

紫外線処理設備について（案）

○背景及び目的

近年、紫外線照射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おり、ろ過と比べ簡便な手法として導入することが可能であると考えられる。しかし、紫外線照射は、処理しようとする水の濁度が高くなった場合の効果の安定性に懸念があるため、十分な配慮が必要である。

これらを踏まえ、紫外線処理設備を導入する際の適用要件、および運転管理に関する現時点での知見を、2005年8月に財団法人水道技術研究センターが作成した「紫外線消毒ガイドライン」を基に、以下のとおり取りまとめた。

I. 適用要件

1. 必要とする紫外線照射量

紫外線処理設備は、紫外線照射槽を通過する水量の95%以上に対して、紫外線(253.7nm付近)の照射量を常時10mJ/cm²以上確保できるものでなければならない。

Guidelines for drinking-water quality, 3rd edition (2004), WHO, p.141によると、紫外線照射量とオーシスト等の不活化率の関係は表-1のとおり、低圧紫外線ランプから発する紫外線(253.7nm)は、クリプトスポリジウムを10mJ/cm²の照射量(照射強度(mW/cm²)×照射時間(s))で3log(99.9%)不活化でき、また、ジアルジアについては5mJ/cm²の照射量で2log(99%)不活化できるとしている。このことを踏まえ、クリプトスポリジウム等の不活化に必要な紫外線照射量(照射強度(mW/cm²)×照射時間(s))を10 mJ/cm²とする。

表-1 紫外線照射によるオーシスト等の不活化効果

	不活化率	照射量
<i>Giardia</i>	99% (2log)	5 mJ/cm ²
<i>Cryptosporidium</i>	99.9% (3log)	10 mJ/cm ²

○必要照射量の留意点

紫外線照射槽の形状、ランプの配置、本数などによって、槽内の水の流れと紫外線照射強度には分布が生じる。また、濁質や色度成分などの水質も紫外線の透過率を減少させ、照射強度分布に影響を及ぼす。これらの影響の結果として、紫外線照射強度は水塊によって異なる。このため、これらの影響を十分に考慮し、紫外線照射槽は、通過する水量の95%以上に対して、紫外線(253.7nm付近)の照射量を常時10mJ/cm²以上確保できるものでなければならない。ただし、紫外線によるクリプトスポリジウムの不活化能力は、水温や照射強度に依存せず、照射量(照射強度(mW/cm²)×照射時間(s))に依存することから、水温と照射強度に対する考慮は実質上必要としない。

2. 紫外線照射に適する水質

処理対象とする水の水質が以下を満たすこと

濁度 2度以下であること

色度 5度以下であること

紫外線(253.7nm 付近)の透過率が 75%を超えること (紫外線吸光度が 0.125 abs./10mm 未満であること)

クリプトスポリジウム等の不活化に必要な紫外線照射量 ($10\text{mJ}/\text{cm}^2$) を確保するためには、紫外線照射を妨げる要因である、懸濁物質等による紫外線透過率の低下、紫外線吸収物質による照射強度の低下、ランプスリーブ表面等への透過率を低下させる物質の付着に留意する必要がある。これらの知見を整理したものが表-2である。

このうち、濁度及び色度は、紫外線透過率への影響が大きいことやろ過施設がない場合に原水の濁度及び色度は容易に上昇することから、上記基準を満たすことが必要である。また、紫外線吸光度に関しては $0.125 \text{ abs.}/10\text{mm}$ 以下であれば、紫外線透過率が 75%以上を確保できる (表-3)。

また、鉄、硬度及びマンガンは、中圧ランプを使用する場合に波長 $175\sim 203\text{nm}$ の紫外線 (オゾン線) が水中の酸素原子を解離して生成したオゾンが、強力な酸化力によって鉄やマンガン酸化し、ランプスリーブ表面に酸化物として付着して透過率を低下させる要因になることから、表-2の目安以下であることが望ましい。

また、臭化物イオンと残留塩素が存在する水に紫外線を照射した場合に臭素酸の生成が促進される可能性があるため、塩素注入の後段に紫外線処理設備を設置する場合は、処理対象水中の臭化物イオンに注意する必要があるが生じる場合がある。(「3. 紫外線処理設備の導入位置」を参照すること)

