

学位論文及び審査結果の要旨

横浜国立大学

氏名 加藤 康弘
学位の種類 博士(工学)
学位記番号 環情博甲第362号
学位授与年月日 平成27年3月25日
学位授与の根拠 学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号)第4条第1項及び
横浜国立大学学位規則第5条第1項
学府・専攻名 環境情報学府 環境リスクマネジメント専攻
学位論文題目 浄水処理へのオゾン適用における処理の効率化と副生成物制御に関する研究
論文審査委員 主査 横浜国立大学 教授 藤江 幸一
横浜国立大学 教授 益永 茂樹
横浜国立大学 教授 中村 由行
横浜国立大学 准教授 亀屋 隆志
横浜国立大学 准教授 小林 剛

論文及び審査結果の要旨

本論文では、原水水質負荷の高い浄水場を対象に、促進酸化処理を含めた最新のオゾン処理技術や運転監視技術を機能的に組合せ、原水水質や要求水質、ならびに省エネルギー性に配慮した先進的なオゾン注入制御指針を明らかにすることで、将来的に安全、かつ安定的な水道水供給に貢献することを目的としたものであり、論文の要旨は以下の通りである。

第1章「緒論」では研究の背景および既往の研究を整理し、本研究の目的と構成について述べた。

第2章「高効率オゾン接触槽に関する研究」では、まずオゾン接触・溶解装置に着目し、近年注目されている下降管注入式オゾン反応槽を取り上げ、その反応特性、特に浄水処理における主要な除去目的物質の一つである臭気物質の除去特性についてシミュレーションによる数値実験を行い、従来の横流式向流多段接触池との比較を行った。その結果、下降管注入式オゾン反応槽は横流式向流3段接触池に比べて高い臭気物質除去性を示すこと、下降管注入式オゾン反応槽の場合は下降管内でオゾンの溶解がほぼ完了することが明らかとなった。オゾン溶解に要する時間は全滞留時間の2.5%であり、このような下降管内における高い溶解速度により、高い除去率が達成されることが考えられた。また、下降管注入式オゾン反応槽における下降管の水理特性は、理想的な押し出し流れとみなす事ができ、下降管内滞留時間はガスホールドアップに大きく影響を受けることが示された。また、高濃度のオゾンガスを用い、ガス量を少なくすることは、オゾンの高濃度化による物質移動効率向上のみならず、下降管の滞留時間への影響が少ないという事が示された。下降管内の流動状態に基づき、液断面流速、ガス断面流速の関数として、ガスホールドアップ、及び気液接触面積算出式を導出した。

第3章「オゾン消費成分の定量評価」では、原水中の有機物質によるオゾン消費特性に着目し、HPLC(高速液体クロマトグラフィー)による分子量分画を用いた新たなオゾン消費成分の代替指標を提案し、併せて、このオゾン消費の代替指標を用いて実設備の残留オゾン濃度を予測する手法について述べた。E₂₆₀検出による分子量分布はオゾン処理の過程を良好に表現することが明らかになり、これら分子量分布に基づいたオゾン消費性物質の代替指標、及び反応槽内オゾン吸収モデルを提案した。このモデルは、特にオゾン消費速度の観点から原水中のオゾン吸収及び分解の過程を表現するものであり、水質の異なる原水についても概ね適用できることを示した。また、本モデルによるオゾン消費代々指標及び横流式接触池のオゾン吸収モデルによれば実設備概念設計が可能であることを示した。

第4章「臭素酸イオンの制御に関する研究」では、オゾン処理によるトリハロメタン生成能(THMFP)の低減反応に関して、THMFP低減特性と臭素酸イオン生成特性の関係、および臭化

