

図2 中圧照射装置の概要

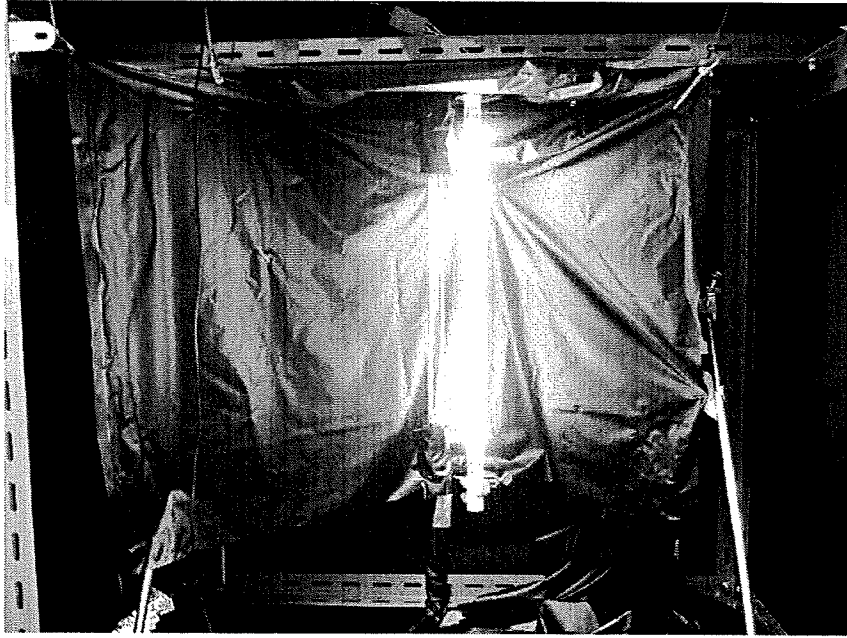


写真1 低圧ランプによる紫外線照射の状況

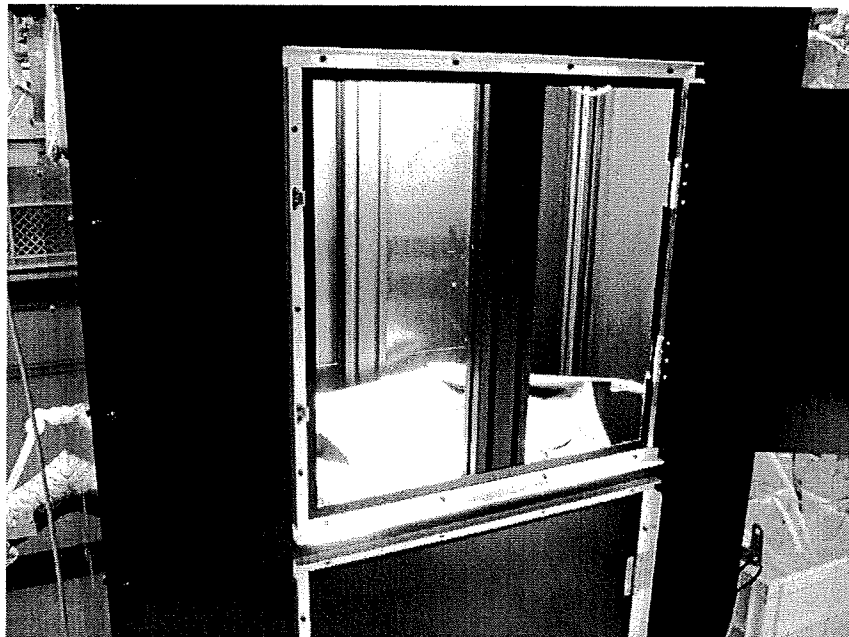


写真2 中圧ランプによる紫外線照射の状況

(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 試験は紫外線照射装置内に 10.0 L の MS2 ファージ液を循環させて所定時間紫外線照射した後にファージ生残率を求めることによって行った。そして、RED [MS2] は式 1 により算出した。ここでは、MS2 ファージの不活化速度定数 (D_0) を 9.2 (実測値) とした。なお、MS2 ファージ液は純水で調整したリン酸緩衝生理食塩水にファージ原液を加えて調製した。

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 5.1 mW/cm^2 、中圧が 11.8 mW/cm^2 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 ファージの不活化速度定数、 S_0 は MS2 ファージの生残率である。

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

$$\text{低圧: } I \text{ (mW/cm}^2\text{)} = (4.1 \times 10.0 \times 1000) / (1 \times 60 \times \pi (2.2/2)^2 \times 35) = 5.1$$

$$\text{中圧: } I \text{ (mW/cm}^2\text{)} = (5.4 \times 10.0 \times 1000) / (1 \times 60 \times \pi (2.2/2)^2 \times 20) = 11.8$$

ここで、 I は紫外線強度 (mW/cm^2)、 J は紫外線照射量 (RED 値、 mJ/cm^2)、 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。

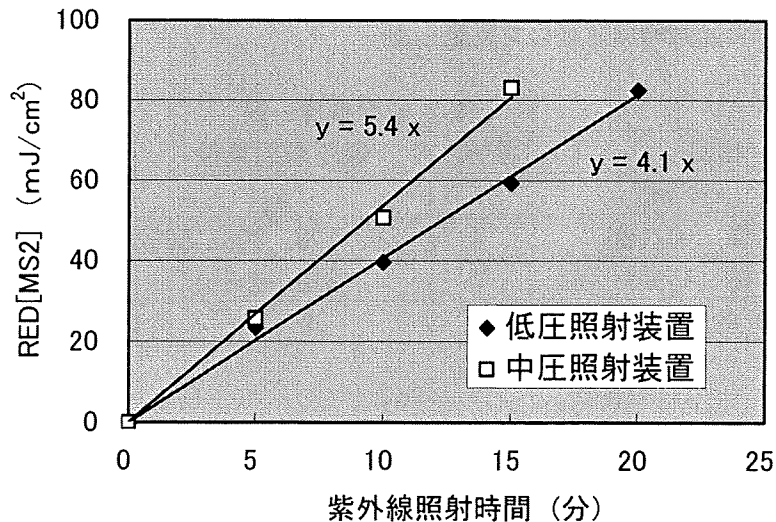


図 3 各照射装置における紫外線照射時間と換算紫外線照射量 RED [MS2] の関係

(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 70% 程度であったが、100 mJ/cm² 照射後は低圧 74.2、中圧 74.2% まで増加した。また、条件 2 の紫外線透過率は安定して高かった。