表-2 紫外線照射を妨げる水質要因

紫外線照射を妨げる要因	水質項目	知見
水中の懸濁物質、溶解成分による紫外線透過率の低下	濁度 色度等	水道水質基準を満足するレベル（濁度2度、色度5度）では特に問題とならない
紫外線吸収物質による紫外線照射強度の低下	鉄 亜硫酸 亜硝酸 フェノール等	紫外線透過率が75%以下の水（紫外線吸光度として0.125 abs./10mm以上）の水に対しては、紫外線照射を適用すべきでない。
ランプスリーブの表面への付着による透過率の低下	硬度 鉄 硫化水素 マンガン	鉄が0.1mg/L以上、硬度140mg/L以上の水に対しては適用しないことが望ましい。 マンガンについては、水道水質基準（0.05mg/L）を満足するレベルでは特に問題とならない。

表-3 紫外線吸光度と紫外線透過率の関係

紫外線照射の適用性	紫外線吸光度	紫外線透過率
最適	0.022 abs./10mm	95%
適	0.071 abs./10mm	85%
不適	0.125 abs./10mm	75%

3. 紫外線処理設備の導入位置

原水の状況及び処理プロセスにおける他の処理設備の位置を考慮し、処理対象水が適用可能な水質を満たすことが可能な位置に設ける。例えば、除鉄・除マンガン処理を行う場合は、この施設の後段に紫外線を設置することが望ましい。

塩素注入の後段に紫外線処理設備を導入する場合は、紫外線照射により生成する臭素酸が問題とならないことを確認する必要がある。

○留意事項

- ・より安全性を高めることを目的として、原水または返送水に紫外線処理設備を導入する場合には、清澄な水よりも紫外線透過率が低下すると考えられることから、必要照射量を確保するためにランプの出力を高いものにするか、ランプ本数を多くする必要がある。
- ・塩素を含む水に紫外線を照射すると塩素が分解するが、 $10\text{mJ}/\text{cm}^2$ 照射したときの塩素濃度の低下はわずか $0.02\sim 0.03\text{mg}/\text{L}$ 程度であり、残留塩素の観点からは、塩素消毒設備の前段、後段のいずれの位置でも適用可能である。
- ・臭化物イオン及び残留塩素が存在する水に紫外線を照射した場合に臭素酸の生成が促進される可能性がある。臭素酸の生成量は、臭化物イオン及び残留塩素の濃度が高い、紫外線照射量が多い、また、水温が高いほど多くなるものと考えられる。このため、塩素注入の後段に紫外線処理設備を導入しようとする場合は、実験による臭素酸の生成量の調査や、処理対象水中の臭化物イオンの存在状況の把握等から、生成する臭素酸により水質に影響を与えることがないことを確認する必要がある。
- ・既にろ過施設を導入している浄水施設であって、かつ、ろ過水出口の濁度を 0.1 度に常時確保することが困難な場合には、クリプトスポリジウム等の処理の確実性を向上させるため、当該ろ過施設の後段に紫外線処理設備を導入することとしてもよい。

4. プロセス及び装置設計上の留意点

対象となる施設の規模、処理対象水の水質に応じた基本構成、設備仕様とすること。

- 1) 適正なランプ照射強度を持つ紫外線ランプを選定すること。
- 2) 紫外線照射槽は水流の偏りのない、所定の滞留時間が得られる構造のものであること。
- 3) 十分に紫外線が照射されていることを常時確認可能な紫外線強度計を設置すること
- 4) 原水の常時測定が可能な濁度計を設置すること。ただし、過去の水質検査結果等から水道の原水の濁度が2度に達しないことが明らかである場合を除く。
- 5) 計画浄水量を基準に、将来の水量増加等も加味した処理水量で計画すること。
- 6) 紫外線照射槽を二つ以上の複数基に分けて設置し、一つの設備が故障しても最低限の処理水量が得られる設計とすることが望ましい。
- 7) 地震時の揺れ対策やランプ本体や保護管の破損防止措置をとること。また、停電時の対策として非常用電源対象設備を設けることが望ましい。
- 8) 水質、水量の計測設備を設置し、効率的な運転、信頼性向上を図ることが望ましい。なお、設計にあたっては、関連する法令や基準、水道施設設計指針等に準拠すること。

