

ヒ素汚染地下水の亜ヒ酸酸化微生物とヒ素高蓄積植物の水耕栽培による 低コスト浄化技術の開発

Development of Water Treatment Technology Using Arsenic Oxidation Microorganism and Arsenic Hyperaccumulator Plant to Purify Arsenic Contaminated Groundwater

遠藤 銀朗^{1*}, 黄 毅², 宮内 啓介¹

GINRO ENDO^{1*}, YI HUANG² and KEISUKE MIYAUCHI¹

¹ 東北学院大学工学部環境建設工学科 〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1

² 東北学院大学工学総合研究所 〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1

* TEL: 022-368-7493 FAX: 022-368-7070

* E-mail: gendo@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University,
1-13-1, Chuo, Tagajo, Miyagi 985-8537, Japan

² Research Institute for Engineering and Technology, Tohoku Gakuin University,
1-13-1, Chuo, Tagajo, Miyagi 985-8537, Japan

キーワード: ヒ素汚染地下水, ヒ素・鉄微生物酸化, ヒ素高蓄積植物, 水耕栽培処理, 微生物・植物統合ヒ素除去システム

Key words: Arsenic contaminated groundwater, microbial arsenic and iron oxidation, arsenic hyperaccumulator plant, hydroponics treatment, integrated microbe and plant arsenic removal system

(原稿受付 2016 年 2 月 7 日 / 原稿受理 2016 年 2 月 12 日)

1. はじめに

ヒ素は重要視されなければならない環境汚染原因物質として、その環境基準が厳しく定められている。世界保健機関 (WHO) は、水中のヒ素濃度が 10 µg/L (10 ppb) を超えればその水は飲用水や生活用水として使用しないことを求めている²⁴⁾。わが国においても、温泉水や地下水にヒ素が含まれることがあることはよく知られているが、地下を浸透して流出する坑排水や滲出水にもヒ素が比較的高濃度に含まれることがある。また、河川および湖沼等のわが国の公共水に含まれるヒ素の環境基準値と一定の方法で土壌から水によって溶出されるヒ素の基準値も 10 µg/L 以下と定められている。

世界においてヒ素による環境汚染が特に深刻な問題となっているのは、地質学的要因によって地下水のヒ素汚染が広範囲に起こっている地域である。それらの地域としてよく知られているのがヒマラヤ山脈およびその支山脈であるホントワン山脈の南方・東南方に位置するインドス河流域 (パキスタン)、ガンジス川デルタ (ベンガル地方) およびブラマプトラ川デルタ (主としてバングラデシュ南部)、エーヤワディー河流域 (ミャンマー)、メコン川デルタ (カンボジアおよびベトナム)、ホン川流域 (ベトナム) などである。これらの地域は、いずれも中生代後期の造山活動によって形成された世界最大の山脈を含むヒマラヤ・チベット高地等を源流とする大河

の河口域である^{17,21)}。また、上記ヒ素を含む大河デルタの土壌はフミン質等の有機物を含有することが多いことから、その地下水はほぼ無酸素状態にある。したがって、これらの土壌に含有されているヒ素の大部分は還元された亜ヒ酸の状態として存在しており、ヒ酸等よりも水に容易に溶出しかつ毒性の高い形態の亜ヒ酸イオンとして地下水中に溶存している^{1,2,4)}。国内外におけるこのような地下水のヒ素汚染は、環境問題としてだけではなく、民生の質的向上や農業等の基盤となる産業の発展に必要な水資源上の問題としても解決が必要とされている。

上記のことから、地下水に含まれるヒ素を除去し清浄で安全な水資源として利用できるようにするための技術の必要性はきわめて大きいといえる。現在までに開発されているヒ素汚染水の主要な浄化技術として、凝集剤を用いる凝集沈殿除去法と吸着剤を用いる吸着除去法³⁾があるが、凝集剤や吸着剤の使用は農業用水などのような大量の産業用や生活用の地下水の浄化処理には経済的ではない。また、廉価な凝集沈殿除去法や吸着除去法では 10 µg/L 以下 (国によっては 50 µg/L 以下) のヒ素濃度基準を達成できないことも多い。我々がやっている研究の目的は、上記の南アジアや東南アジア等の新興国や開発途上国においてヒ素を含む大量の地下水を生活用水や農業用水等として利用できるようにするために、効率的かつ経済的なヒ素除去技術を開発することである。その