表 7 に照射条件を示す。紫外線強度 I は低圧が 5.1 mW/cm²、中圧が 11.8 mW/cm² であり、照射する紫外線照射量は 50 mJ/cm²、100 mJ/cm²、200 mJ/cm² および 500 mJ/cm² である。試験水は 10 L 調製し、照射開始前、各照射量照射時にそれぞれ 0.5 L ずつ採水した。そのため、試験水量 V は照射開始時が 9.5 L であり、その後の採水時ごとに 0.5 L ずつ減少した。これらの値を式 3 に代入し、照射時間 t を求めた。なお、ここでは紫外線透過率を考慮した照射時間の補正は行っていない。

$$t \text{ (sec)} = J / (I \times (V_R / V)) \quad \text{(式 3)}$$

$$= (J \times V) / (I \times V_R)$$

なお、本試験では、試験水に紫外線を照射しないで装置内を循環する対照試験を実施した。この対照試験の反応時間は低圧ランプで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。

表 6 紫外線照射前後の紫外線透過率 (%)

条件	照射前	対照*		低圧		中圧	
		100 mJ/cm ²	500 mJ/cm ²	100 mJ/cm ²	500 mJ/cm ²	100 mJ/cm ²	500 mJ/cm ²
条件 1	70.3	72.1	73.6	74.2	78.7	74.2	77.7
条件 2	99.4	99.4	99.2	99.6	99.2	99.5	98.9

※波長 254nm、10mm セルの値

※各試験終了後 1 時間以内に測定した

※対照は低圧ランプの照射時間放置して測定した

表 7 照射条件一覧

項目	記号	低圧照射条件	中圧照射条件
紫外線強度 (mW/cm ²)	I	5.1	11.8
紫外線照射量 (mJ/cm ²)	J	50、100、200、500	50、100、200、500
試験対象水量 (初期) (L)	V	8.0~9.5	8.0~9.5
照射管容積 (L)	V _R	0.133	0.076

表 8 反応時間

照射量 (mJ/cm ²)	照射容量 (L)	反応・照射時間 (分)		
		対照	低圧ランプ	中圧ランプ
50	9.5	11.7	11.7	8.8
100	9.0	22.7	22.7	17.2
200	8.5	43.6	43.6	33.0
500	8.0	102.6	102.6	77.6

反応・照射は次亜塩素酸ナトリウム添加 30 分後に開始した。

対照はランプを点灯せずに、低圧ランプ紫外線照射装置内を循環して反応した。

4. 試験結果

条件1の試験結果を表9～11に、条件2の試験結果を表12～14に示す。

表9 条件1、対照の試験結果

測定項目		対照 (分)				
		0	11.7	22.7	43.6	102.6
		0mJ/cm ² 相当 低圧	50mJ/cm ² 相当 低圧	100mJ/cm ² 相当 低圧	200mJ/cm ² 相当 低圧	500mJ/cm ² 相当 低圧
総トリハロメタン	mg/L	0.040	0.052	0.059	0.070	0.077
クロロホルム	mg/L	0.023	0.027	0.029	0.033	0.035
ブロモジクロロメタン	mg/L	0.013	0.019	0.022	0.028	0.032
ジブロモクロロメタン	mg/L	0.004	0.006	0.007	0.009	0.010
プロモホルム	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
臭素酸	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
TOC	mg/L	2.63	2.62	2.66	2.60	2.64
残留塩素	mg/L	1.0	0.9	0.6	0.4	0.1
塩素酸	mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05

対照試験は低圧ランプ照射装置を用い、低圧ランプ紫外線照射試験の照射時間と同じ時間、紫外線を照射せずに反応した。

表10 条件1、低圧ランプ紫外線照射の試験結果

測定項目		低圧ランプ紫外線照射量 [mJ/cm ²]				
		0	50	100	200	500
総トリハロメタン	mg/L	0.046	0.083	0.103	0.100	0.072
クロロホルム	mg/L	0.025	0.038	0.049	0.049	0.039
ブロモジクロロメタン	mg/L	0.017	0.036	0.045	0.043	0.029
ジブロモクロロメタン	mg/L	0.005	0.009	0.010	0.008	0.004
プロモホルム	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
臭素酸	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
TOC	mg/L	2.68	2.61	2.52	2.49	2.39
残留塩素	mg/L	1.0	0.2	0.0	0.0	0.0
塩素酸	mg/L	<0.05	0.05	0.06	0.07	0.08

表 11 条件 1、中圧ランプ紫外線照射の試験結果

測定項目		中圧ランプ紫外線照射量 [mJ/cm ²]				
		0	50	100	200	500
総トリハロメタン	mg/L	0.036	0.053	0.068	0.092	0.074
クロロホルム	mg/L	0.019	0.026	0.032	0.043	0.038
ブロモジクロロメタン	mg/L	0.013	0.021	0.028	0.039	0.029
ジブロモクロロメタン	mg/L	0.004	0.006	0.008	0.009	0.007
プロモホルム	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
臭素酸	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
TOC	mg/L	2.61	2.57	2.59	2.50	2.41
残留塩素	mg/L	0.9	0.5	0.2	0.0	0.0
塩素酸	mg/L	<0.05	0.05	0.07	0.08	0.08

表 12 条件 2、対照の試験結果

測定項目		対照				
		0	11.7	22.7	43.6	102.6
		低圧 0mJ/cm ² 相当	低圧 50mJ/cm ² 相当	低圧 100mJ/cm ² 相当	低圧 200mJ/cm ² 相当	低圧 500mJ/cm ² 相当
臭素酸	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
TOC	mg/L	0.08	0.11	0.11	0.14	0.19
残留塩素	mg/L	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9
塩素酸	mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

