

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2012～2016

課題番号：24226012

研究課題名(和文) 先端的要素技術と膜分離の統合による水処理システムの革新

研究課題名(英文) Innovative Water Treatment Technology Combining Advanced Unit Processes and Membrane Separation

研究代表者

松井 佳彦 (Matsui, Yoshihiko)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：00173790

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 125,400,000円

研究成果の概要(和文)：微粉炭が示す吸着容量増加のメカニズムとしてShell Adsorption Modelを実証し、さらに低競合吸着性を解明し、超微粒子吸着材の最適粒度を推定した。放射性ヨウ素の高い除去性、使用済粒状活性炭を微粉砕により再利用可能なことを示した。低アルミニウム残留性や高いウイルス除去性などを可能とするための凝集剤ポリ塩化アルミニウムの有効成分とその製造反応条件などが分かった。紫外線酸化分解の基本的分解性能を把握し、酸化分解副生成物の安全性評価を行った。高塩基度ポリ塩化アルミニウム凝集剤による前凝集処理が膜処理における膜ろ過ファウリングを抑制し、アルミニウムのサイズやSiの関連を見出した。

研究成果の概要(英文)：Regarding super-fine powdered activated carbon, the mechanism of the Shell Adsorption Model to explain high adsorption capacity was verified. Low competitive adsorption, high removal of radioactive iodine, optimum particle size, and the reuse of spent granular activate carbon were revealed. Regarding poly-aluminum coagulant, effective species for low residual aluminum and high virus removal and their production conditions were found. Basic characteristics of normal and vacuum ultraviolet decompositions were studied. Degradation products were evaluated for their safety assessment. Regarding membrane filtration, lower membrane fouling attained by high-basicity poly-aluminum coagulant were related to aluminum particles size and silicate.

研究分野：水環境工学

キーワード：土木環境システム 環境技術 環境材料 反応・分離工学 水資源

1. 研究開始当初の背景

都市化と気候変動に伴い世界的な水不足と水質劣化が進行している。これに対し、低質な水を含む多様な水資源を低コスト・低消費エネルギーで、安全・安心な水として利用するための、維持管理が容易な高度水供給技術が求められている。このためには、水処理システムを構成する個々のプロセスとその構成にイノベーションの創出が不可欠である。

2. 研究の目的

ナノ粉碎技術による吸着剤の超微粒子化、多価金属塩の準安定領域を応用した高分子技術による凝集剤の高機能化、真空紫外線と繊維状光触媒を組み合わせた酸化処理の高性能化を水処理技術へ応用し、セラミック膜分離技術と統合し先端的浄水システムを創出する。

3. 研究の方法

要素研究として、吸着、凝集、酸化の水処理プロセスの根幹をなす資機材の高機能化から研究に取り組み、資機材の試作と基本特性評価、バッチラボ実験とプラント試験で性能を検討・評価した。①：吸着材をナノ領域へと超微粒子化し、極性物質の吸着容量の著しい増加、その原因として粒子外表面吸着、低競合吸着性、ウイルス除去性、フロック形成の促進効果、膜ファウリング抑止を、材料表面と除去対象物質の物性から検討した。②：凝集剤中のアルミニウムを重合高分子化し、低膜ファウリング性や高いウイルス除去性などを有する機能性凝集剤を開発し、分子量・サイズ・構造・荷電量などとの関連を検討した。③：真空紫外線も照射する紫外線ランプを光触媒や過酸化水素等と組み合わせることにより OH ラジカルを積極的に生成し、微量化学物質の分解性を検討した。さらに、酸化分科物の毒性をバイオアッセイと精密質量分析で評価した。

4. 研究成果

A. 吸着処理

活性炭を材料として吸着剤の超微粒子化がもたらす効果を検討し、以下のような知見を得た。高分子の自然由来有機物質 (Natural organic matter, NOM) のみならず低分子の 2 メチルイソボルネオール (2-Methylisoborneol, MIB) などについても微粒度化により平衡吸着容量が増加する活性炭が存在すること、この現象は吸着が主に活性炭粒子外表面付近で生じるためであることを示す実証データを、同位体顕微鏡を使った内部吸着量分布の直接観察により世界で初めて明らかにした。さらに、低分子の吸着質では、吸着質と活性