ための研究として、水中亜ヒ酸イオンのヒ酸イオンへの微生物酸化処理技術と、現地国に自生するヒ酸イオン蓄積植物の水耕栽培による地下水中ヒ素の高アフィニティ除去技術とを組み合わせ、地下水のヒ素汚染に苦しむ現地国の経済状況に見合った低コスト・高性能ヒ素除去技術の開発を行ってきた^{9,10)}。

本論文では、途上国や新興国において経済的に適用可能な地下水のヒ素除去技術の開発について、これまでの我々の研究で得られた成果を報告する。

2. ベトナム・メコンデルタにおけるヒ素汚染地下水とそれを利用することによる土壌ヒ素汚染の実態調査

本研究においては、まずベトナム、マレーシアおよび台湾の東南アジアにおけるヒ素による地下水汚染およびその地下水利用による土壌汚染の実態を調査した。特に、人口が急増しつつあるベトナム・メコンデルタ地方における地質学的要因等によって引き起こされた地下水ヒ素汚染を詳しく調査し、その汚染が深刻なものであることを確認した。また、そのヒ素含有地下水を灌漑農業

用水に利用することによる農地土壌のヒ素汚染についても併せて調査し、ヒ素汚染地下水で灌漑されている農地土壌はそれ以外の河川水を用いる農地土壌に比較して有意にヒ素含有量が増大しており、このようなヒ素汚染地下水を使用する灌漑農業は持続可能な農業とは言えないことを明らかにした。

我々はまずメコンデルタの地下水と水道水にヒ素がどのくらい含まれているかについて知見を得るために、ベトナム・メコンデルタの16箇所の井戸の地下水と2箇所の水道水を採取し、ヒ素分離カラムにより亜ヒ酸(As(III))とヒ酸(As(V))に分けて、ICP-MSを用いて分析を行った。その結果を図1に示すが、メコンデルタ地域の地下水サンプルのヒ素濃度はベトナムの生活用水基準値10 µg/Lおよび農業用水基準値50 µg/Lのいずれをも超えており、全ヒ素中に約80%のヒ素が亜ヒ酸として存在していることが分かった。また、このようなヒ素を含む地下水を灌漑用水として利用しているベトナム・メコンデルタの畑地土壌のヒ素含量は、図2に示したように、ベトナムの土壌環境基準(12 mg/kg 乾燥土壌)を超えるものになっていることが知られた。