対照試験は低圧ランプ照射装置を用い、低圧ランプ紫外線照射試験の照射時間と同じ時間、紫外線を照射せずに反応した。

表 13 条件 2、低圧ランプ紫外線照射の試験結果

測定項目		低圧ランプ紫外線照射量 [mJ/cm ²]				
		0	50	100	200	500
臭素酸	mg/L	<0.001	0.002	0.005	0.011	0.026
TOC	mg/L	0.07	0.08	0.19	0.19	0.17
残留塩素	mg/L	1.0	0.9	0.9	0.9	0.6
塩素酸	mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

表 14 条件 2、中圧ランプ紫外線照射の試験結果

測定項目		中圧ランプ紫外線照射量 [mJ/cm ²]				
		0	50	100	200	500
臭素酸	mg/L	<0.001	0.001	0.003	0.007	0.019
TOC	mg/L	0.06	0.08	0.11	0.11	0.15
残留塩素	mg/L	1.0	0.9	0.9	0.9	0.7
塩素酸	mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

(1) 条件1 (TOC 3 mg/L) について

残留塩素と TOC 成分が反応し THM が形成される。これは紫外線照射によって促進される。残留塩素が消失した時点、低圧では照射量 100 mJ/cm²、中圧では照射量 200 mJ/cm² が THM 生成量のピークとなり、以降は、THM は減少に転じる (図 4 及び図 5)。総 THM の内訳をみると、クロロホルム、ブロモジクロロメタンの生成量が多い。ジブロモクロロメタンの生成量は少量、ブロモホルムは生成されていない (図 6)。

臭素酸は生成されない。残留塩素が TOC 成分との反応に優先的に消費されるため、臭素酸の生成が抑制されると考えられる (図 8)。

塩素酸は紫外線照射によってわずかであるが増加する。照射量が高いほど塩素酸生成量が増加する (図 7)。

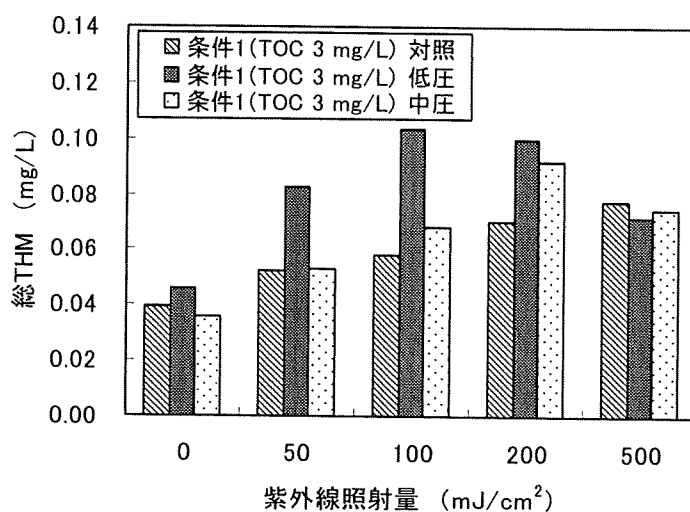


図 4 紫外線照射時の総トリハロメタンの挙動 (条件 1)

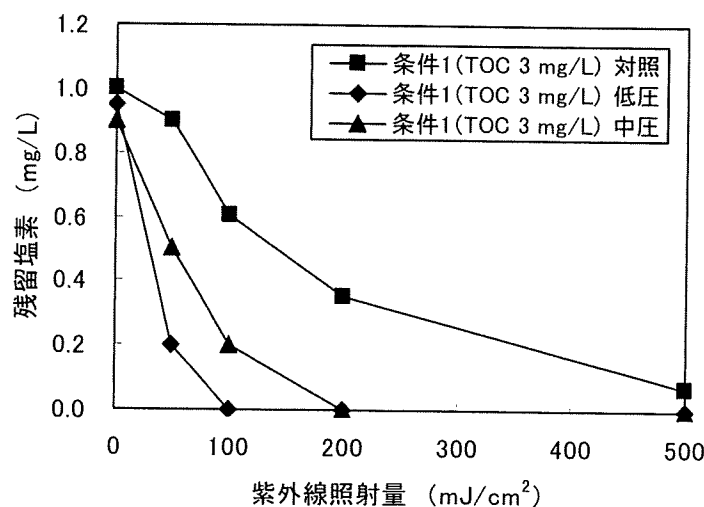


図 5 紫外線照射時の残留塩素の挙動 (条件 1)