炭粒子が共に疎水性を有するほど、吸着質は活性炭粒子内部への拡散が生ぜず、吸着はもっぱら粒子外表面付近で生じることを明らかにした。したがって、低分子ではあるが疎水性の高い MIB やジェオスミンを、酸素含有率が低い椰子殻炭などの疎水性活性炭で除去する場合には、活性炭内部は吸着に利用されおらず、このため微粉化が吸着処理性の効率化により有効であることを示した。微粉炭が有する NOM との低競合吸着性を、実験と Shell Adsorption Model と Simplified Equivalent Background Compound Model による解析により解明した。微粉炭が有する低競合吸着性は、MIB に比べて NOM の多くが活性炭粒子の外表面付近に吸着するためであることを明らかにした。一方、MIB と競合する NOM は、分子量 230 Da 以下の発色性 (UV) の NOM であり、それらは NOM 全体の 2% 以下の僅かな量ではあるが、他の高分子の NOM に比べて活性炭粒子の内部に吸着し MIB と競合吸着することを明らかにした。微粉炭の最適粒度を Branched Pore Kinetic Model で解析した。微粉炭の代表粒径指標としては質量基準の累積 40% に当たる粒径 (D40) が相応しいこと、最適 D40 は活性炭接触時間や対象物質により異なるが、一般的な 60 分の活性炭接触では、MIB の最適 D40 は 2.0-2.5 μm 、ジェオスミンは 0.4-0.5 μm であることを示した。

さらに、微粉化により活性炭がウイルス吸着除去性を有することを示した。この場合、活性炭が 20-50 nm の細孔を有し、ウイルスとの電気的反発力が小さいことが要件である。3.11 の東日本震災では原発から多量の放射性ヨウ素が放出され水道水源を汚染し、浄水場ではその除去性は高くなかった。そこで、微粉炭によるヨウ素の除去性を研究実施計画に追加した。ヨウ化物イオンには活性炭吸着性はないが、塩素酸化により生じる次亜ヨウ素酸や有機態ヨウ素は活性炭吸着性があり、特に後者は活性炭粒子の外表面への吸着であるため、微粉炭が優れた除去性を示すことを明らかにした。さらに、酸化によるヨウ素種分布の変化を明らかにした。カルキ臭の原因であるトリクロラミンも微粉炭を使うことにより短時間で除去可能なこと、さらに、除去はトリクロラミンの窒素ガスへの還元分解であり、遊離塩素やモノクロラミンなど消毒に有効な成分に比べて分解速度が速いため、選択的除去が可能なことを世界で初めて明らかにし、微粉炭および粉末活性炭による還元分解除去は活性炭粒子内細孔拡散＋細孔表面分解反応モデルで表現できることを明らかにした。また、トリクロラミン以外の臭気物質も同定し、それらについても微粉

炭で高効率に吸着処理可能なことを明らかにした。生物活性炭層で4年間使用した粒状炭は、吸着容量が残存しておらず、超微粉化による再利用は難しいが、2年間まで使用した粒状炭は、平衡吸着容量の残存率は数10%程度ではあるが、微粉化すると吸着速度のみならず吸着容量も増加し、通常の接触時間であれば、通常の粉末活性炭と同等の実用的なMIB除去性を示すことが分かった。活性炭の粒径D50を150 nmまで微小化することに成功し、100 nm以下のナノ炭の製造まであと少しの段階にまで近づいた。

B. 機能型凝集剤：

様々な凝集剤を試作し、低アルミニウム残留性の機能を有するためには重合時のモノマー含有量を低くすることが鍵であることを示した。アルミニウムの高分子重合度を上げることで、従来の凝集剤では処理効率が著しく落ちるアルカリ条件下であっても低アルミニウム残留性と高い除濁性を有する高分子アルミニウム凝集剤（新規のポリ塩化アルミニウム、PACI）を試作できた。

