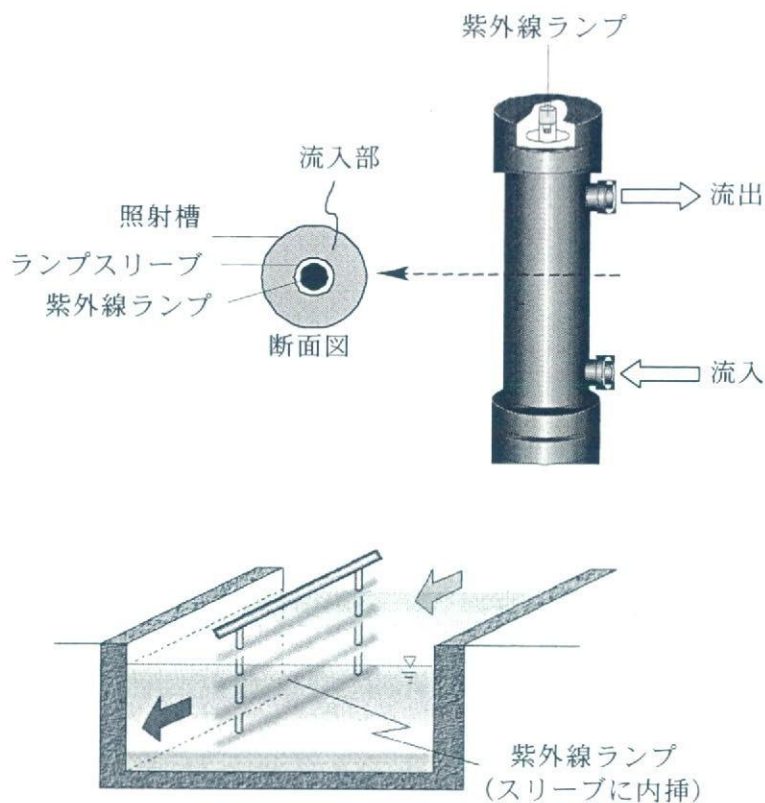


図2-1 内照式紫外線照射装置照射部の構造(上:管路型、下:開水路型)¹⁾

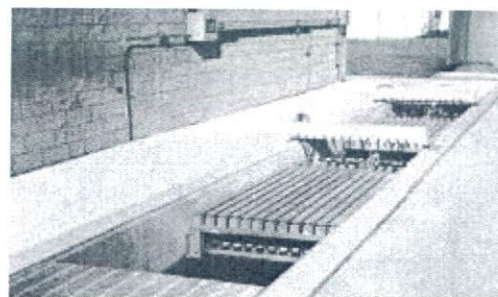
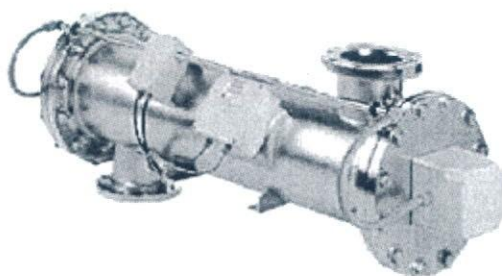