(1) 処理対象水の紫外線透過率

紫外線照射槽上流部での凝集沈澱、ろ過などの浄水プロセスは、紫外線透過率を変動させ、照射効果に影響を与える。これらの影響をプロセス毎に把握し、紫外線照射槽流入水について、最も悪化した場合の水質、性状（253.7nm 紫外線透過率、濁度、色度、水温等）を把握し、その水質に合わせた紫外線照射量、ランプ仕様を選定する。

また、オゾン処理によって有機物が酸化するため紫外線透過率は増加する。ただし、紫外線照射槽内にオゾンが残留すると紫外線透過率が低下するため、残留オゾンは十分に消失させる必要がある。

(2) ランプ・ランプスリーブの汚染／劣化係数

スリーブ表面の汚れの蓄積及びランプの物理的劣化によって、紫外線照射量は次第に低下する。これらの影響を加味したランプ、ランプスリーブの汚染／劣化係数を定め、紫外線照射槽の設計に盛り込み、適切な容量の設備を計画する必要がある。

例えばランプ汚染／劣化係数を0.5とした場合、初期紫外線ランプ出力の50%の出力で設計紫外線照射量を達成できるランプ（またはランプの数）を備えた紫外線照射槽を選定することになる。ランプの汚染／劣化係数は、通常、保証紫外線ランプ寿命（5,000時間など）とともに設定される。以下に設定例を示す。

例) 紫外線照射量の汚染/劣化係数の設定 (低圧紫外線ランプの場合)

- ・ ランプ寿命 (1年間) : 0.7

ランプ劣化により、1年間の稼動で出力は初期値の約70%に低下する

- ・ 石英管スリーブの汚れ (自動洗浄機構付) : 0.9

自動洗浄機構がない場合、汚染係数はさらに小さい値を採用する

- ・ 水温変動 (10~30℃) : 0.9

製品によって若干異なるが、20℃付近を最大値として、低水温、高水温の両側でランプ強度は低下する

これらの汚染/劣化係数を乗じ、総括的な係数とする。

$$0.7 \times 0.9 \times 0.9 = 0.567$$

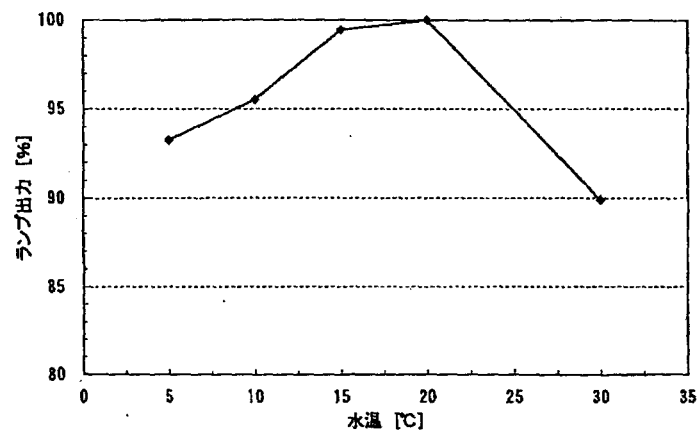


図-1 低圧紫外線ランプ出力の水温依存性

(3) 装置の形状に関する留意点

効果を発揮するための必要な紫外線照射量は、紫外線強度 (mW/cm²) と照射時間 (s) の積で表される。実装置においては、装置内のランプ配置と原水紫外線透過率によって決定される紫外線強度分布と装置内を通過する水の滞留時間分布によって、処理対象水が受ける紫外線照射量が決定される。

浄水処理においては、設置面積が少なく済む、空気由来の汚染の心配がない、作業従事者への紫外線曝露の危険性が低い、紫外線ランプユニットの装着が単純であるなどの理由から閉管路型が採用される場合が多い。