製造反応条件を変えてPACI凝集剤を試作し、ウイルスやヒ素の除去性と有効成分特性の関連を検討した。その結果、ウイルスを効果的に除去する凝集剤には高コロイド荷電量を示すケギン型 δ -Al30ポリカチオンアルミニウムが多く含まれることを明らかにした。また、 δ -Al30ポリカチオンアルミニウムを多く含むポリ塩化アルミニウム凝集剤を調整できた。この成分は、荷電中和力が高いものの加水分解性が低いため除濁性には課題がある可能性があると思われた。一方、ヒ素についても、より効果的に凝集除去可能な凝集剤を検討し、凝集剤中のコロイドとポリマー成分、とくにその境界にあるような成分、すなわち、フェロンと30分から3時間に反応する成分がヒ素の除去に最も有効な成分であることを解明した。これまでケギン型e-Al13ポリカチオンやケギン型 δ -Al30ポリカチオンがヒ素除去に有効成分とされてきたが、本研究で見出したヒ素の除去に最も有効な成分は、これらとは一致しなかった。

C. 紫外線酸化プロセス

1,4-ジオキサンを用い、シリカ繊維+二酸化チタン触媒と紫外線ランプ(254 nm, UV)あるいは真空紫外線ランプ(185 nm + 254 nm, VUV)による、紫外線単独あるいは触媒を用いた分解実験を行い、分解速度についての基礎データを取得し、VUVランプを用いた場合には、必ずしも触媒がなくても迅速な分解が可能であることを見出した。また、過酸化水素を添加することにより、VUV促進酸化とUV促進酸化のいずれにおいても、1,4-ジオキ

サンの分解が大きく促進されることが分かり、過酸化水素の添加量が低い場合はVUV促進酸化の効率が高いが、添加量を大きくするとVUV促進酸化とUV促進酸化の効率の差がほとんどなくなることが示された。VUV照射のみでは1,4-ジオキサン分解効率は照射強度に依存し、低照射で効率が高いことを示した。また、VUVによる1,4-ジオキサンの分解は、原水中のいくつかの共存陰イオンにより抑制され、それらの共存陰イオンあたりの分解阻害効果を定量化し、共存陰イオン組成より分解速度定数を予測可能とした。また、真空紫外線照射により硝酸イオンから生成される亜硝酸イオンが最大阻害効果を有することも明らかにした。一方、真空紫外線における分解副生成物については、ハロ酢酸生成能は変化せず、トリハロメタン生成能は低減可能であることが示された。また、アルデヒド濃度は増加するものの、後段の粒状活性炭処理などでの除去が可能であることが示された。さらに、酸化分解物の安全性評価としてX線造影剤の酸化処理(塩素)を検討した。その結果、5種の造影剤のうちイオパミドールのみが酸化反応を受け、変異原性が発現することが明らかとなった。高分解能・高精度フーリエ変換型質量分析計を用いた物質同定と、複数の構造活性相関モデルを組み合わせることにより、発現した変異原性に寄与する物質を推定した。

D. 凝集-膜ろ過

4系列セラミック膜ろ過装置を用いて、試作を含む様々な凝集剤による前凝集処理が膜ろ過性に及ぼす効果を検討した。PACIの塩基度を70%まで上昇すると膜ろ過性が向上し膜ファウリングをより低下させることができたが、硫酸などその他の成分を調整しても低膜ファウリング性を大きく向上するには至らなかった。さらに、検討を進め、溶存有機物濃度(DOC)の低い原水(豊平川)では、主たるファウリング物質がケイ素Siを含むアルミニウムであることや、塩基度を限界の90%まで高めることにより、これまで以上に膜ファウリングを抑制しうる可能性を見出した。これに対し、溶存有機物濃度の高い原水では、主たるファウリング物質はアルミニウムのみならず有機物質であった。

膜表面と内部に蓄積した物理的逆流洗浄によっても剥離しない不可逆膜ファウリング物質を分別定量する方法を検討し、試作凝集剤の性能比較のため、膜ファウリング加速試験を行った。前凝集処理に使用するPACIの塩基度が高いほど、膜内部ファウリング物質量が減少すること、これには、膜ろ過水中のアルミニウム濃度および膜細孔に近い大きさのアルミニウム粒子の減少が関連して

