

高効率型高度浄水処理システムの開発

学位論文内容の要旨

近年、水道原水の悪化に伴い、水道水の異臭味やリスクの削減に対する関心が高まっている。高度浄水処理は、これらの原因と考えられる各種の溶解性成分に対応できるとして高く評価されている。しかしながら、従来の急速ろ過システムに、オゾン酸化と活性炭吸着プロセスを付加する現行方式では、その構成が複雑になり、敷地面積の増大と動力消費の増加により、その普及は制限される。

現行の急速ろ過システムでは、フロッキュレータの維持管理に多くのコストとエネルギーが消費されている。また、通常では浄水の3~5%程度を使用する深層ろ層の洗浄水量は、原水水質の悪化や高度処理導入に伴う深層ろ過プロセスの増加によって、今後増加することが予想される。

そこで、本研究では、除濁プロセスの改善のために、フロック形成・沈殿プロセスの簡素化・省エネ化を目的とした噴流攪拌固液分離装置(JMS)と、洗浄水量の削減を目的とした空気洗浄方式を導入し、生物活性炭プロセスの効率化のための木質系活性炭を導入した改良型高度浄水処理システムを提案し、個々のプロセスの機能と処理水質からみた処理システムの評価に関する研究を行った。内容を要約すると、以下の通りである。

第1章では、高度浄水処理システムに関する問題点を指摘するとともに、実験に用いたパイロットプラントの各プロセスの構成と本論文の構成を示している。

第2章では、JMSの固液分離特性と水理特性について検討した。まず、既往の動力学モデルに基づき、沈殿を伴うフロック形成過程が成立することを指摘し、さらに基礎実験によってその妥当性を証明することにより、JMSの理論的背景を裏付けた。また、パイロットプラントの操作を通じ、JMSの最適操作条件と多孔板間におけるフロックの挙動を明確にし、JMSが水質変動にも十分耐え得ることを実証した。さらに、JMS後段に傾斜管を挿入することにより、低いエネルギー消費、短い滞留時間の下で、従来と同等の沈殿後水水質を達成できることを明らかにした。

つぎに、流速分布の測定により、水は流下する際に偏流を起こしていること、局所的にきわめて大きな乱れが発生していること、および水平方向に比べて垂直方向の乱れが小さいことなど、噴流攪拌に見られる特徴的な流況を把握した。また、JMSでは、パドル式や上下流式フロッキュレータに比べて、全体のエネルギー消費率に対するフロック形成に有効なエネルギー消費率の割合が高いことを証明した。

第3章では、深層ろ層の空気洗浄の現象説明と洗浄水量の削減を期待できる空気・水同時併用洗浄法の洗浄効果について検討を試みた。珪砂を充填したベンチスケールのモデルろ過筒を用いて、空洗時に認められるろ層内圧力の変化と押し上げ水の挙動を調べることにより、空洗工程は、加圧空気の挿入と同時に比較的高いピーク圧力が発生する不安定期と一定の微振動が継続する安定期の2工程からなること、不安定期にはろ層内水の約20~30%が砂上に押し上げられることを明らかにし、同時にそれらの変動に及ぼす材径や空

洗強度などの影響因子の寄与率を算出した。また、空洗に伴うろ材径分布と排出濁質量の変化を捕らえることにより、空洗を行うとろ層の混合が起こること、不安定期に排出される濁質量は抑留濁質量の約60~80%にも及び、空洗は主洗浄として評価できること、一度排出された濁質は、空洗の経過に伴ってろ層内に舞い戻ることを明らかにした。さらに、銅イオンをトレーサーとした排出濁質の追跡実験を行うことにより、舞い戻り量の変動に及ぼす影響因子の寄与率と、舞い戻り濁質のろ層内分散に関する現象を明確にした。加えて、空洗を主洗浄とする空気・水同時併用洗浄法の特徴として、空洗強度は濁質の排出効果にほとんど影響しないこと、併用する逆洗速度はろ層非膨張の低速度が望ましいことを明らかにした。