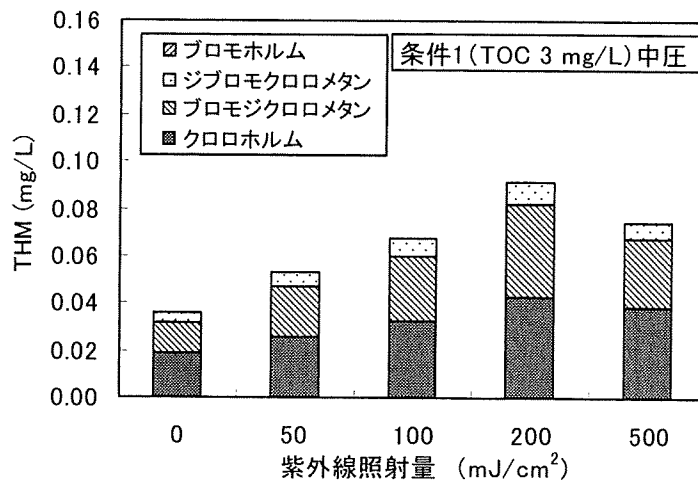
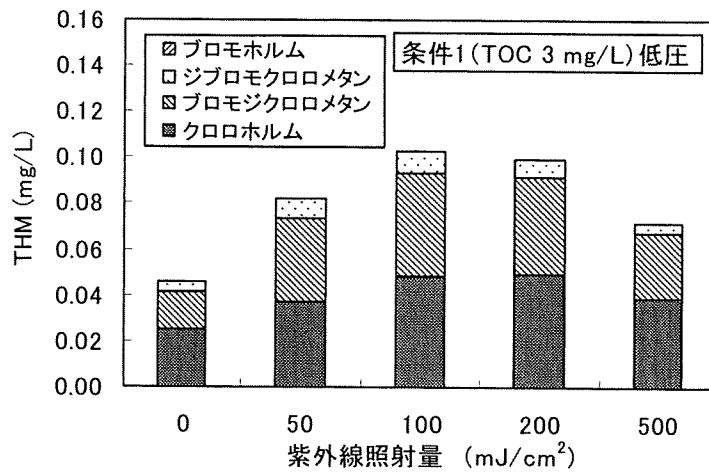
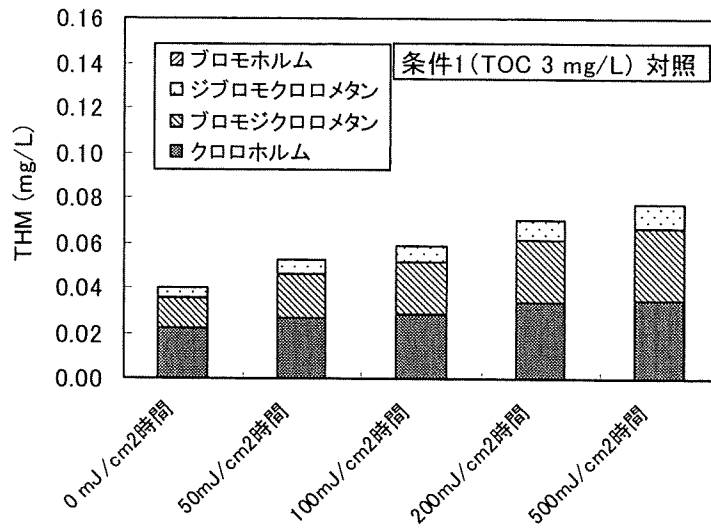


図6 紫外線照射時のトリハロメタンの挙動 (条件1)