物イオン濃度、水温などの因子が溶存オゾン制御値に及ぼす影響を実験的に把握し、臭素酸イオン生成抑制を主眼とした場合のオゾン処理装置フローおよび計装項目を検討した。また、第2章の結果も踏まえて、臭素酸イオン生成抑制制御を目的とした場合のオゾン接触方式を検討した。オゾンによるトリハロメタン前駆物質の酸化、分解反応は、臭素酸イオン生成反応よりも優先的、かつ速やかに進行することから、溶存オゾン濃度を監視し、必要最少量のオゾン注入制御を行うことで、臭素酸イオン生成の抑制、及びトリハロメタン生成能低減の両立が十分可能であることを示した。また、オゾン処理による有機物の生物分解性向上は、トリハロメタン生成能の低減反応と同様、オゾン注入後速やかに進行するため、臭素酸イオン生成を抑制すべくオゾン注入量を抑制した場合でも、生物活性炭との併用効果は、従来と同様に期待できることが明らかとなった。臭素酸イオン生成抑制のためには低濃度の溶存オゾン濃度を迅速に検知する必要から、オゾン接触槽出口、あるいはその近傍における溶存オゾン濃度を監視する必要がある。制御値としては0.1mg/L程度となる。また、臭素酸イオン生成抑制を主眼に置いた場合は下降管注入式よりも向流多段接触池の方が制御安定性は高いという結果を得た。

第5章「浄水処理への促進酸化処理適用に関する研究」では、日本国内の水道原水を用い、オゾン単独処理及び各種の促進酸化処理（オゾン+過酸化水素、オゾン+紫外線、オゾン+過酸化水素+紫外線）におけるトリハロメタン生成能の低減効果、臭素酸イオン生成特性、臭気物質の低減特性を実験的に検証し、処理効果の比較や、各原水の水質の特徴から考察を行った。いずれの原水においてもTHMFP低減にはオゾン単独処理が最も有効であった。オゾンを利用した処理では臭素酸イオンの生成を伴うが、溶存オゾンの制御や過酸化水素を併用することにより抑制可能であることが示された。促進酸化法は臭気物質（2-MIB）低減効果が大きく、処理時間の短縮、及びオゾン注入率の低減化が可能であることが示された。特にオゾン/過酸化水素併用プロセスにおける2-MIB分解一次反応速度定数は、オゾン単独処理の2.6~2.8倍の値を示し、同時に臭素酸イオンは初期Br⁻=180μg/L(DOC=2.1mg/L)の原水においても、ほぼ0μg/Lに抑制され、難分解性物質の除去性のみならず、臭素酸イオン生成抑制の観点からも極めて有効な処理方法であることが示された。

第6章「促進酸化処理の実用化に関する研究」では、霞ヶ浦を取水源とする浄水場に設置したパイロットスケール実験装置を用い、特に臭気物質の分解効率が低下する低水温期についてオゾンと過酸化水素による促進酸化処理適用効果の実証、臭気物質除去性や臭素酸イオン生成に関する主要な因子を明らかにし、水質負荷や水温期に応じたオゾンおよび過酸化水素の注入制御指針を明らかとした。オゾンと過酸化水素を用いた促進酸化処理は、霞ヶ浦原水のように臭素酸イオン生成リスクが高い原水に対して効果的な手法であることが確認された。臭素酸イオン生成に関して最も影響の大きな因子は溶存オゾン濃度であり、低水温期に過酸化水素が共存する場合でも同様であった。臭気物質の分解速度はオゾン注入率や過酸化水素の有無にかかわらず、オゾン消費量に比例することが明らかとなった。特にオゾンの自己分解速度が低下する低水温期は、臭気物質の負荷に応じたオゾン注入率を与えると同時に、供給したオゾンを十分に分解するだけの過酸化水素の注入率を設定することが有効であることが明らかとなった。また、オゾン処理における主要な除去対象物質である臭気物質流入濃度と、臭素酸イオンの生成リスクに基づいた処理フロー選定手法を示した。オゾン処理工程では後段の活性炭への負荷を一定値（100ng/L）以下にするだけの除去率を確保する必要があること、および臭化物イオンの転換率に基づいた臭化物イオン濃度範囲を明確化することで、促進酸化処理の適用範囲を示した。

以上、浄水処理へのオゾン適用における処理の効率化と副生成物制御に関する研究は、特に原水水質負荷の高い浄水場対して、促進酸化処理を含めた最新のオゾン処理技術や運転監視技術を機能的に組合せ、原水水質や要求水質、ならびに省エネルギー性に配慮した先進的なオゾン注入制御指針を明らかにすることで、安全で安定的な水道水供給の実現に大きく貢献するものである。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な内容を有すると審査委員全員が一致して認めた。

注 論文及び審査結果の要旨欄に不足が生じる場合には、同欄の様式に準じ裏面又は別紙によること。