処理対象水が紫外線強度の低いところを設計値より短い滞留時間で通過すると、設計値より少ない紫外線照射量となるため、装置内の紫外線強度及び装置内を通過する水の滞留時間はできるだけ均一であることが望ましい。

装置内を通過する水の滞留時間の分布は、入口、出口形状が大きな影響を与えることが知られており、流れが偏るおそれのある場合には、整流板などを設置して流れを調整する必要

がある。

(4) 計画浄水量

必要な紫外線照射量を確保するために、浄水場の時間最大浄水量（処理水量）と原水の水質を正確に把握しておく必要がある。一般的に浄水量は季節変動、日間変動があり、紫外線照射槽の所期の性能を常時得るためにはこれらを把握し、さらに将来計画も加味した計画浄水量を設定する必要がある。

(5) 安全対策

紫外線照射槽は、2系列以上の複数基に分けて設置し、全体を停止することなしに保守・点検作業が可能な設備としておくことが望ましい。一つの系列が停止しても、残りの系列で日平均浄水量が得られるように、最大処理水量を設定することにより、給水上の支障はないと考えられる。

また、ランプ交換を短時間で容易に行える構造の紫外線照射槽を選定することが望ましい。

紫外線源として水銀ランプが用いられるため、ランプ破損時には水銀が漏出し、浄水はもとより、後段の施設を汚染する可能性が懸念される。対策として、地震時の揺れ歪緩衝措置やランプ本体もしくは保護管の破損防止措置を行うこととし、後段に貯留槽を設置すれば、さらに安全性が高まる。

また、停電時に未処理水が流出することを防止するため、浄水プロセス機器と同様の非常用電源対象設備とすることが望ましい。

(6) 運転制御

以下のような運転制御を組み込むことで効率的な運転、信頼性の向上を図ることができる。

- ・ ランプ寿命を考慮した調光制御（段階的に電圧を上げ、紫外線照射量を調整）
- ・ 流量に比例した紫外線照射量制御
- ・ 紫外線照射量の自動制御（原水の紫外線透過率と流量に応じ、紫外線照射量が一定になるよう自動制御）
- ・ 紫外線照射槽の複数並列設置による、異常時の自動切り替え
- ・ 異常時（温度、圧力、流量、電流等）の緊急遮断弁設置

(7) 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。この強度計を複数使用することにより、照射槽内の様々な場所の照射量を確認できる。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（汚染）の影響を受ける。また、強度計の位置によっては、水の紫外線吸光度の変化にも影響さ

れる。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、中圧水銀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、253.7nm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。

紫外線強度計の形式は、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。

(8) 洗浄システム

ランプスリーブの洗浄には、オフライン薬品洗浄とオンライン機械洗浄がある。オフライン薬品洗浄は、紫外線照射装置を停止させたのち、洗浄液により洗浄を行うものである。ランプスリーブの洗浄に使用する洗浄液には、クエン酸、リン酸や装置メーカーの推奨する薬剤を使用する。洗浄後は、照射槽内を十分にリンスしてから運転を再開する。一方、オンライン機械洗浄では、電気または空気圧で駆動するワイパにより洗浄が行われる。ワイパには、機械ワイパと物理化学ワイパの2種類があり、機械式ワイパは、ランプスリーブに沿って移動するステンレス製ブラシやテフロンリング等で構成されている。物理化学ワイパには、ランプスリーブに沿って移動する洗浄液が充填されたリングが備わっている。リング内部の洗浄液がファウリング物質を溶解しながら、ワイパがランプスリーブ表面のファウリングを物理的に除去する。オンライン機械洗浄では、洗浄部分が完全にシールされているため、ランプスリーブの洗浄中でも装置は連続運転が可能である。

II. 運転管理

1. 取水停止

原水濁度が2度を超える場合には取水を停止すること。ただし、紫外線処理設備の前にはろ過設備を設けている場合は、この限りではない。

紫外線処理設備を運転する際には、常時監視が可能な濁度計により、原水の濁度変動に常時注意を払う必要がある。

2. 維持管理上の留意点

常に設計性能が得られるように維持管理（運転状態の点検、保守部品の交換、センサー類の校正）を適正な頻度と方法で実施すること。

(1) 性能確認と維持

①オンライン紫外線透過率モニター、紫外線強度計の確認

オンライン紫外線透過率モニターの指示値を卓上型分光光度計の値と定期的に比較し、同一であることを確認すること。確認に使用するサンプル水はオンライン紫外線透過率モニターで実施したものと同一が望ましい。