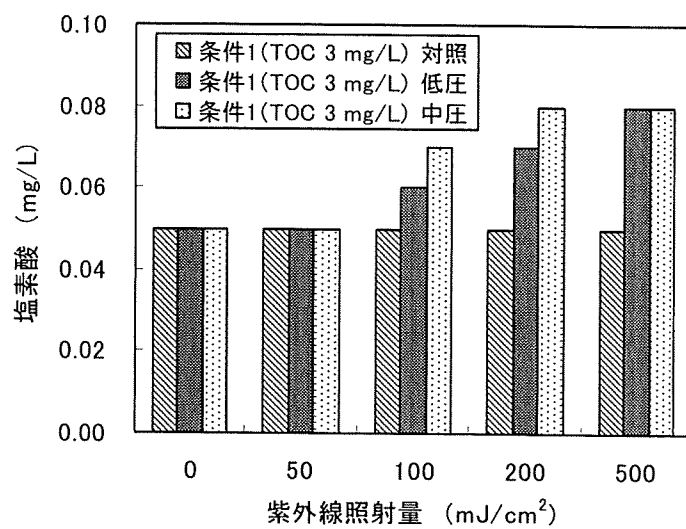


図7 紫外線照射による塩素酸の生成 (条件1)
 定量下限値 (0.05 mg/L) 以下は 0.05 として示した

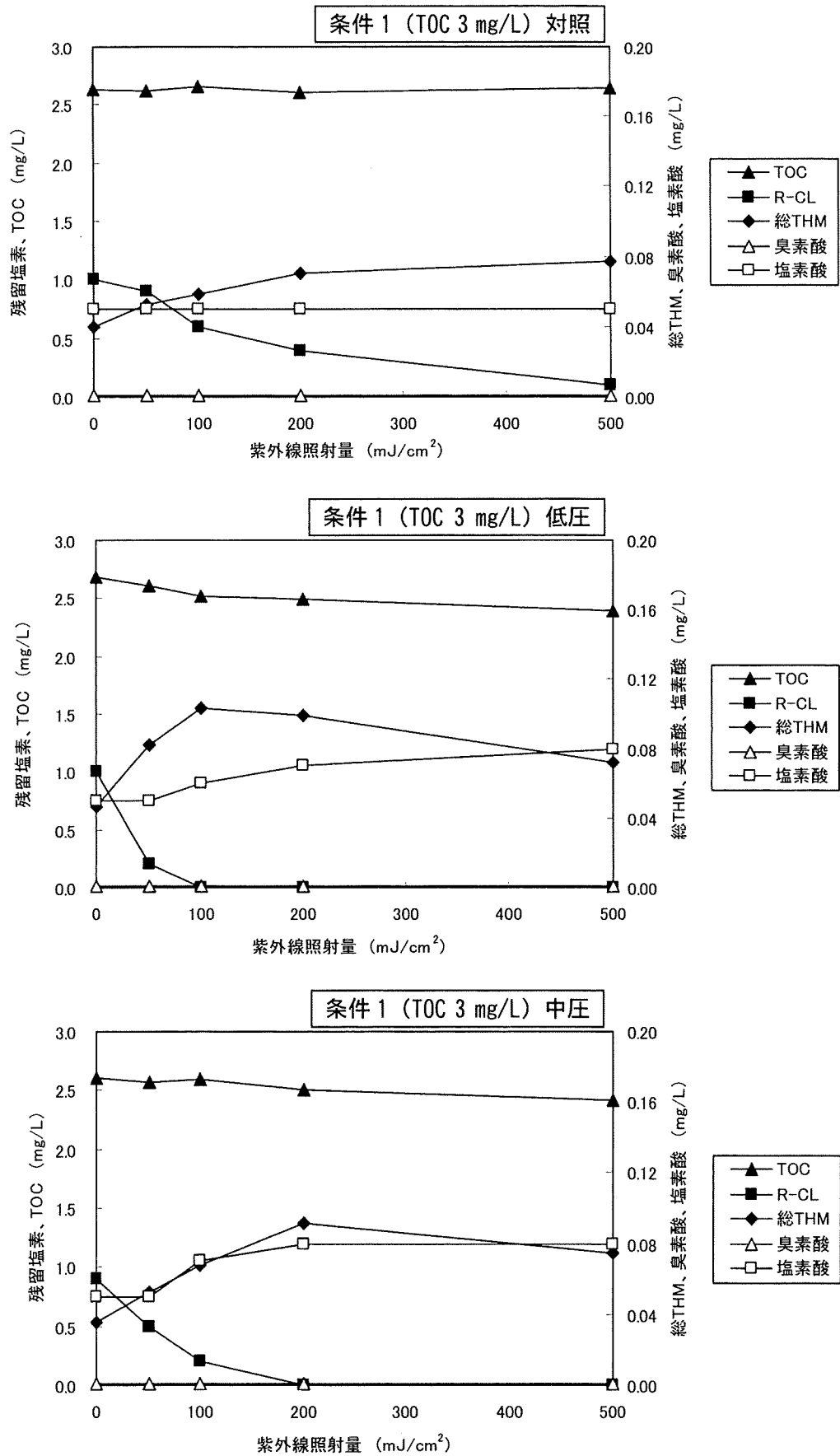


図 8 紫外線照射量と残留塩素、TOC、総 THM、臭素酸、塩素酸 (条件 1)

(2) 条件2 (TOC 0 mg/L) について

TOC 成分が無く、臭化物イオンと残留塩素が存在する場合には、紫外線照射によって臭素酸が生成される。照射量が高いほど臭素酸生成量が増加する (図 9)。残留塩素は臭素酸の生成のために消費される (図 10)。

塩素酸は紫外線照射によって増加しない (図 11)。

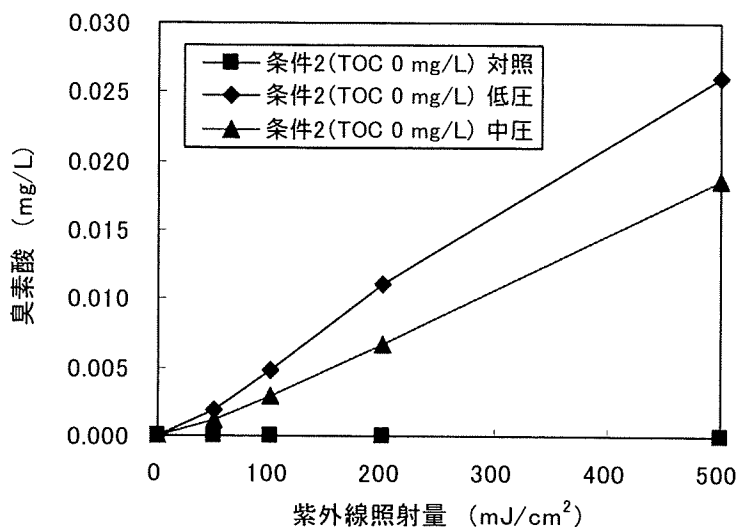


図 9 紫外線照射による臭素酸の生成 (条件 2)

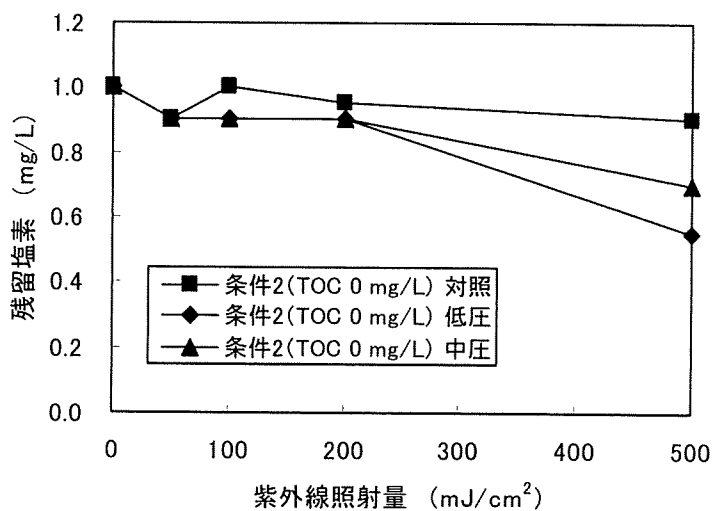


図 10 紫外線照射時の残留塩素の挙動 (条件 2)