写真2-1 内照式紫外線照射装置照射部の例(左:管路型、右:開水路型)²⁾

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。

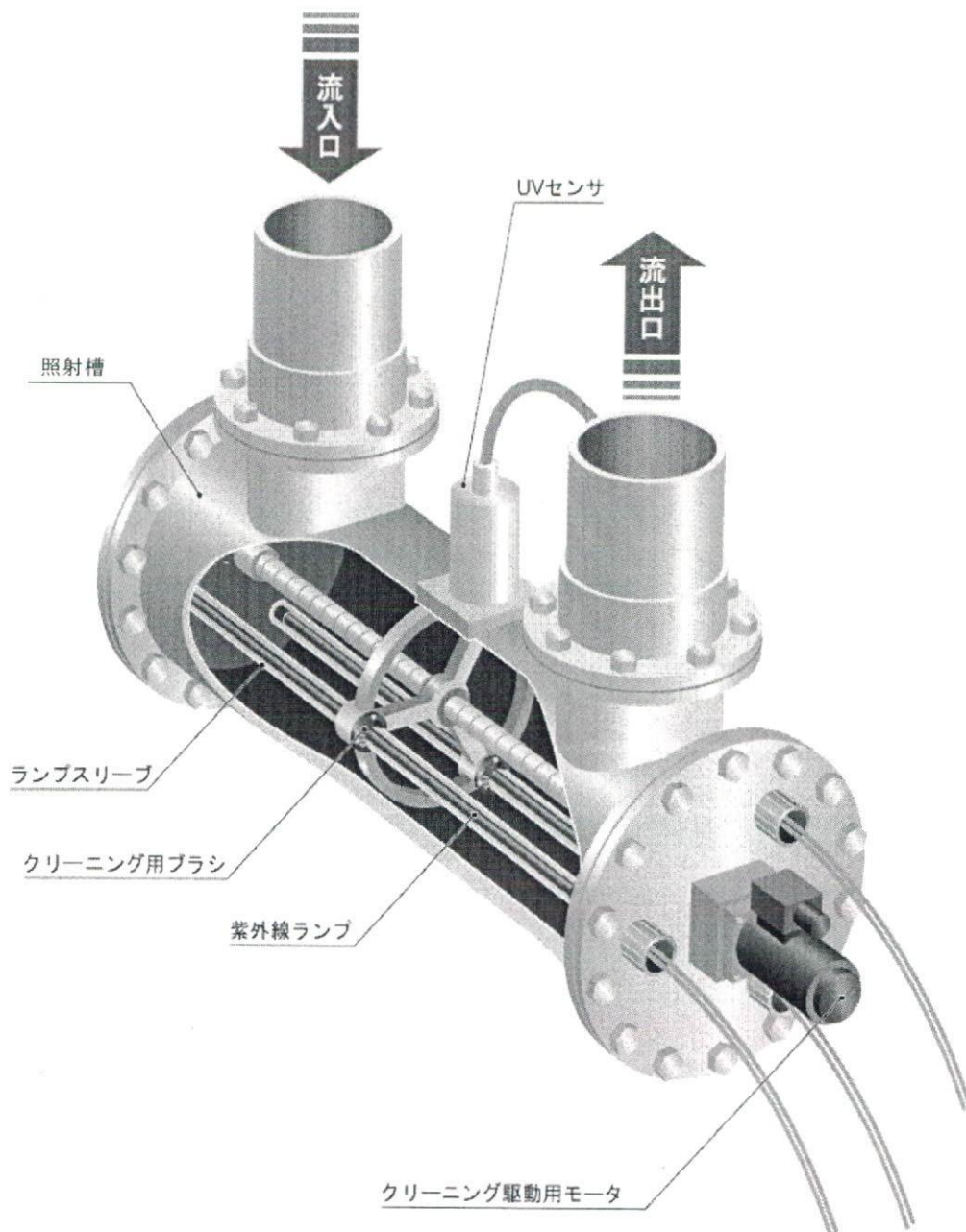


図2-2 紫外線照射槽の構成部品の例³⁾

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⁴⁾」(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。

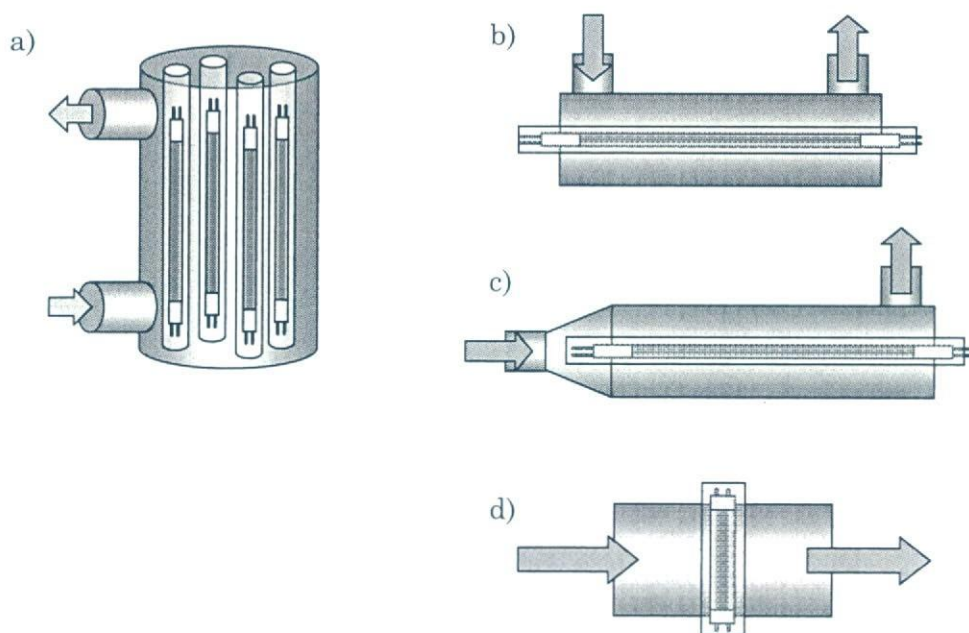


図2-3 紫外線照射槽の形状の事例

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、通常の蛍光灯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、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。

