

機関番号：34407

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20404003

研究課題名(和文) 地下水中の砒素・鉄・マンガン同時除去の鉄バクテリア法のアジア地域への適用

研究課題名(英文) Implementation of biological filtration for simultaneous removal of arsenic, iron and manganese from groundwater in Asian countries

研究代表者

菅原 正孝 (SUGAHARA MASATAKA)

大阪産業大学・人間環境学部・教授

研究者番号：60026119

研究成果の概要(和文)：

ベトナム・ハノイにおいて 2009 年 11 月より鉄バクテリア生物ろ過法による井水中砒素および鉄浄化のパイロット試験を開始した。原水平均水質は鉄 9.6 mg/L, 全砒素 59 μ g/L、また、全砒素の 90%が亜砒酸と還元的な条件であった。装置は現地において製作加工し、通水速度 100 から 620 m/day で運転を行ってきた。当初、連続通水条件で運転していたが地下水位低下のため途中から 1 時間通水・3 時間停止の間歇通水方式に切り替えた。約 1 年間の運転期間中の砒素の平均除去率は 87.4 \pm 6.3 %となった。この成績は日本国内におけるパイロット試験結果よりも良好で、その理由としては砒素に対して鉄の濃度が高いことが考えられた。無薬注で低コストの鉄バク法がベトナムで十分適用なことを証明したと言える。

研究成果の概要(英文)：

We have developed the biological filtration system for simultaneous removal of iron, As, manganese and ammonia from water after 7 years of pilot test in Japan. It can be used in drinking water treatment plant as well as in individual household. Recently, the technique was successfully applied to treat As containing well water in Hanoi, Vietnam. In average, the raw water at the Hanoi site contained 9.6 \pm 3.1 mg/L of Fe and 59 \pm 8 μ g/L of As during the term of the experiment. Ca. 90% of the total arsenic was As(III). The average As removal in the operation from Nov. 4, 2009 to Sep 27, 2010 was 84 \pm 6 %, during which the flow rate was changed from 100 m/day to 400 m/day. Raw water feeding was continuous for the first 5 months, and was changed to intermittent mode (operate for 1 hr and stop for 3 hrs) because of the reduced groundwater level. When the flow rate was increased to 600 m/day after Sep 27, 2011, the removal was decreased to 67% probably because the filter bead height was small (less than 1 m) compared to the pilot test conducted in Japan (1.5m bead height).

The results of the pilot-test showed that the biological filtration technology could efficiently remove As in groundwater from Hanoi.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2009 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木環境システム 5206

1. 研究開始当初の背景

筆者らは、2004年以來、日本国内で鉄バクテリア（以下、鉄バク）を利用した地下水中の砒素・鉄・マンガン・アンモニア同時除去システムの開発に携わってきた。きっかけは、上記4成分を含む地下水を凝集沈殿処理して自己水として活用している京都府下の自治体水道部関係者からの内々の要望であった。企業・自治体と共同で本法の開発を進める中で、本方法を我が国の浄水施設のみならず、地下水の自然砒素による汚染に悩む途上国に適用する方向が有望になってきた。そこで、ベトナムにおいて同法のパイロット試験を実施することとした。

ベトナムでの地下水中の砒素の状況は下記のとおりである。すなわち同国では1999年、そして2004-2005年に井水調査を行って、北部紅河流域のHun Yen、Ha Nam, Ha Tay 県(province)およびメコ河流域のDong Thap 県(province)において、広範囲に地質由来の砒素による地下水汚染が存在することが判明した。2004年から2005年にかけての調査はUNICEFの援助のもとで12,461本の井戸について簡易キットによりあらたに井戸水中の砒素濃度を測定するというものであった。Province(省、県)毎に、10%超の井戸で井水中の砒素濃度が $10 \mu\text{g/L}$ 、 $50 \mu\text{g/L}$ 、 $150 \mu\text{g/L}$ を超える集落が特に砒素汚染について問題であると想定し、そのような集落の全集落数に対する割合が検討されている。その結果、特にHa Namの井戸において砒素汚染が著しく、99%の集落において井戸の10%がベトナムの生活用水基準を超過、また45%の集落において井戸の10%が $150 \mu\text{g/L}$ を超えるという実態となった。逆に井戸の10%が $10 \mu\text{g/L}$ を超えるような集落が存在しないのは、17のProvince中、Hai Phong、Long An、ホーチミン、Hueだけである。