いることが示唆された。また、膜表面や内部の物質当りの膜間差圧は、ポリ塩化アルミニウムの塩基度や膜ろ過日数によって異なることが分かった。

また、膜ろ過に残留するアルミニウムの濃度は、アルミニウムの膜への吸着に影響を受け、吸着性は膜の材質により異なることを明らかにした。凝集前処理を伴うことで分離孔径の大きな Microfiltration (MF)相当のセラミック膜であってもノロウイルスが 99.99%以上除去可能であること、さらに、この効果は凝集剤により膜がプレコートされることも寄与していることを明らかにした。高塩基度 PACI を前凝集処理に用いた MF 膜ろ過ではウイルス除去性が高く、凝集操作もインラインの短時間反応で十分であることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 30 件)

- ① Matsui, Y., Shirasaki, N., Yamaguchi, T., Kondo, K., Machida, K., Fukuura, T. and Matsushita, T. (2017) Characteristics and components of poly-aluminum chloride coagulants that enhance arsenate removal by coagulation: detailed analysis of aluminum species, *Water Research*, 118, 177–186.
- ② Matsushita, T., Matsui, Y., Ikekame, S., Sakuma M. and Shirasaki, N. (2017) Trichloramine removal with activated carbon is governed by two reductive reactions: a theoretical approach with diffusion-reaction models, *Environmental Science & Technology*, 51, 4541–4548.
- ③ Pan, L., Takagi, Y., Matsui, Y., Matsushita, T. and Shirasaki, N. (2017) Micro-milling of spent granular activated carbon for its possible reuse as an adsorbent: remaining capacity and characteristics, *Water Research*, 114, 50–58.
- ④ Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y., Murai, K. and Aochi, A. (2017) Elimination of representative contaminant candidate list viruses, coxsackievirus, echovirus, hepatitis A virus, and norovirus, from water by coagulation processes, *Journal of Hazardous Materials*, 326, 110–119.
- ⑤ Pan, L., Matsui, Y., Matsushita, T. and Shirasaki, N. (2016) Superiority of wet-milled over dry-milled superfine powdered activated carbon for adsorptive 2-methylisoborneol removal, *Water Research*, 102, 516–523.
- ⑥ Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y., Marubayashi, T. and Murai, K. (2016) Investigation of enteric adenovirus and poliovirus removal by coagulation processes and suitability of bacteriophages MS2 and φX174 as surrogates for those viruses, *Science of the Total Environment*, 563–564, 29–39.
- ⑦ Matsushita, T., Hashizuka, M., Kuriyama, T., Matsui, Y. and Shirasaki, N. (2016) Use of orbitrap-MS/MS and QSAR analyses to estimate mutagenic transformation products of iopamidol generated during ozonation and chlorination, *Chemosphere*, 148, 233–240.
- ⑧ Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y. and Marubayashi, T. (2016) Effect of coagulant basicity on virus removal from water by polyferric chloride, *Journal of Water Supply, Research and Technology-AQUA*, 65(4), 322–329.
- ⑨ Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y. and Ohno, K. (2016) Characterization of recombinant norovirus virus-like particles and evaluation of their applicability to the investigation of norovirus removal performance in membrane filtration processes, *Water Science and Technology*, *Water Supply*, 16(3), 737–745.
- ⑩ Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y. and Marubayashi, T. (2016) Effect of aluminum hydrolyte species on human enterovirus removal from water during the coagulation process, *Chemical Engineering Journal*, 284, 786–793.
- ⑪ Matsui, Y., Nakao, S., Sakamoto, A., Taniguchi, T., Pan, L., Matsushita, T., and Shirasaki, N. (2015) Adsorption capacities of activated carbons for geosmin and 2-methylisoborneol vary with activated carbon particle size: effects of adsorbent and adsorbate characteristics, *Water Research*, 85, 95–102.
- ⑫ Matsushita, T., Kobayashi, N., Hashizuka, M., Sakuma, H., Kondo, T., Matsui, Y. and Shirasaki, N. (2015) Changes in mutagenicity and acute toxicity of solutions of iodinated X-ray contrast media during chlorination, *Chemosphere*, 135, 101–107.
- ⑬ Matsushita, T., Nakamura, K., Matsui, Y. and Shirasaki, N. (2015) Effect of growth phase of cyanobacterium on release of intracellular geosmin from cells during microfiltration process, *Membrane Water Treatment*, 6(3), 225–235.
- ⑭ Matsushita, T., Hirai, S., Ishikawa, T., Matsui, Y. and Shirasaki, N. (2015) Decomposition of 1,4-dioxane by vacuum ultraviolet irradiation: study of economic feasibility and by-product formation. *Process Safety and Environmental Protection*, 94, 528–541.
- ⑮ Sakuma, M., Matsushita, T., Matsui, Y., Aki, A., Isaka, M. and Shirasaki, N. (2015) Mechanisms of trichloramine removal with activated carbon: Stoichiometric analysis with isotopically labelled trichloramine and theoretical analysis with a diffusion-reaction model, *Water Research*, 68, 839–848.
- ⑯ Kimura, M. Saito, S., Matsui, Y., Takahashi, T., Nakagawa, M., Shirasaki, N. and Matsushita, T. (2015) Hydraulically irreversible membrane fouling during coagulation–microfiltration and its control by using high-basicity polyaluminum chloride, *Journal of Membrane Science*, 477, 115–122.
- ⑰ Ikari, M., Matsui, Y., Suzuki, Y., Matsushita, T. and Shirasaki, N. (2014) Removal of iodide from water by chlorination and subsequent adsorption on