紫外線強度計は設備に取り付けられた設置強度計と基準強度計の2種類がある。設置強度計はオンライン強度計であり、紫外線強度の常時監視に用いられる。一方、基準強度計は、設置強度計の性能を評価するために使用されるオフライン強度計である。設置強度計の劣化の有無を評価するためには基準強度計の特性が劣化していないことを確認しておく必要がある。

これらの紫外線測定器の共通事項として、センサー受光部の曇り、汚れの有無、ランプ、センサー使用時間を確認し、定期的に洗浄、校正、交換を行うことが求められる。

②流量の確認

紫外線照射槽内の流量の設計値からの乖離（低下あるいは増大）、ユニットごとに設定流量からのずれがないかの確認を行うこと。差圧を用いて流量分割を確認している場合、圧力計の精度を定期的に確認する。

③ランプの確認

点灯を確認するとともに、ランプ運転時間（ランプ種類ごとの径時特性）、出力低下（許容限界）から交換時期を把握にする。図-2、3に示すように、ランプの種類により、出力低下の状況が異なることに留意する。消灯もしくは初期出力の70%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。

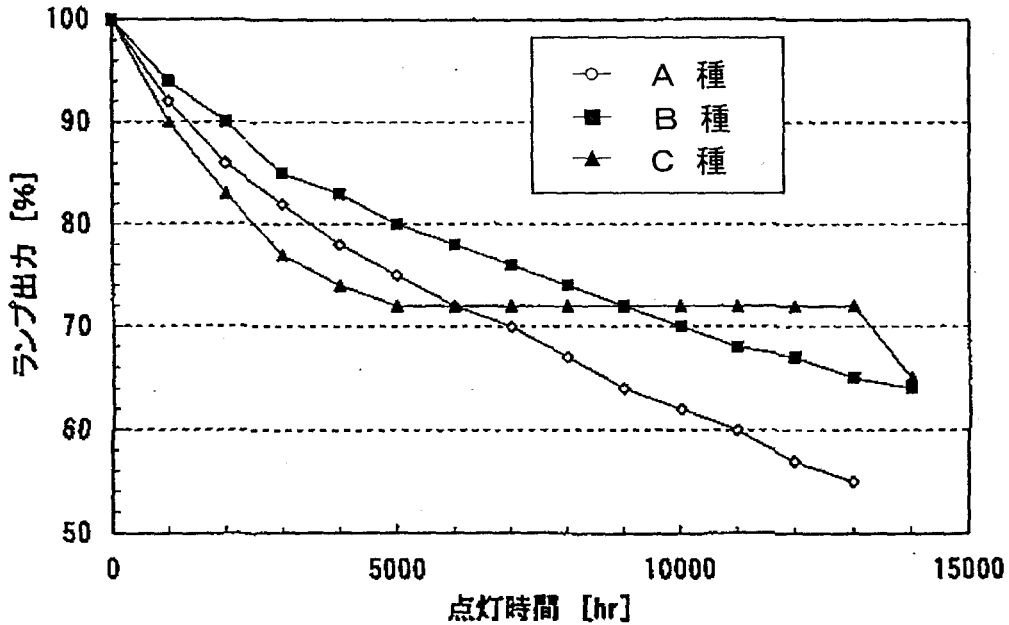


図-2 低圧水銀ランプの点灯時間とランプ出力の関係 (例)