深刻な慢性砒素中毒の被害が出ているバングラデシュ・西ベンガルでは、砒素含有地下水を水田の灌漑にも使用しており、飲料水のみならず、コメを通じた砒素摂取経路があることが、被害を深刻化させた。ベトナムでは灌漑には天水を利用し、また天水を飲用や料理用に優先使用しているため、砒素の摂取経路は乾期における地下水の飲用であり、バングラデシュほど深刻な被害は起こりにくい

はずである。ただし、Ha Namにおいて慢性砒素中毒様の患者がいるという情報もある。これが仮に真実であるとするならば、同国において砒素中毒症状の顕在化を促す何らかの生活習慣・人種・複合汚染のメカニズムがある可能性もある。たとえば台湾の慢性砒素中毒は黒足病とよばれ著しい壊疽を伴うがバングラデシュでは異なる病態を示す等、慢性砒素中毒には地域性があり、数々の医学的・疫学的研究にも関わらず今もってその理由は判っていない。今後、ベトナム社会で慢性砒素中毒の被害がどのように顕在化するかについて、推移を見守る必要がある。

2. 研究の目的

ベトナムにおいて行ったパイロット実験の結果を総括するとともに、途上国において本方法を実用化する展望について論じる。

3. 研究の方法

パイロット試験プラントとしては、日本国内で著者らが実施しているものと同様の装置を現地で製造して設置し、2009年11月4日より運転を開始した。設置場所はThuong Tin DistrictのTu Nhien幼稚園で園庭の一部を借用して小屋を建て、その内部にパイロット試験装置を収納した。装置運転と採水を実施した2009/11/19から2010/11/5間の井水(原水)の平均水質は、全鉄、全砒素、マンガン、アンモニア性窒素についてそれぞれ8.8、0.059、0.12、 2.0 mg/L であった。試験期間の間に携帯型のボルタンメトリ法装置で採水後速やかに砒素の価数分布を測定する機会が3回あり、全砒素の90%は還元形の亜砒酸との結果になった。ろ材には、運転開始から2010年10月8日以前までは周辺地域で産するレンガを粉砕して粒径 $3\text{-}5\text{mm}\Phi$ となるようにふるったものを使用した(第1期試験)。2010年10月8日以降は、ろ材を素材は同じだが粒径 $1\text{-}3 \text{ mm}\Phi$ になるようにふるったものに変更し、再度、通水を開始した(第2期試験)。ろ材高は 0.8m 程度であり、原水を落水曝気後(溶存酸素濃度 平均 4mg/L 前後)、LVを100から 600 m/day 程度の範囲で変更しながら原水、前曝気後の原水、ろ過塔の中の上、同中の下、処理水、処理水貯留タンク内の処理水、について鉄、砒素、マンガン、アンモニアを分析する他、溶存酸素、水温、pH、ORP、電気伝導度等の水質を測定した。また、数回にわたり

3 価砒素(亜砒酸)の測定も行った。パイロット試験装置の全体図を図1に示す。現地では停電が頻繁に起こるため、途中、時々通水が停止する状況であった。また、幼稚園が長期の休みになる際にも運転を停止した。通水開始後120日目に地下水位の低下が確認されたため、それ以降は1時間通水し3時間通水停止するという間歇運転に切り替えた。ろ材は12時間通水するごとに1回、制御盤での設定によって自動逆洗を行った。

4. 研究成果

(1)鉄バク法の原理

鉄バク法は、地下水等の環境水に自生する鉄バクが溶解性の2価鉄やマンガンを生物酸化する現象を利用して用水の除鉄・除マンガン法として実用化されたものである。具体的には、生物を保持させるためのろ材を充てんしたろ過塔に地下水等を連続通水し、地下



図1 パイロット試験装置設置風景

水中に自生する各種のバクテリアをろ過層上に定着・繁殖させる。ろ材上の鉄バクは地下水中の溶解性の鉄やマンガンを酸化して粒子状物質とする。これら粒子状物質は菌体上に沈積され、あるいはろ材層により物理的にろ過されて、除去される。また、原水中にアンモニアが含まれる場合、アンモニアは濾過塔内に成立した微生物生態系の一部を構成する硝化菌により、硝酸・亜硝酸に硝化される。鉄バク法での砒素除去の原理はろ層内で連続的に生成される鉄等の酸化物に、水中砒素が吸着・除去されることである。ろ過速度を維持するとともに、活性のある菌をろ過塔全体に分布させるため、ろ材は、一定期間ごとに逆流洗浄(逆洗)する。