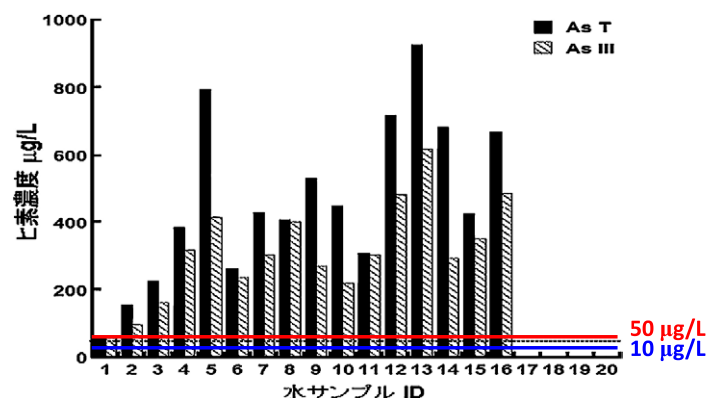


図1. メコンデルタ地域地下水のヒ素濃度調査結果

AsT: 全ヒ素, AsIII: 亜ヒ酸態ヒ素

地下水・農業用水のヒ素濃度基準: 50 mg/L, 生活用水のヒ素濃度基準: 10 mg/L

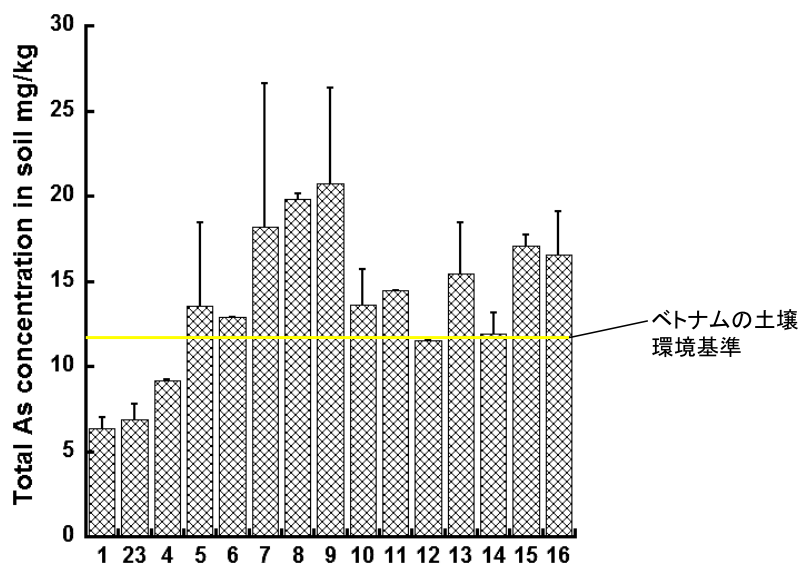


図2. ヒ素汚染地下水を灌漑に利用している土壌のヒ素濃度調査結果

3. ヒ素汚染地下水から経済的にヒ素を除去する生物処理技術の開発

3.1 微生物による水中溶存亜ヒ酸と2価鉄の酸化によるヒ素除去に関する研究

前述の通り、東南アジア・南アジアの大河デルタの地下水に溶存するヒ素は、環境基準値を超える高濃度であることが多いとともに、その多くが亜ヒ酸イオン（3価ヒ素）の形態として含まれている。また、ヒ素を高濃度に含有する地下水には、同時に鉄が還元状態で（ Fe^{2+} として）高濃度に溶存していることが多い。亜ヒ酸イオンの一般的性質として、その人体毒性がヒ酸イオン（5価ヒ素）よりも格段に高いだけではなく、水への溶解度が大きいことから土壌等からの溶出量が増大し高濃度地下水汚染を引き起こす^{18,22,24)}。このことは、凝集処理や吸着処理によって地下水からヒ素を除去することを困難にする原因にもなる。したがって、地下水からヒ素を除去するためには、まず地下水中に含まれる亜ヒ酸イオンを酸化してヒ酸イオンに変換することが必要である。

一方、地下水中に比較的高濃度に含まれる還元鉄イオン（ Fe^{2+} ）は、通常の pH の下で溶存酸素に触れることによって酸化され酸化鉄イオン（ Fe^{3+} ）になるが、水酸イオンと反応して不溶性の水酸化第二鉄となり沈殿を生ずることが多い。上記のヒ酸イオンはこの水酸化第二鉄に容易に結合し不溶化されることから、水酸化第二鉄とヒ酸とを共沈させて水溶液から取り除くことができる^{3,5,13)}。ただし、上記のように地下水に含まれる鉄イオンの酸化は溶存酸素によってもなされるが、亜ヒ酸の酸化は自然条件下では容易には酸化されることはなく^{3,11)}、塩素やオゾン等の強い酸化剤を用いて酸化することが必要になる。しかし、このような薬剤を使うことはヒ素除去コストの増大をもたらすことから、薬剤を使うことなしにヒ酸への酸化を促進する技術的方法を検討する必要がある。

3.1.1 微生物による亜ヒ酸酸化能力について

亜ヒ酸イオンを含む水を溶存酸素存在下で1ヶ月ほど放置しても酸化されることはないが、滅菌していない土壌をヒ素を含む水に導入して大気開放状態に置くと、比較的短期間にヒ酸イオンに酸化される。このような現象

は、非滅菌植物を導入した場合にも観察され、亜ヒ酸酸化細菌によるヒ素酸化として知られている^{11,16)}。

この好氣的条件下での亜ヒ酸酸化は、Silver ら¹⁹⁾、濱村ら^{6,7)} および山村ら²⁶⁾ の研究で示されているように、亜ヒ酸酸化酵素（AioA, B など）を有する細菌によってなされる。これらのことから、自然由来の亜ヒ酸酸化酵素を有する細菌によって亜ヒ酸を効率的にヒ酸に酸化するバイオ技術を開発することが、亜ヒ酸イオンによって汚染された地下水からヒ素を除去するために重要であると考えられる。また、山村と天知はこれまでの亜ヒ酸酸化酵素遺伝子に関する多くの研究を総説することで、亜ヒ酸酸化細菌として分離された細菌群や従属栄養細菌および独立栄養細菌の多様な環境細菌のゲノムに *aioA* 遺伝子が保有されていることを明らかにしている²⁵⁾。このような亜ヒ酸酸化能を有する自然環境中の微生物を活用するための亜ヒ酸酸化に適したバイオリクターを開発することによって、亜ヒ酸をより除去が容易なヒ酸に低コストで酸化するという上記の目的は達成できると考えられる。