powdered activated carbon, *Water Research*, 68, 227–237.

⑮ Matsui, Y., Sakamoto, A., Nakao, S., Taniguchi, T., Matsushita, T., Shirasaki, N., Sakamoto, N. and Yurimoto, H. (2014) Isotope microscopy visualization of the adsorption profile of 2-methylisoborneol and geosmin in powdered activated carbon, *Environmental Science & Technology*, 48, 10897–10903.

⑯ Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y., Urasaki, T., Kimura, M. and Ohno, K. (2014) Virus removal by an in-line coagulation-ceramic microfiltration process with high-basidity polyaluminum coagulation pretreatment. *Water Science and Technology, Water Supply*, 14(3), 429–437.

⑰ Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y., Oshiba, A., Marubayashi, T. and Sato, S. (2014) Improved virus removal by high-basidity polyaluminum coagulants compared to commercially available aluminum-based coagulants, *Water Research*, 48, 375–386.

⑱ Kobayashi, Y., Itoh, M., Yamada, T., Akiba, M. and Matsui, Y. (2013) Experimental evaluations of water treatment systems using a pilot-scale plant for adaptations to a sharp increase in raw-water turbidity caused by climate change, *Water Science and Technology, Water Supply*, 13(1), 139–146.

⑳ Matsui, Y., Ishikawa, T. B., Kimura, M., Machida, K., Shirasaki, N. and Matsushita, T. (2013) Aluminum concentrations of sand filter and polymeric membrane filtrates: a comparative study, *Separation and Purification Technology*, 119, 58–65.

㉑ Matsushita, T., Shirasaki, N., Tatsuki, Y. and Matsui, Y. (2013) Investigating norovirus removal by microfiltration, ultrafiltration, and pre-coagulation-microfiltration processes using recombinant norovirus virus-like particles and real-time immuno-PCR, *Water Research* 47, 5819–5827.

㉒ Matsui, Y., Nakao, S., Yoshida, T., Taniguchi, T. and Matsushita, T. (2013) Natural organic matter that penetrates or does not penetrate activated carbon and competes or does not compete with geosmin, *Separation and Purification Technology*, 113, 75–82.

㉓ Matsui, Y., Nakao, S., Taniguchi, T. and Matsushita, T. (2013) Geosmin and 2-methylisoborneol removal using superfine powdered activated carbon: shell adsorption and branched-pore kinetic model analysis and optimal particle size, *Water Research*, 47, 2873–2880.