鉄バク法の優れた点は以下のとおりである。

①水中の鉄・砒素・マンガンをアンモニア等の除去のために、地下水を砂等のろ材に通水する行為が、同時にろ材中に生物ろ過のための各種のバクテリアを繁殖させ、ろ材の除去能力を維持することになる点である。そのため、ろ材の交換は不要である。

②通常、高濃度の砒素を含む地下水ほど多くの鉄を含む。そのため、原水に処理用薬品を添加することなく、地下水中の鉄を利用して砒素を除去することができる。

③鉄バク法は、無機砒素のうち、砒酸だけでなく、地下水中に多い還元型の亜砒酸に対する除去能力も高い。これは鉄バクの生物酸化により生成される鉄酸化物が、亜砒酸を亜砒酸のまま速やかに吸着する高い能力を持っているためであることが研究グループのこれまでの研究で明らかになっている。

④鉄バク法では非常に高い通水速度(たとえば600 m/日)程度でも、鉄や砒素の除去能力に大きな低下はない。そのため、小さなろ過池でも多量の水が清算できる。

⑤鉄バク法は集中型の水処理だけでなく、村落単位等の小規模な施設でも稼働可能である。これは、管理方法さえ適切であれば、簡易的な砂ろ過施設で実現できるためである。

なお、無機砒素を水から除く従来の方法として、鉄等の凝集剤と塩素等の酸化剤を用いた凝集沈殿ろ過法、砒素を特異的に吸着する樹脂などによる吸着法、逆浸透ろ過法等があり、設備の整った浄水場であれば実施することは難しくない。ただし、これらの方法においては専門の管理者・大型の浄水施設が必要であるか、もしくは高価な吸着剤を定期的に交換する必要がある。途上国において持続可能な浄水製造方法であるとは必ずしも言えない。

(2)パイロット試験結果とその評価

結論から言えば、上述の①から⑤の事項がベトナムにおいても成立することを、一定程度立証できたと考える。

パイロット試験での鉄と砒素の除去率の推移を図2および図3に示す。第1期試験の平均除去率は鉄、砒素について $91 \pm 10\%$ 、 $81 \pm 8\%$ 、第2期試験の平均除去率は鉄、砒素について $80 \pm 16\%$ 、 $79 \pm 8\%$ であった。

第1期試験では、通水速度を600 m/dayとした時に砒素除去率が低下した。第2期試験

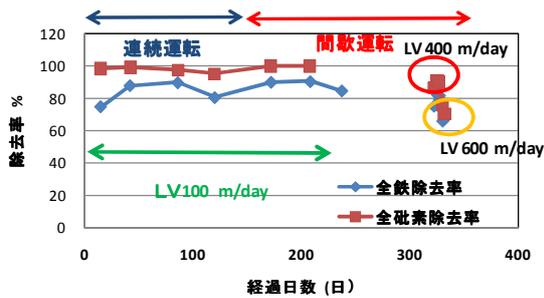


図2 第1期試験

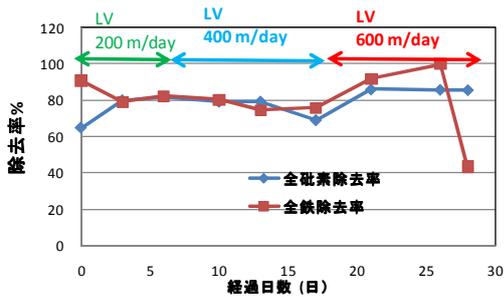


図3 第2期試験

では新品で微生物について馴致していないろ材から試験を行ったため初期の砒素除去率がやや悪いが5日程度で安定した。その後、通水速度を600 m/dayとしても、砒素除去率は安定していた。このことから、第1期試験ではろ材が第2期試験に比べてやや粗い(比表面積が小さい)ために、原水と微生物の接触面積が不十分になり、除去率が低下した可能性が考えられた。第1期試験のろ材では物理的ろ過効果が第2期試験に比べてやや劣っていたことも考えられた。