3.1.2 ベトナム・ホーチミン市に設置したパイロットプラントを用いた水中溶存2価鉄および亜ヒ酸の酸化とそれによる地下水からのヒ素除去実験の結果

ベトナム・ホーチミン市の Nong Lam 大学構内において、現地実験のためのパイロットプラントを用いて実際のメコンデルタ地下水の鉄イオンの酸化と亜ヒ酸イオンの微生物酸化とそれら酸化物の共沈によりヒ素を除去するためのバッチ実験を行った。その際に、鉄およびヒ素酸化微生物の固定化担体として、水 *ing* (株) より提供いただいた BioGill® を使用した。その結果は、図3に示したように、地下水中に約 500 $\mu\text{g/L}$ の濃度で溶存している亜ヒ酸イオンのヒ酸イオンへの微生物酸化処理によって、高濃度（約 20 ~ 30 mg/L ）で共存する第一鉄イオンの第二鉄イオンへの酸化も同時に起こり、鉄イオンとヒ酸イオンの水酸化物としての共沈により全ヒ素濃度はベトナムの農業用水基準である 50 $\mu\text{g/L}$ 以下に低下できることが知られた。

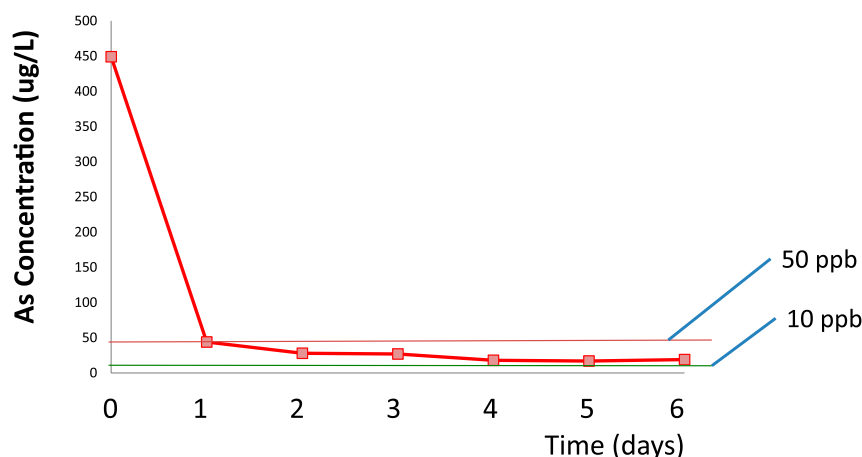


図3. 鉄・ヒ素酸化用微生物散水ろ床処理によるヒ素除去結果

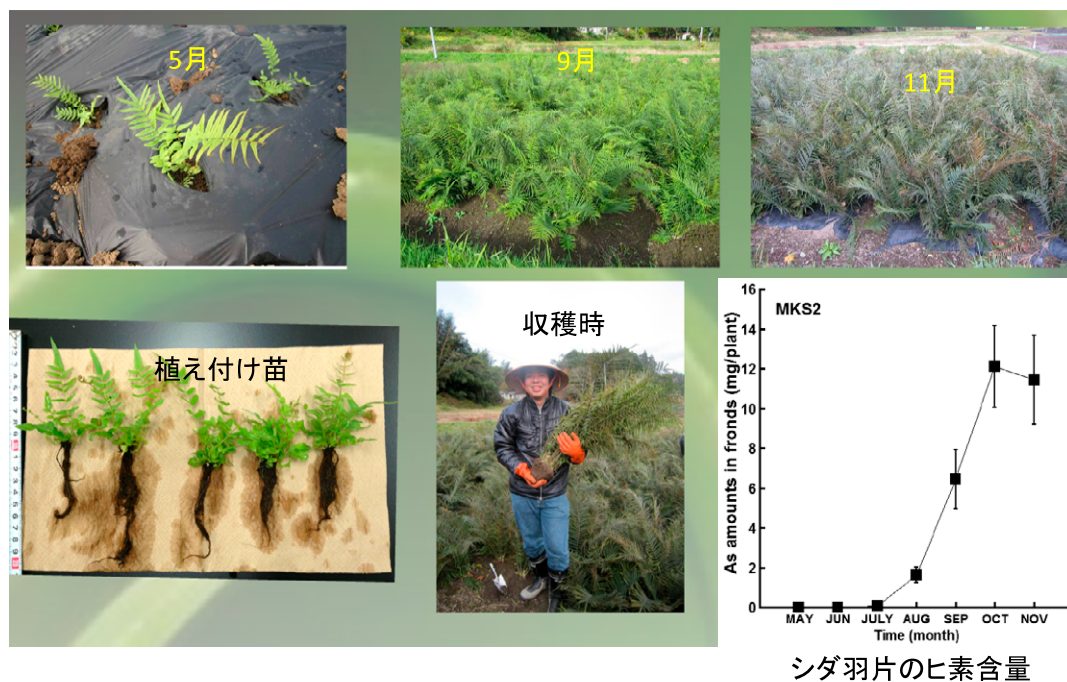


図4. 国内のヒ素汚染農地においてモエジマシダを土壌浄化処理に適用した際の栽培状況

3.2 ヒ素高蓄積植物モエジマシダの水耕栽培によるヒ素の高度除去に関する研究

微生物による酸化によって生成されたヒ酸イオンと空気酸化によって生成される水酸化鉄との結合のアフィニティーは、ヒ素の環境基準 ($10 \mu\text{g/L}$) を達成するには十分高くはなく、良好な条件での共沈処理でもヒ素濃度を $20 \mu\text{g/L}$ 程度以下にすることは困難なことが多い。そこで、本研究ではヒ素高蓄積植物等の水耕栽培における植物根細胞膜のヒ素能動輸送系を利用して、低濃度ヒ素の高アフィニティー吸収除去の可能性について調べた。

3.2.1 ヒ素高蓄積植物モエジマシダのヒ素除去能力と除去機構

ヒ素汚染を植物によって浄化することにより健康障害問題を解決するための技術的方法を開発することについて、ベトナムの低地から高地にかけて自生するシダ植物を採取し、そのバイオマス当たりのヒ素含量を調査した。その結果、*Pteris* 属のシダ植物はヒ素を高濃度で蓄積していることを明らかにできた。*Pteris* 属のシダ植物の中でも、モエジマシダ (*Pteris vittata*) はアジアの亜熱帯地域において広く自生する多年草で、植物乾燥重量あたり最大で約 22000 mg/kg ものヒ素を蓄積することが知られている^{12,14)}。通常の植物は、土壌中ヒ素濃度にも依存するが数十 mg/kg の蓄積濃度に留まり数百 mg/kg のヒ素を蓄積すると枯死するのとは大きく性質が異なる植物である。