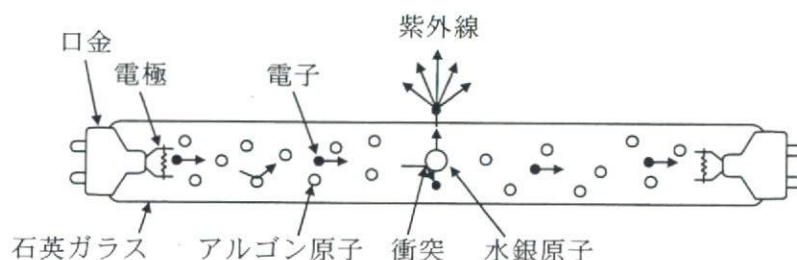


図 2-4 紫外線ランプの構造（参考文献⁶⁾を改編）

(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。

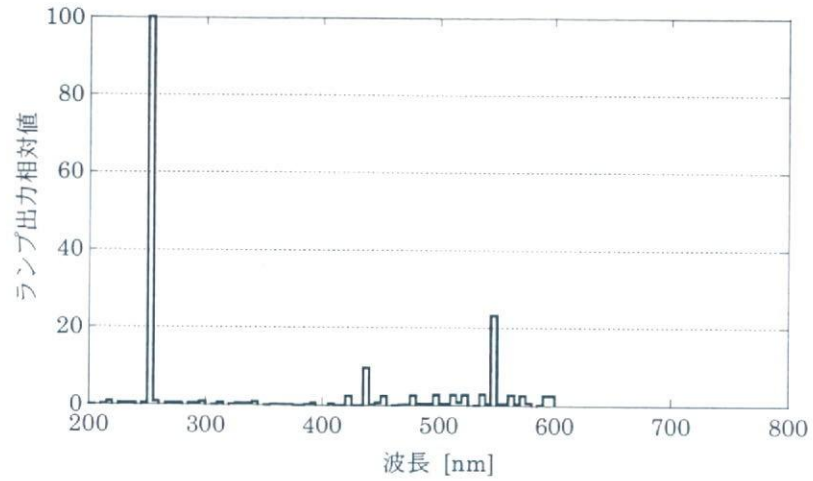


図 2-5 低圧紫外線ランプの波長分布とランプ出力相対値 (例) 7)

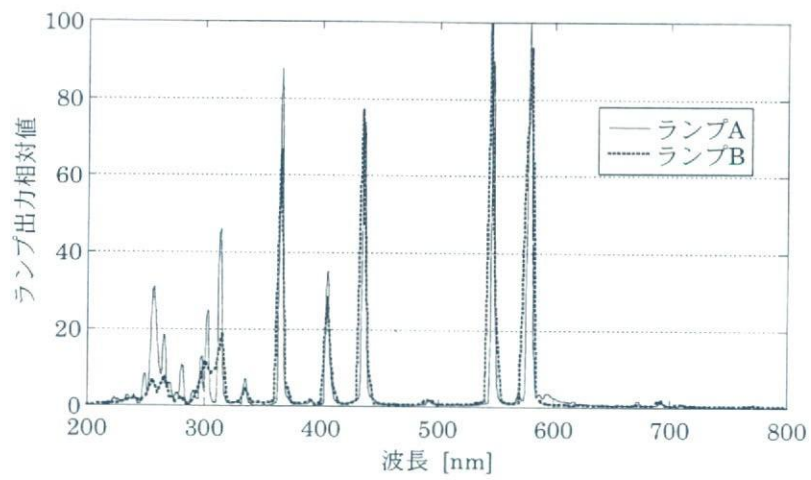


図 2-6 中圧紫外線ランプの波長分布とランプ出力相対値 (例) 7)