表1 鉄バク法パイロット試験の初期費用と維持費用		
初期費用項目	費用	内訳
ろ過装置本体	¥404,820	ろ過塔・くみ上げ及び逆洗ポンプ・弁・管
制御盤	¥1,228,680	制御盤本体・流量計・水位センサー
設置費用	¥135,270	輸送・電気配線工事・地下水くみ上げポンプ・事前処理工事
計	¥1,768,770	
維持・管理費用		
電気代	費用	内訳
	¥1,980	① 250W汲み上げ用ポンプ24h/dayで30日間運転した時の費用
		② 250W逆洗ポンプ20min/dayで30日間運転したときの費用
		③ 100W制御盤を24h/dayで30日間運転した時の費用
凝集剤	¥65	1日2回の逆洗を10分間、1000L/hで30日間行った時の逆洗排水中に370mg/Lの濃度になるように添加したときの費用
消毒用塩素	¥74	処理水中に有効塩素濃度0.5mg/Lになるように添加したときの費用
計	¥2,119	

また、これらの結果から、1時間通水し3時間通水停止するという間歇的な通水方式や、不定期な停電による通水の停止などは鉄バク法の性能に大きく影響しないこと、3価砒素の多い原水でも処理可能なこと、が判った。

(3) 鉄バク法の経済的側面

パイロット試験の初期費用と維持管理にかかる費用を表1に示す。カラムの直径は0.2m、処理水の排出量は18・8m³/dayの装置を使い、LV 600m/dayで毎日24時間運転したと仮定して、維持費を算出した。本法では薬剤として、逆洗排水中に含まれる鉄バクフロックを凝集させるポリ塩化アルミニウムと処理水への消毒を目的とした次亜塩素酸ナトリウムが必要である。本法で使用するろ材はレンガや砂などで現地において安価で入手可能で、馴致されたろ材の方が除去率がいいことから、ろ材交換の必要がない。また、バングラデッシュの貧困層の農民の水使用量が一世帯あたりに30L/dayとして一か月に水の費用として払える額が99円から108円程度であるとの報告がある。同仮定条件下で鉄バク法を用いると、627世帯の生活を支える事ができ、一か月に62,010円から67,680円の歳入をえて、その歳入から初期費用を27から30カ月で返済できる。装置の寿命はポンプの管理とメンテナンスを行うことで6年以上となる。このことから、鉄バク法砒素除去は、発展途上国でも経済的に維持可能な方法と考えられる。

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15件)

1. 藤川陽子、ベトナム・ハノイにおける「生物ろ過による水中の鉄・砒素同時除去」セミナー、環境技術、40、247-251(2011)。査読無

2. 藤川陽子、米田大輔、大谷直生、菅原正孝、濱崎竜英、ポールルータス、携帯型分析器による土壌中の砒素・鉛等の分析 — ボルトンメトリ法の適用、第16回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、151-156(2010)。査読無

3. 藤川陽子、菅原正孝、濱崎竜英、米田大輔、南淳志、杉本裕亮、岩崎元。砒素・鉄・マンガン・アンモニア同時除去の鉄バクテリア生物ろ過、大阪産業大学人間環境論集、9、261-276(2010)。査読無

4. Lewtas P., Fujikawa Y., Hamasaki T., Sugahara M., Yoneda D., Field analysis of arsenic by voltammetry -Practical techniques for reduction of interferences. Arsenic in Geosphere and Human Diseases.4830385 (2010). 査読有

5. Fujikawa, Y., Sugahara, M., Hamasaki, T., Yoneda, D., Minami, A., Sugimoto, Y. & Iwasaki, H., Takada, K., Tani, S., 6 - year pilot study of the biological filtration for low-cost arsenic removal. Arsenic in Geosphere and Human Diseases.457-459 (2010). 査読有

6. 藤川陽子、菅原正孝、濱崎竜英、生物起源資材による有害金属成分等の選択的吸着と資材選抜の考え方 用水と廃水 51 (9)、571-580, 2009 査読無

7. 藤川陽子、濱崎竜英 菅原正孝 杉本裕亮 南淳志、Phan Do Hung、Suresh Das Shrestha、Paul Lewtas、携帯型分析器を用いたベトナム・ネパールの地下水の砒素含有状況調査 環境衛生工学研究 23 (3)、179-183 (2009) 査読無.