㉔ Kimura, M., Matsui, Y., Kondo, K., Ishikawa, T.B., Matsushita, T. and Shirasaki, N. (2013) Minimizing residual aluminum concentration in treated water by tailoring properties of polyaluminum coagulants, *Water Research*, 47, 2075–2084.

㉕ Matsushita, T., Suzuki, H., Shirasaki, N., Matsui, Y. and Ohno, K. (2013) Adsorptive virus removal

with super-powdered activated carbon, *Separation and Purification Technology*, 107, 79–84.

㉖ 白崎伸隆, 松下拓, 松井佳彦, 大芝淳 (2012) ウイルス処理に有効な新規アルミニウム系凝集剤の開発, *土木学会論文集 G (環境)* 68(7), III_41–50.

㉗ Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y., Urasaki, T. and Ohno, K. (2012) Difference in behaviors of F-specific DNA and RNA bacteriophages during coagulation-rapid sand filtration and coagulation-microfiltration processes, *Water Science and Technology, Water Supply*, 12(5), 666–673.

㉘ Matsui, Y., Yoshida, T., Nakao, S., Knappe, D. and Matsushita, T. (2012) Characteristics of competitive adsorption between 2-methylisoborneol and natural organic matter on superfine and conventionally sized powdered activated carbons, *Water Research*, 46, 4741–4749.

[学会発表] (計50件)

① Hanamura, Y., Nakazawa, Y., Matsui, Y., Shirasaki, N. and Matsushita, T., Identifying, counting and reducing residual superfine powdered activated carbon particles at < 1 µg/L in treated water. IWA World Water Congress 2016, Brisbane, Australia, 9–14 October 2016.

② Sugita, W., Matsushita, T., Hirai, S., Ishikawa, T., Matsui, Y. and Shirasaki, N., Economically-feasible removal of 1,4-dioxane by VUV irradiation with limited disinfection by-product formation. IWA World Water Congress 2016, Brisbane, Australia, 9–14 October 2016.

③ Sakuma, M., Matsushita, T., Matsui, Y., Aki, T., Isaka, M., Hatase, T. and Shirasaki, N., Investigating mechanism underlying removal of trichloramine with super-powdered activated carbon. IWA World Water Congress 2016, Brisbane, Australia, 9–14 October 2016.

④ Matsushita, T., Kobayashi, N., Hashizuka, M., Kondo, T., Fujita, Y., Matsui, Y. and Shirasaki, N., Change in mutagenicity of ICM iopamidol during chlorination: estimating TPs inducing toxicity by MS/MS and QSAR analyses. IWA World Water Congress 2016, Brisbane, Australia, 9–14 October 2016.

⑤ Ikari, M., Matsui, Y., Suzuki, Y., Matsushita, T. and Shirasaki, N., Enhancing adsorptive removal of radioactive iodide by low-dose chlorine and superfine powdered activated carbon. IWA World Water Congress 2016, Brisbane, Australia, 9–14 October 2016.

⑥ Matsui, Y., Sakamoto, A., Pan, L., Shirasaki, N. and Matsushita, T., Adsorption mechanism of SPAC in comparison with conventionally-sized PAC. AWWA Water Quality Technology Conference & Exposition, Salt Lake City, UT, USA, 15–19 November 2015.

⑦ Pan, L., Matsui, Y., Matsushita, T. and Shirasaki, N., Effect of activated carbon particle size on equilibrium adsorption capacity in the range of 200

nm to 2 mm. The 6th IWA-ASPIRE Conference, Beijing, China, 20–24 September 2015.

⑧ Partlan, E., Ladner, D. A. and Matsui, Y., Microfiltration of superfine carbon for drinking water treatment: effects of source water characteristics and coagulants, AWWA/AMTA Membrane Technology Conference, Orlando, FL, USA, 2–6 March 2015.

⑨ Shirasaki, N., Marubayashi, T., Matsushita, T., Matsui, Y. and Oshiba, A., Development of novel high-basicity polyaluminum chloride for effective virus removal. International Water Association World Water Congress, Lisbon, Portugal, 21–26 September 2014.