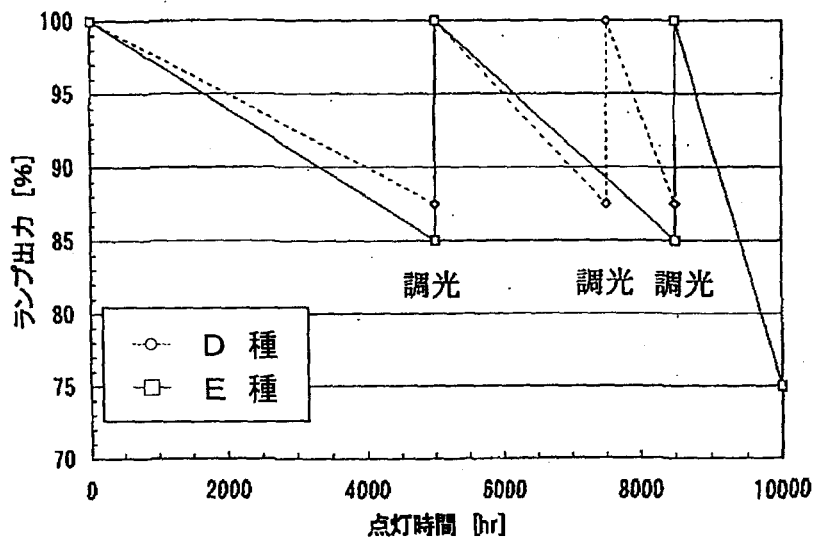


図-3 中圧水銀ランプの点灯時間とランプ出力の関係 (例)

※85%、87.5%に低下した時点で調光を行い、ランプ出力を調整している。

④ランプスリーブの洗浄

オンライン機械洗浄では、機械的拭き取りが一般的であるが、他にも超音波洗浄、高圧水洗浄、空気洗浄、化学洗浄（硫酸、塩酸など）などがある。これらは、自動洗浄とすることが望ましい。図-4にブラシによる機械的ふき取り洗浄（3日/日）の効果を示す。

照射対象水の水質あるいは紫外線照射槽設置位置によってはランプスリーブ表面にマンガン等の酸化物スケールが付着することがあるため、ランプスリーブの洗浄を適切な頻度で行う等、付着物による影響を予防する措置を講じること。

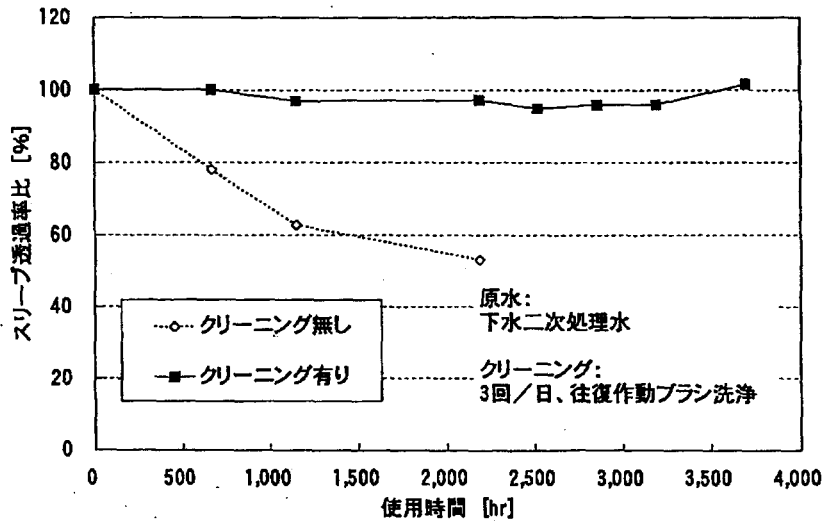


図-4 65W 低圧水銀ランプ装置における使用時間とランプスリーブ汚れの関係（例）

⑤紫外線照射槽内の温度確認

紫外線ランプは高温で動作するため、過熱を防ぐためには長時間の点灯は流水がある時に限ることが必要である。また、紫外線照射槽内にエアポケットが生じると槽内の温度が上昇する。

照射槽内の流量、水温を定期的に監視し、異常が発生した場合には紫外線照射槽を速やかに停止し確認することが求められる。

⑥停止時の処置

紫外線照射槽内が満水で停止している場合、スリーブが汚染される場合がある。オンライン機械洗浄を備えた紫外線照射槽は、処理停止中であってもスリーブの洗浄を継続して行うことが望ましい。また、一週間以上停止する場合は、紫外線照射槽の水抜きを検討する。また、30日以上の上長期間の停止後は、スリーブの薬品洗浄を実施することが望ましい。反応層の水抜き時には、照射槽内部の点検、沈殿物の排出・清掃も同時に行う。