第4章では、パイロットプラントの処理性評価を行った。まず、実験原水とした千歳川表流水の凝集特性について調べたところ、E260発現性成分の限界除去に必要な凝集剤注入率は、濁度除去に要する注入率の約2.5倍に及び、この限界点で操作しなければ安定なJMS流出濁度を保持できないこと、およびその時のE260発現性成分の分子量別の除去率を明確にした。また、原水中に含まれるTHMFPは比較的高レベルであるが、凝集・沈殿・砂ろ過により、平均除去率均54.6%と効果的に削減できることを示した。

つぎに、オゾン・活性炭プロセスにおける溶解性成分の処理特性について、生物分解特性が高いとされる木質系活性炭(PICABIOL)と、一般に吸着剤として用いられる石炭系活性炭(F-400)の比較を中心に検討した。DOC破過曲線について比較を行ったところ、見かけ上の平衡状態に到達するまでに要した通水倍率は、PICABIOLで約8,000倍、F-400で約50,000倍とフミン質類の吸着性に優れているF-400の方が圧倒的に長く、しかもE260、THMFPについても同様の傾向を示した。また、活性炭においてTHMFPの選択的な除去が行われるのは、F-400を用いても通水倍率約10,000倍程度までで、その通水倍率は、低分子のE260発現性成分の選択的除去が認められなくなる点と一ほぼ致することを明らかにした。さらに、アンモニア性窒素とAOCの除去性については、PICABIOLの方がとくに低水温時にその効果を発揮することを明らかにした。しかしながら、流出水中のAOCは細菌類の二次増殖を抑制するには十分ではないこともわかった。

加えて、生物活性炭の前処理としてのオゾン処理の影響について検討した。回分吸着実験と固定床カラム通水実験により、本実験のオゾン処理は、有機成分の低分子化に比べて疎水性有機物の親水化を顕著に引き起こすため、活性炭の吸着性を低下させるが、破過曲線はほぼ合致することを示した。また、オゾン処理によってAOCが約2~7倍増加し、有機物の生物分解性は向上するが、同時にAOC除去に要する接触時間が長くなること、アンモニア性窒素の硝化活性は阻害されることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 渡 辺 義 公
副 査 教 授 高 桑 哲 男
副 査 教 授 清 水 達 雄

学 位 論 文 題 名

高効率型高度浄水処理システムの開発

近年、水道原水の悪化に伴い、水道水の異臭味やリスクの削減に対する関心が高まっている。高度浄水処理は、これらの原因と考えられる各種の溶解性成分に対応できるとして高く評価されている。しかしながら、従来の急速ろ過システムに、オゾン酸化と活性炭吸着プロセスを付加する現行方式では、その構成が複雑になり、敷地面積の増大と動力消費の増加により、その普及は制限される。

現行の急速ろ過システムでは、フロッキュレータの維持管理に多くのコストとエネルギーが消費されている。また、通常では浄水の3～5%程度を使用する深層ろ層の洗浄水量は、原水水質の悪化や高度処理導入に伴う深層ろ過プロセスの増加によって、今後増加することが予想される。

そこで、本研究では、除濁プロセスの改善のために、フロック形成・沈殿プロセスの簡素化・省エネ化を目的とした噴流攪拌固液分離装置（JMS）と、洗浄水量の削減を目的とした空気洗浄方式を導入し、生物活性炭プロセスの効率化のための木質系活性炭を導入した改良型高度浄水処理システムを提案し、個々のプロセスの機能と処理水質からみた処理システムの評価に関する研究を行った。内容を要約すると、以下の通りである。

第1章では、高度浄水処理システムに関する問題点を指摘するとともに、実験に用いたパイロットプラントの各プロセスの構成と本論文の構成を示している。

第2章では、JMSの固液分離特性と水理特性について検討した。まず、既往の動力学モデルに基づき、沈殿を伴うフロック形成過程が成立することを指摘し、さらに基礎実験によってその妥当性を証明することにより、JMSの理論的背景を裏付けた。また、パイロットプラントの操作を通じ、JMSの最適操作条件と多孔板間におけるフロックの挙動を明確にし、JMSが水質変動にも十分耐え得ることを実証した。さらに、JMS後段に傾斜管を挿入することにより、低いエネルギー消費、短い滞留時間の下で、従来と同等の沈殿後水水質を達成できることを明らかにした。