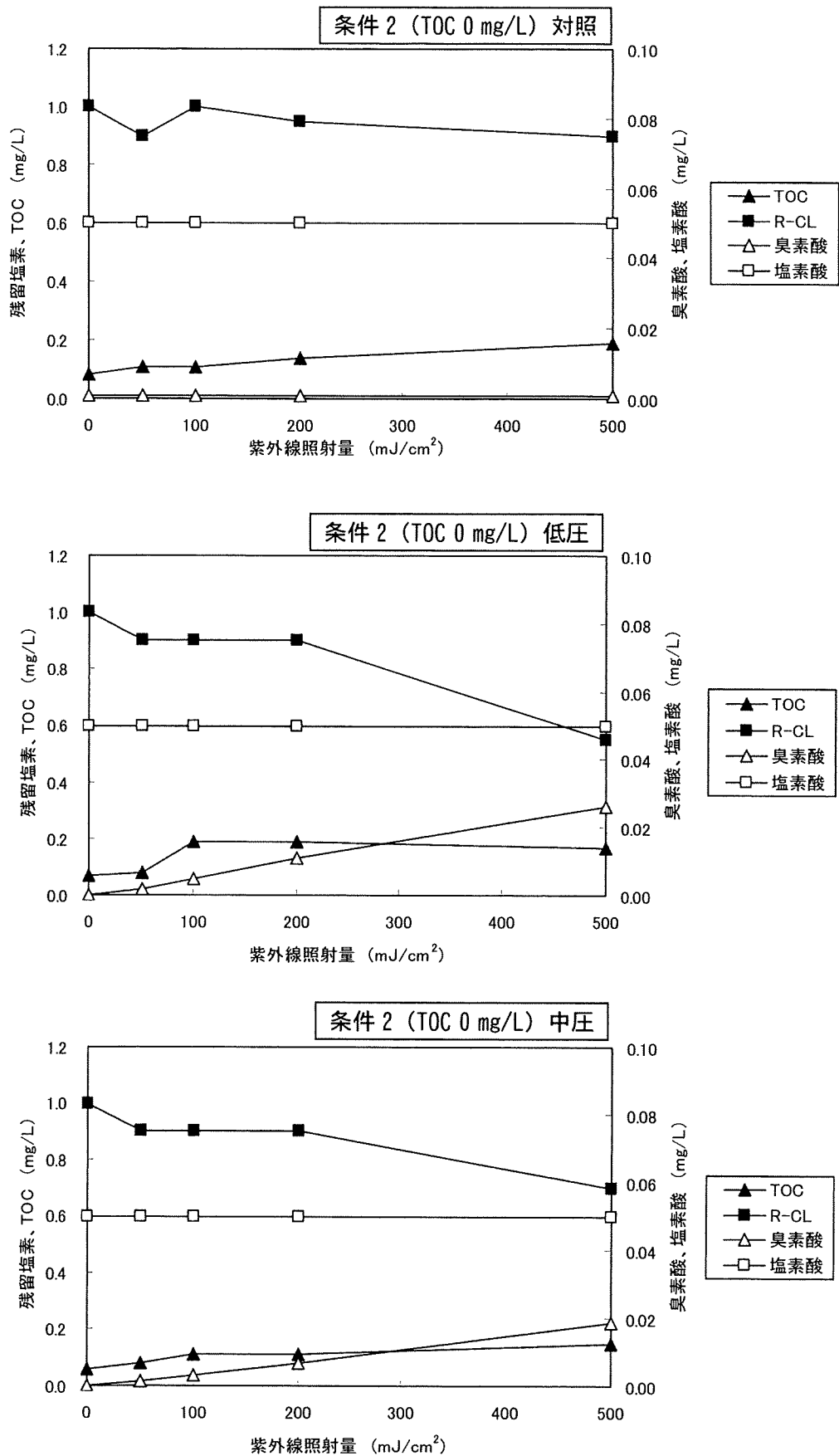


図 11 紫外線照射量と残留塩素、TOC、臭素酸、塩素酸 (条件 2)

5. 考察

(1) 臭素酸について

臭化物イオンと残留塩素の共存下で紫外線を照射すると臭素酸が生成される。臭素酸の生成量は、臭化物イオン濃度、残留塩素濃度、紫外線照射量、pH に依存する¹⁾²⁾。また、有機物としてフミン酸を添加すると、フミン酸濃度に依存して臭素酸の生成量が減少し、Br-THM の生成量が増加するという報告がある²⁾。本試験では、TOC 3 mg/L との共存下では臭素酸は生成しないという結果が得られた。対象水に TOC 成分が存在する場合には、残留塩素が TOC 成分との反応に優先的に消費され、その結果、臭素酸生成が抑制されると推測された。また、総 THM 中のプロモホルム生成量は検出限界以下であった。

浄水処理として実際に導入される紫外線照射装置（以下、実装置）における照射量の最大値は 30～40 mJ/cm² 程度と考えられる。本試験では、条件 2（TOC 0 mg/L）、照射量 50 mJ/cm² の場合、臭素酸の生成が確認されているが、その濃度は低圧 0.002 mg/L、中圧 0.001 mg/L であり、実装置において臭素酸に係る水道水質基準を十分満足できると考えられる。

水道事業体 16 箇所の平成 19 年度水質年報を用いて、水道水源の臭化物イオン濃度（年最大値）を集計したところ、測定地点 291 箇所内、約 7 割の 206 箇所が 0.2 mg/L 未満であり、0.5 mg/L 以上となる地点が 3 箇所であった。このように水道水源の臭化物イオン濃度が高い場合には留意が必要である。

(2) トリハロメタンについて

紫外線照射によって THM の生成が促進される。THM の生成が進み、残留塩素が消費された後は、THM は紫外線照射によって分解され、濃度が下がる。

本試験では、条件 1（TOC 3 mg/L）、照射量 50 mJ/cm² の場合、総 THM に係る水道水質基準 0.1 mg/L を超過していないが、低圧 0.083 mg/L、中圧 0.053 mg/L と高い値であった。理由として、TOC 成分はタンニン酸を用いて調整したが、紫外線照射前つまり塩素添加 30 分後の段階で既に総 THM が生じていること（低圧 0.046 mg/L、中圧 0.036 mg/L）、紫外線透過率は 70% 程度と紫外線照射に適さない条件であったことが挙げられる。また、このような水に対して紫外線処理を適用する場合には、前段に凝集沈澱ろ過等の前駆物質除去プロセスが必要となる。

(3) 塩素酸について

TOC と残留塩素が存在すると、塩素酸は紫外線照射によってごくわずかに増加するが、実装置における照射量では、次亜塩素酸ナトリウムの品質管理が適切に行われていれば、問題となるレベルにはならない。

6. まとめ

塩素処理の後段に紫外線処理を適用する場合には、様々な条件によって臭素酸が生成したり、THM の生成が促進される可能性がある。

今回の試験条件の臭化物イオン濃度 0.5 mg/L 以下、残留塩素 1 mg/L 以下では、実装置において臭素酸に係る水道水質基準を十分満足できることが確認できた。

今回の試験から、紫外線処理の対象水に TOC 成分が含まれる場合には、残留塩素が TOC 成分と優先的に反応して THM を生成し、臭素酸生成が抑制されると推測された。また、本試験では検証していないが、対象水の TOC 成分の濃度や pH によっても THM 及び臭素酸の生成量に差が生じることが推測される。

以上のことから、水源が地下水の場合には、紫外線処理の適用位置は塩素処理の前段が基本となる。水源が地表水の場合には、前塩素、中間塩素処理により残留塩素が存在することが考えられるので、紫外線処理の適用位置は、凝集沈澱ろ過等の後段つまり TOC 成分を極力低減した後が基本となる。