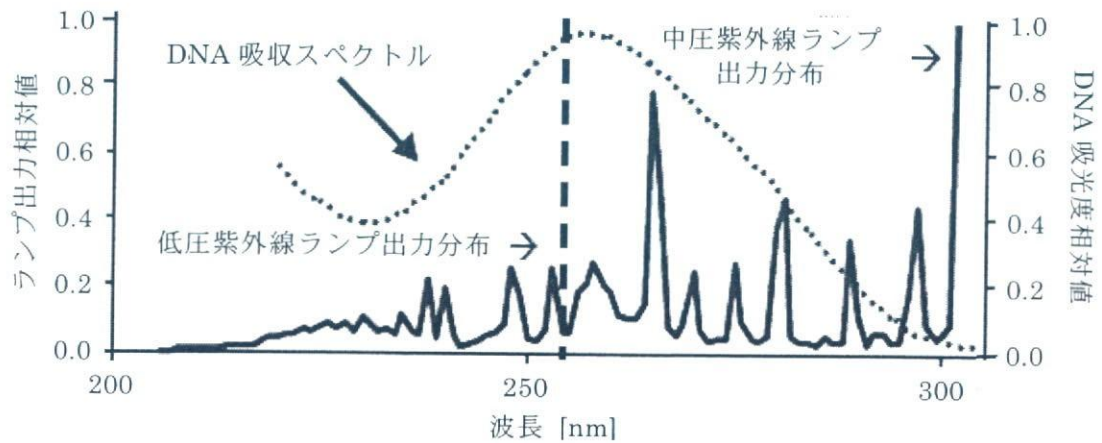


図 2-7 ランプ出力分布例と DNA 吸収スペクトルとの関係 2)

(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。

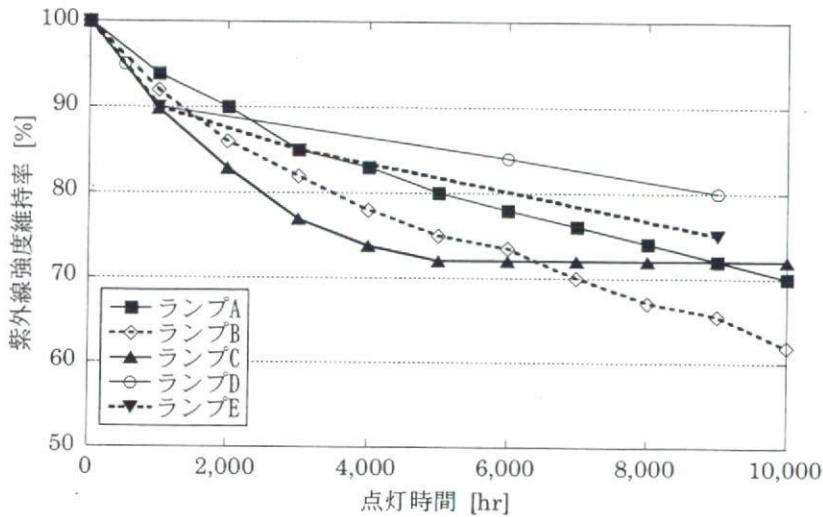


図2-8 低圧紫外線ランプの点灯時間と紫外線強度維持率の関係 (例)
(参考文献⁸⁾を改編)

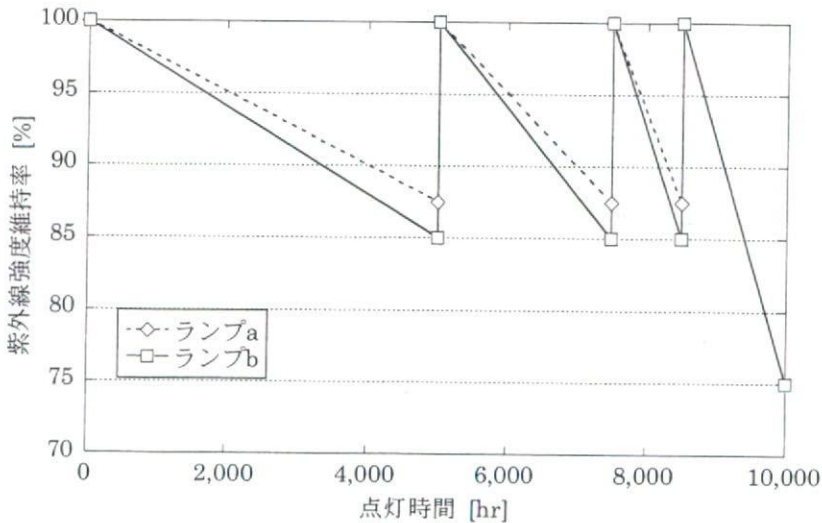


図2-9 中圧紫外線ランプの点灯時間と紫外線強度維持率の関係 (例)⁸⁾