つぎに、流速分布の測定により、水は流下する際に偏流を起こしていること、局所的にきわめて大きな乱れが発生していること、および水平方向に比べて垂直方向の乱れが小さいことなど、噴流攪拌に見られる特徴的な流況を把握した。また、JMSでは、パドル式や上下流式フロッキュレータに比べて、全体のエネルギー消費率に対するフロック形成に有効なエネルギー消費率の割合が高いことを証明した。

第3章では、深層ろ層の空気洗浄の現象解明と洗浄水量の削減を期待できる空気・水同時併用洗浄法の洗浄効果について検討を試みた。珪砂を充填したベンチスケールのモデルろ過筒を用いて、空洗時に認められるろ層内圧力の変化と押し上げ水の挙動を調べることにより、空洗工程は、加圧空気の挿入と同時に比較的高いピーク圧力が発生する不安定期と一定の微振動が継続する安定期の2工程からなること、不安定期にはろ層内水の約20～30%が砂上に押し上げられることを明らかにし、同時にそれらの変動に及ぼすろ材径や空洗強度などの影響因子の寄与率を算出した。また、空洗に伴うろ材径分布と排出濁質量の変化を捕らえることにより、空洗を行うとろ層の混合が起こること、不安定期に排出される濁質量は抑留濁質量の約60～80%にも及び、空洗は主洗浄として評価できること、一度排出された濁質は、空洗の経過に伴ってろ層内に舞い戻ることを明らかにした。さらに、銅イオンをトレーサーとした排出濁質の追跡実験を行うことにより、舞い戻り量の変動に及ぼす影響因子の寄与率と、舞い戻り濁質のろ層内分散に関する現象を明確にした。加えて、空洗を主洗浄とする空気・水同時併用洗浄法の特徴として、空洗強度は濁質の排出効果にほとんど影響しないこと、併用する逆洗速度はろ層非膨張の低速度が望ましいことを明らかにした。

第4章では、パイロットプラントの処理性評価を行った。まず、実験原水とした千歳川表流水の凝集特性について調べたところ、E260発現性成分の限界除去に必要な凝集剤注入率は、濁度除去に要する注入率の約2.5倍に及び、この限界点で操作しなければ安定なJMS流出濁度を保持できないこと、およびその時のE260発現性成分の分子量別の除去率を明確にした。また、原水中に含まれるTHMFPは比較的高レベルであるが、凝集・沈殿・砂ろ過により、平均除去率均54.6%と効果的に削減できることを示した。

つぎに、オゾン・活性炭プロセスにおける溶解性成分の処理特性について、生物分解特性が高いとされる木質系活性炭(PICABIOL)と、一般に吸着剤として用いられる石炭系活性炭(F-400)の比較を中心に検討した。DOC破過曲線について比較を行ったところ、見かけ上の平衡状態に到達するまでに要した通水倍率は、PICABIOLで約8,000倍、F-400で約50,000倍とフミン質類の吸着性に優れているF-400の方が圧倒的に長く、しかもE260、THMFPについても同様の傾向を示した。また、活性炭においてTHMFPの選択的な除去が行われるのは、F-400を用いても通水倍率約10,000倍程度までで、その通水倍率は、低分子のE260発現性成分の選択的除去が認められなくなる点と一ほぼ致することを明らかにした。さらに、アンモニア性窒素とAOCの除去性については、PICABIOLの方がとくに低水温時にその効果を発揮することを明らかにした。しかしながら、流出水中のAOCは細菌類の二次増殖を抑制するには十分ではないこともわかった。

加えて、生物活性炭の前処理としてのオゾン処理の影響について検討した。回分吸着実験と固定床カラム通水実験により、本実験のオゾン処理は、有機成分の低分子化に比べて疎水性有機物の親水化を顕著に引き起こすため、活性炭の吸着性を低下させるが、破過曲線はほぼ合致することを示した。また、オゾン処理によってAOCが約2～7倍増加し、有機物の生物分解性は向上するが、同時にAOC除去に要する接触時間が長くなること、アンモニア性窒素の硝化活性は阻害されることを明らかにした。

これを要するに、著者は、高度浄水処理システムについて、その省エネルギー化と効率化の新知見を得ており、水道工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。