なお、通常の原水水質の範囲内では水道水質基準を超過することは考えにくい。塩素処理の後段に紫外線処理を設置する場合には、臭素酸及び THM の生成に留意が必要である。

参考文献

- 1) 出口達也、小三田栄、鹿島田浩二、佐々木賢一 (2007)、UV 照射における臭素酸生成及び透過率低減要因の評価、第 10 回日本水環境学会シンポジウム講演集、144-145
- 2) 宇佐美美穂子、鈴木俊也、矢口久美子、安田和男、永山敏廣 (2005)、塩素処理による臭素酸イオン生成条件の検討、水環境学会誌、Vol28、No. 12、729-735

2. 2 米国環境保護庁紫外線消毒

ガイダンスマニュアル 第3章（抜粋）

米国環境保護庁 紫外線消毒ガイダンスマニュアル 第3章 (抜粋)

(出典) http://www.epa.gov/OGWDW/disinfection/lt2/pdfs/guide_lt2_uvguidance.pdf

3. 紫外線設備の計画分析

本章は、紫外線消毒の計画及び予備設計段階の間に対処すべき要因に関する情報を提供する。

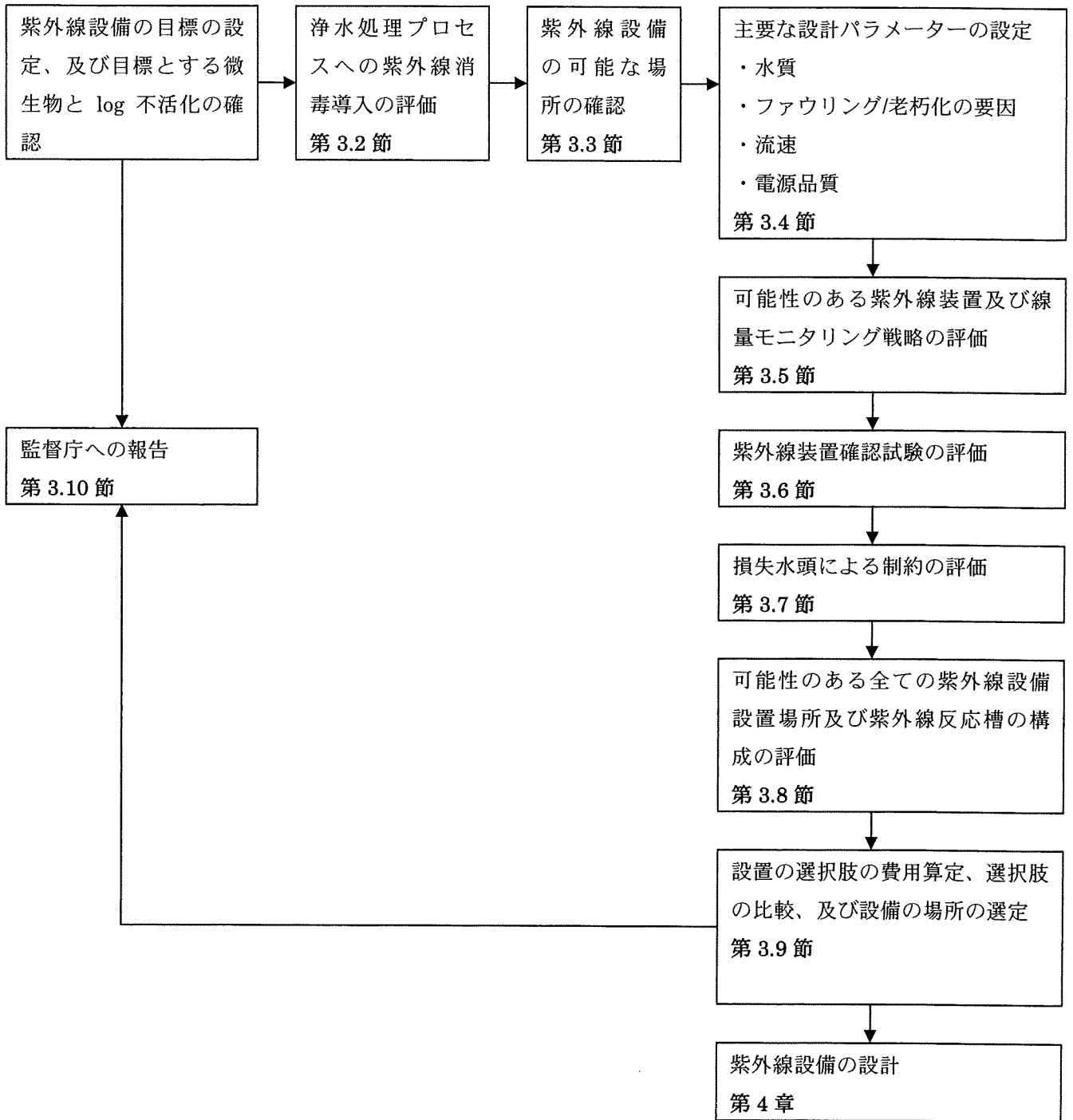
第3章は、以下を取り扱う。

- 3.1 紫外線消毒の目標
- 3.2 浄水処理プロセスへの紫外線消毒導入の評価
- 3.3 紫外線設備の可能な場所の確認
- 3.4 主要な設計パラメーターの設定
- 3.5 紫外線反応槽、線量モニタリング戦略及び操作手法の評価
- 3.6 紫外線装置確認試験の評価
- 3.7 損失水頭による制約の評価
- 3.8 紫外線設備設置場所の評価
- 3.9 予備的な費用見積もりと紫外線設備の選択
- 3.10 州への報告