8. 藤川陽子 濱崎竜英 菅原正孝 杉本裕亮 南淳志 ポール ルータス、ボルタンメトリ法によるオンサイト分析技術を活用した地下水中砒素等の調査 第15回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会、680-685 (2009) . 査読無

9. Y. Fujikawa, K. Takada, A. Minami, S. Tani, Y. Sugimoto, T. Hamasaki, M. Sugahara, K. Tonokai, Biological Elimination of Iron, Manganese, Arsenic and Ammonia to Replace the Existing System. Proc. of The 8th International Symposium on Water Supply, Kobe, Japan (2009) 657-658. 査読無

10. 藤川陽子、池島正浩、雪本正佳、田村太喜男、高田勝己、濱崎竜英、鉄バクテリア活用の水処理技術 3.実用化に向けての技術と事例、用水と廃水、50 (4)、277-287、2008. 査読無

11. 濱崎竜英、藤川陽子、菅原正孝、殿界和夫、西田一雄、谷外司、地下水・湧水中鉄バクテリア法の性能と課題、第14回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会、13-18 (2008) . 査読無

12. 藤川陽子、濱崎竜英、菅原正孝、南淳志、本間徹生、高田勝己、地下水・湧水中鉄バクテリア法の原理、第14回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会、512-515 (2008) . 査読無

13. 藤川陽子、南淳志、杉本裕亮、谷外司、高田勝己、菅原正孝、濱崎竜英、殿界和夫、生物濾過法による地下水中砒素・鉄・マンガンのアンモニア同時除去一ろ材の選択と馴致

条件について、環境衛生工学研究、22(3),140-143、2008. 査読無

14. Fujikawa Y., Yashima H., Minami A., Hamasaki T., Sugahara M., Honma T., XANES Analysis of Mechanisms of Arsenic(III) Removal in the Reactor Colonized by Iron Bacteria: Arsenic (III) Oxidized after Sorption ?. IWA World Conference, Vienna, Austria (2008) 査読有

15. Hamasaki, T., Fujikawa, Y., Sugahara, M., Minami, A., Yoneda, D., Tonokai, K., Tani, S. and Nishida, K.: Arsenic Removal from Groundwater using indigenous Iron and Manganese Oxidizing Bacteria, Proc. IWA Water Congress and Exhibition, Vienna (2008). 査読有 [学会発表] (計19件)

1. 岩崎元、菅原正孝、濱崎竜英、大谷昌弘、大橋朋、川埜慎介、郭驍、魏明林、藤川陽子、Phan Do Hung、ベトナムにおける鉄バクテリア法の適用、第45回日本水環境学会年会 (2011/3/18).

2. 藤川陽子、岩崎元、橋口亜由未、濱崎竜英、菅原正孝、本間徹生、平山明香、高速通水条件下での生物ろ過法による砒素・鉄処理過程のリアルタイム XAFS 測定、第45回日本水環境学会年会 (2011/3/18).

3. 橋口亜由未、岩崎元、尾崎博明、菅原正孝、濱崎竜英、藤川陽子、谷外司、Phan Do Hung、アジア途上国への鉄バクテリア法の適用に向けての装置運転条件の検討、環境技術学会第10回研究大会(2010/9/10).

4. 岩崎元、菅原正孝、濱崎竜英、郭驍、魏明林、藤川陽子、谷外司、鉄バクテリア法砒素・マンガン除去のパイロット試験—7年目の課題—、環境技術学会第10回研究大会 (2010/9/10).

5. 岩崎元、杉本裕亮、橋口亜由未、濱崎竜英、菅原正孝、藤川陽子、谷外司、Phan Do Hung、ベトナムにおける鉄バクテリア法による地下水中砒素等除去の現状と課題、第65回土木学会年次学術講演会 (2010/9/3).

6. 橋口亜由未、菅原正孝、濱崎竜英、尾崎博明、杉本裕亮、岩崎元、田中裕佳、藤川陽子、谷外司、本間徹生、平山さやか、鉄バクテリア法で形成される鉄・マンガン酸化物中のマンガン価数の変化、第65回土木学会年次学術講演会 (2010/9/3).