冬季における長時間停止時においては、凍結による損傷が考えられるため、紫外線照射槽内部の水を抜く等の凍結対策を実施する必要がある。

(2) 日常点検

表-4に主要な日常点検項目と頻度の例を示す。

表-4 紫外線処理設備の日常点検項目例

点検項目	実施内容	頻度例
オンライン紫外線透過率モニタ	指示値の確認	毎日
	校正	1回/週
	洗浄	メーカー指定
照射槽, スリーブ, ワイパ	漏れ、キズ、動作確認	1回/月
紫外線強度計	指示値の確認	毎日
	校正	1回/月
	交換	随時
薬品洗浄	効果確認	1回/月
洗浄薬液タンク	確認	1回/半年
基準強度計	校正	1回/年
漏電遮断器	遮断試験	1回/年
流量計	校正	メーカー指定
ランプ	点灯確認, 交換	紫外線照射強度が初期値の70%値に低下または設計寿命時間運転時
流量監視用圧力計	動作確認	メーカー指定
オンライン洗浄駆動機構	動作状態確認	メーカー指定
安定器	検査	メーカー指定
制御盤冷却ファン	交換	メーカー指定
制御盤吸気フィルタ	清掃	メーカー指定
照射槽内部	点検, 沈殿物の排出	1回/年

(3) 安全管理

紫外線は人体に直接照射されるとその部分の細胞に異常が生じ、損傷を受ける。短時間であっても人体露出部分への紫外線の直接照射を避ける必要がある。人体の中で特に目と皮膚は紫外線により影響を受けやすい。目の水晶体蛋白質は紫外線を吸収すると酸化凝集するため長年月にわたる紫外線の吸収が白内障の原因ともなる。紫外線ランプを直視した場合の一般的な損傷は角・結膜炎である。

ランプスリーブの洗浄やランプ交換を行う際は紫外線ランプを消灯する。点灯時に作業する必要がある場合には手袋や紫外線保護マスク等を着用する。

(4) 予備部品

施設内に保管しておくべき主な予備部品（定期的あるいは異常時に交換する部品）を表-5に示す。

表-5 標準予備部品

番号	品名	備考
1	紫外線ランプ	劣化あるいは玉切れ時の交換用
2	ランプスリーブ	汚染、くもり発生時の交換用
3	パッキン類	メンテナンス時交換
4	ヒューズ	同上
5	ワイパーブレード	同上

表-6 紫外線システムの主要構成部の設計と性能保証例

構成部	設計寿命*1	保証寿命*2
低圧ランプ (LP および LPHO)	12,000 時間	8,000-12,000 時間
中圧 (MP) ランプ	10,000 時間	4,000-8,000 時間
ランプスリーブ	8~10 年	1~3 年
紫外線強度計	3~10 年	1 年
紫外線透過率モニタ	3~5 年	1 年
洗浄システム	3~5 年	1~3 年
安定器	10~15 年	1~3 年

*1 予想稼働期間

*2 材質、製造、運転条件の変動を計上

(5) 使用済みランプの廃棄、リサイクル回収

ランプは「有害ごみ」として処分する場合と、「有害資源ごみ」として処分する場合に大別される。環境影響負荷低減の観点から、使用済みランプの処分は有害資源ごみとして分別回収する（表-7参照）。なお、ランプ交換作業中においてランプの破損には十分注意して作業を行うことが求められる。

表-7 低圧紫外線ランプの構成成分例

構成部材名		主成分又は形態
外管 (石英硝子)		二酸化ケイ素
口金	樹脂部 (混合物)	不飽和ポリエステル
	ピン部 (ニッケルメッキ)	ニッケル
		銅 亜鉛
電極	フィラメントコイル	タングステン
	水銀ディスペンサー	ジルコニウム
		アルミニウム
	導線	水銀 モリブデン ニッケル
封入ガス		アルゴン ネオン

[引用文献]

1. Guidelines for Drinking-water Quality, Third Edition, 2004, WHO