紫外線設備の設計は、サイトに特有のものである。可能性のある浄水処理シナリオが広範囲であるとすれば、ここで示すようなガイダンス書類は、可能性のある全ての浄水処理条件に対応・対処できるものではない。ここで提示する情報は、健全な工学的判断という範囲の中で用いられ、ケースバイケースに基づいて適切に適用がなされるべきである。付属書 F は、様々な公共水道システムが各々の水道システムにおいてどのように紫外線消毒を行っているかを例証するケーススタディーを提示している。加えて、当該マニュアルは、紫外線技術が発展・展開し続けるであり、そして、ここで提示した情報は(マニュアル)発行日時点でみて最近のものであるという理解のもとで書かれたものである。さらに、特に記載がない限り、第3章全体を通じて、消毒される水は地表水システムからのもの(すなわち、ろ過を行った水、ろ過を行っていない原水、又は地表水の影響を直接受ける地下水)であり、長期第2次地表水処理強化規則に先立つ規制の要求事項に適合しているものとみなしている。

紫外線設備の計画及び設計プロセスを図 3.1 に示す。設計パラメーターが定められ、そして、実施上の課題が確認されれば、それらは第4章で検討される詳細設計段階に向けて合体される。

図 3.1 紫外線設備の計画のためのフローチャート例



3.1 紫外線消毒の目標

紫外線消毒設備の設計の第一ステップは、浄水処理プロセス全体に対する包括的な消毒戦略の一部としての設備の目標を定めることである。加えて、目標とする病原体、目標とする log 不活化及び対応する必要な紫外線線量が確認されなければならない。

・包括的消毒戦略

包括的消毒戦略は、消毒副生成物の形成を最少化する一方で、微生物学的リスクを低減するためのマルチバリアを提供するものである。紫外線消毒は、従来の消毒方法に対してより抵抗力のある病原体を不活化する費用対効果の高い方法を提供することにより、包括的な消毒戦略に貢献することができるツールである。また、紫外線消毒は、対塩素性病原体（例えば、クリプトスポリジウム及びジアルジア）の主な消毒法として化学薬品に取って代わり、それによって、消毒副生成物を低減することができる。消毒プロセスを大きく変更する（紫外線消毒の追加を含む。）ことを計画する公共水道システムは、消毒のベンチマークを準備し（40 CFR 141.708）、変更を行う前に州と協議しなければならないことを忘れないように。

さらに、ろ過回避クライテリアに適合しない場合においては、ろ過水の濁度に関する要求事項（給水人口 1 万人以上の公共水道システムについては 40 CFR 141.173、給水人口 1 万人未満の公共水道システムについては 40 CFR 141.551）を満たすことにより、2-log のクリプトスポリジウム除去を継続しなければならない。

(訳注)

CFR：連邦規則集 (Code of Federal Regulations)

40 CFR：環境保護 (Protection of the Environment)

40 CFR 141.173 及び 40 CFR 141.551

例えば、在来型ろ過処理（凝集沈殿・ろ過）又は直接ろ過の場合

- ・測定値の 95% が 0.3 NTU 以下であること。
- ・全てのサンプルは 1 NTU を超えてはならないこと。

・目標とする微生物と log 不活化

クリプトスポリジウム及びジアルジアの不活化のために必要な紫外線線量は、ウイルスを不活化するために必要な線量よりも少ない（表 1.4 参照）。したがって、クリプトスポリジウム及びジアルジア不活化の資本費及び維持管理費は、ウイルスに対するものよりも安い。ある研究によれば、log 除去に基づく紫外線消毒によるクリプトスポリジウム及びジアルジアの不活化の資本費は、ウイルスの紫外線消毒に関連した費用の約半分であると推計している（Cotton et al. 2002）。加えて、ウイルスの多くは、塩素によって容易に不活化できることから、ウイルス不活化のための紫外線消毒は必要ないであろう。また、より高い目標の不活化はより高い紫外線線量を必要とし、紫外線設備の設計及び費

用に影響するであろうことから、目標とする log 不活化は熟考されるべきである。それゆえに、目標とする微生物及びそれらの log 不活化レベルは、計画プロセスにおいて早期に決定されるべきである。

3.2 浄水処理プロセスへの紫外線消毒導入の評価

紫外線消毒は、設置された時、水質目標を満たす手助けとなる浄水処理プロセスの一つとなろう。したがって、紫外線消毒は浄水処理プロセス全体の文脈において評価されなければならない。これらの論点は、本節において要約されている。

3.2.1 浄水処理における紫外線消毒の効果

一般に、紫外線消毒は浄水処理プロセスで用いられる化学消毒剤に完全に代替することはできない。いくつかの理由を、以下のリストに示す。

- ・地表水システムは、配水システムにおいて残留消毒剤を保持しなければならない (40 CFR 141.72)。
- ・紫外線消毒は、在来型の塩素を基本とした消毒プロセスほど、ウイルスの不活化において効果的ではない。
- ・また、化学消毒剤は、水の中に存在する他の成分（例えば、鉄、マンガン、又は異臭味原因物質）を酸化するために必要な場合がある。
- ・水道システムによっては、沈殿池における藻類の成長を抑えるために塩素を用いている。

その結果、紫外線消毒が実施された場合であっても、一定レベルの塩素を基本とした消毒剤（塩素又はクロラミン）が通常は必要となるであろう。それゆえ、塩素を基本とした消毒剤の低減は、他の水質及び浄水処理の目標の文脈において評価されるべきである。

残留塩素が存在する水に対して紫外線消毒が用いられた時、紫外線線量、塩素の種類、紫外線光源、及び水質特性によっては、残留塩素の減少が生じることがある。Brodkorb 及び Richards は広範な紫外線線量において 0.1~0.7mg/L の残留塩素の減少を報告している。もし、紫外線装置が十分な電力変調能力を備えておらず、設計されたよりも高い線量で実際に稼動すれば、意図せずに重大な塩素減少が生じることとなる。紫外線消毒による塩素の減少を避けるためには、2つの選択肢を用いることができる。

1. 特にウイルスを目標とする時（必要とする紫外線線量はより高いことから）、もし可能であれば、塩素注入ポイントを紫外線設備の後に移動することを検討する。
2. 過大な線量及びそれに伴う塩素減少を防止するために十分な電力変調を有する紫外線装置を調達する。