7. 藤川陽子、姜博、岩崎元、米田大輔、菅原正孝、濱崎竜英、谷外司、鉄バクテリア法砒素除去に伴い発生する汚泥の砒素溶出特性の検討、第65回土木学会年次学術講演会 (2010/9/3).

8. 岩崎元、杉本裕亮、姜博、橋口亜由未、

田中裕佳、菅原正孝、濱崎龍英、藤川陽子、谷外司、鉄バクテリア法における砒素除去効率向上のための運転条件の検討、第 44 回日本水環境学会年会(2010/3/15)

9. 杉本裕亮、藤川陽子、米田大輔、岩崎元、田中裕佳、橋口亜由美、菅原正孝、濱崎龍英、谷外司、室内カラム実験及び現場試験による溶解性マンガン生物酸化機構の検討、第 44 回日本水環境学会年会 (2010/3/16)

10. 藤川陽子、杉本裕亮、岩崎元、橋口亜由美、田中裕佳、濱崎龍英、菅原正孝、本間徹生、平山明香、連続通水の生物反応塔におけるマンガン等の吸着・酸化過程のリアルタイム観測の試み、第 44 回日本水環境学会年会(2010/3/16)

11. 藤川陽子、杉本裕亮、岩崎元、菅原正孝、濱崎龍英、南淳志、高田勝己、谷外司、櫻井伸治、本間徹生、塩素酸対策としての水中アンモニア・鉄・マンガン・砒素の生物処理法、土木学会第 64 回年次学術講演会(2009/9/9).

12. 姜博、藤川陽子、菅原正孝、米田大輔、鉄バクテリア法による砒素除去後の逆洗汚泥処理法の検討、第 9 回環境技術学会研究発表大会(2009/9/11).

13. 岩崎元、藤川陽子、菅原正孝、杉本裕亮、鉄バクテリア法における LV600m/day でのアンモニア・砒素・鉄・マンガン同時除去、第 9 回環境技術学会研究発表大会(2009/9/11).

14. 杉本裕亮、藤川陽子、菅原正孝、岩崎元、鉄バクテリア法の海外展開にむけてーハノイ周辺とカトマンズでの地下水調査、第 9 回環境技術学会研究発表大会(2009/9/11).

15. 杉本裕亮、藤川陽子、南淳志、谷外司、濱崎龍英、菅原正孝、生物酸化法によるアンモニア等除去ー浄水処理のためのパイロット試験、第 43 回日本水環境学会年会、(2009/3/18)

16. 藤川陽子、南淳志、杉本裕亮、水嶋智之、佐藤文仁、濱崎龍英、菅原正孝、櫻井伸治、八島浩、本間徹生、平山明香、生物酸化鉄による 3 価砒素の吸着現象の特異性、第 43 回日本水環境学会年会(2009/3/18)

17. 藤川陽子、南淳志、杉本裕亮、櫻井伸治、菅原正孝、濱崎龍英、本間徹生、地下水・湧水中砒素除去の鉄バクテリア法の原理ーXAFS とパイロット試験による検討、土木学会第 63 回年次学術講演会(2008/9/12).

18. 杉本裕亮、南淳志、濱崎龍英、藤川陽子、鉄バクテリアへの 3 価砒素及び 5 価砒素の吸着速度、第 8 回環境技術学会研究発表大会、(2008/9/19)

19. 南淳志、藤川陽子、谷外司、高田勝己、杉本祐亮、濱崎龍英、菅原正孝、鉄バクテリア法による浄水製造における課題、第 8 回環境技術学会研究発表大会(2008/9/19).

〔図書〕(計 1 件)

1. 藤川陽子、水浄化技術の最新動向 (第一章 6 節 鉄バクテリア法砒素・マンガン除去)、シーエムシー出版 (2011 印刷中)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅原正孝 (SUGAHARA MASATAKA)

大阪産業大学 人間環境学部 教授

研究者番号：60026119

(2) 研究分担者

尾崎 博明 (OZAKI HIROAKI)

大阪産業大学 工学部 教授

研究者番号：40135520

濱崎龍英 (HAMASAKI TATSUHIDE)

大阪産業大学 人間環境学部 准教授

研究者番号：50340617

藤川 陽子 (FUJIKAWA YOKO)

京都大学 原子炉実験所 准教授

研究者番号：90178145

(3) 連携研究者

無し ()

研究者番号：