⑩ Sakamoto, A., Matsui, Y., Nakao, S., Taniguchi, T., Shirasaki, N. and Matsushita, T., Where in an activated carbon particle MIB and geosmin adsorb: isotope micro-mapping. International Water Association World Water Congress, Lisbon, Portugal, 21–26 September 2014.

⑪ Ishikawa, T. B., Matsui, Y., Kimura, M., Machida, K., Shirasaki, N. and Matsushita, T., Lower Aluminum Concentration In Sand Bed Filtrate Than In Polymeric Membrane Filtrate. International Water Association World Water Congress, Lisbon, Portugal, 21–26 September 2014.

⑫ Matsui, Y., Nakao, S., Taniguchi, T., Sakamoto, A., Shirasaki, N. and Matsushita, T., Enhanced removal of 2-MIB and geosmin by super-fine PAC: Evidence of shell adsorption, The Tenth International Water Association Symposium on Off-Flavours in the Aquatic Environment, Tainan, Taiwan, 27 October–1 November 2013.

⑬ Matsushita, T., Shirasaki, N., Matsui, Y., Tatsuki, Y. and Oshiba, A., Evaluating norovirus removal during drinking water treatment by using recombinant norovirus virus-like particles, 2nd International Doctoral Symposium with Partner Universities, Sapporo, Japan, 24–26 October 2013.

⑭ Ikari, M., Niizuma, S., Matsui, Y., Matsushita, T. and Shirasaki, N., Removal of radioactive iodine in drinking water by the combination of chlorine oxidation and activated carbon adsorption. The 5th IWA-ASPIRE Conference, Daejeon, Korea, 8–12 September 2013.

⑮ Tazawa, S., Matsushita, T. and Matsui, Y., Chlorinous odor derived from phenylalanine after chlorination: characterization and removal with super-powdered activated carbon, The 5th IWA-ASPIRE Conference, Daejeon, Korea, 8–12 September 2013.

⑯ Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y. and Tatsuki, Y., Estimating norovirus removal performance in an in-line coagulation-ceramic microfiltration process by using recombinant norovirus VLPs and immuno-PCR method, International Water Association Membrane Technology Conference (IWA-MTC 2013), Toronto, Canada, 25–29 August 2013.

⑰ Shirasaki, N., Matsushita, T. and Matsui, Y., Virus removal by a coagulation-microfiltration

process, The 4th International Water Association Asia-Pacific Young Water Professionals Conference 2012, Tokyo, Japan, 7–10 December 2012.

⑱ Nakao, S., Matsui, Y., Taniguchi, T. and Matsushita, T., Submicron-sized activated carbon: shell adsorption and branched-pore kinetic model analyses to optimize particle size for enhancing geosmin and 2-methylisoborneol removal, International Water Association World Water Congress, Busan, Korea, 16–21 September 2012.

⑲ Nakao, S., Matsui, Y., Yoshida, T., Taniguchi, T. and Matsushita, T., Mechanisms of less-severe competitive adsorption between geosmin and natural organic matter on super-powdered activated carbon than on powdered activated carbon, International Water Association World Water Congress, Busan, Korea, 16–21 September 2012.

⑳ Kimura, M., Matsui, Y., Takahashi, T., Oshiba, A., Machida, K., Shirasaki, N. and Matsushita, T., Precoagulation by basicity-optimized polyaluminum chloride effectively reduces membrane fouling, Particle Separation Conference, Berlin, Germany, 18–20 June 2012.

㉑ Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y. and Sato, S., Effective removal of virus by high-basicity polyaluminum coagulation treatment, Particle Separation Conference, Berlin, Germany, 18–20 June 2012.

㉒ Kimura, M., Matsui, Y., Oshiba, A., Ishikawa, T. B., Machida, K., Kondo, K., Shirasaki, N. and Matsushita, T., Basicity-optimized polyaluminum chloride to minimize dissolved residual aluminum concentration, Particle Separation Conference, Berlin, Germany, 18–20 June 2012

その他 28 件。

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等:

<http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/risk/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 佳彦 (MATSUI YOSHIHIKO)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 00173790

(2) 研究分担者

松下 拓 (MATSUSHITA TAKU)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 30283401

白崎 伸隆 (SHIRASAKI NOBUTAKA)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 60604692