ヒ素によって汚染された土壌の浄化には、ヒ素高蓄積植物で知られているモエジマシダを使用したファイトエキストラクション法の適用が効果的であることが知られている^{8,20)}。図4にモエジマシダを国内のヒ素汚染農地において土壌浄化処理に適用した際の栽培状況と浄化結果の一部を示す^{15,20)}。

モエジマシダが土壌中のヒ素を吸収し地上部に蓄積す

るメカニズムは、①土壌中に存在しているヒ素を根細胞膜のリン酸輸送系によってヒ酸として吸収する。②根および根茎でヒ酸還元酵素により亜ヒ酸に還元する。③亜ヒ酸は導管を經由し、地上部の羽片に遊離亜ヒ酸として蓄積する、と考えられている^{23,27)}。したがって、約90%のヒ素はシダの地上部に蓄積されることになる。また、モエジマシダの栽培方法はすでに確立しているため、ヒ素を浄化するファイトエキストラクションを行う上で優れた植物である。

3.2.2 ヒ素高蓄積植物の水耕栽培によるヒ素汚染水の室内処理実験の結果

我々のモエジマシダの室内水耕栽培実験によって、図5に示したようにモエジマシダ根茎を水面上に位置するようにすることによってこのシダを無曝気・低栄養の条件下でも水耕栽培できることが判明した¹⁰⁾。また、このモエジマシダをヒ素汚染水によって水耕栽培すると、ヒ素濃度 $400 \mu\text{g/L}$ の疑似ヒ素汚染水を4日程度で環境基準値以下に浄化することが可能という結果が得られた。また、図6に示したように、単に高濃度のヒ素を羽片部に蓄積するだけではなく水中ヒ素濃度を痕跡程度の低濃度にまで浄化することが知られ、ヒ素に対する高いアフィニティーを有することも明らかになった¹⁰⁾。モエジマシダは、生育環境により成長具合は変化するが、極端に劣悪な条件でない限り水耕栽培で十分に成長することから、様々な地下水の処理に適用できると考えられる。

ただし、上述のこの植物による吸収メカニズムで記したように、水中のヒ素はヒ酸イオンであることが必要とされることが知られている。しかし、3.1に示したように、前処理としての水酸化鉄との共沈処理によるヒ素除去のために、地下水に含まれる亜ヒ酸イオンは微生物酸化によりヒ酸イオンに酸化されているので、改めて地下水中の亜ヒ酸を酸化する必要はなく、共沈除去処理の後段の高度処理としてヒ素高蓄積植物であるモエジマシダ

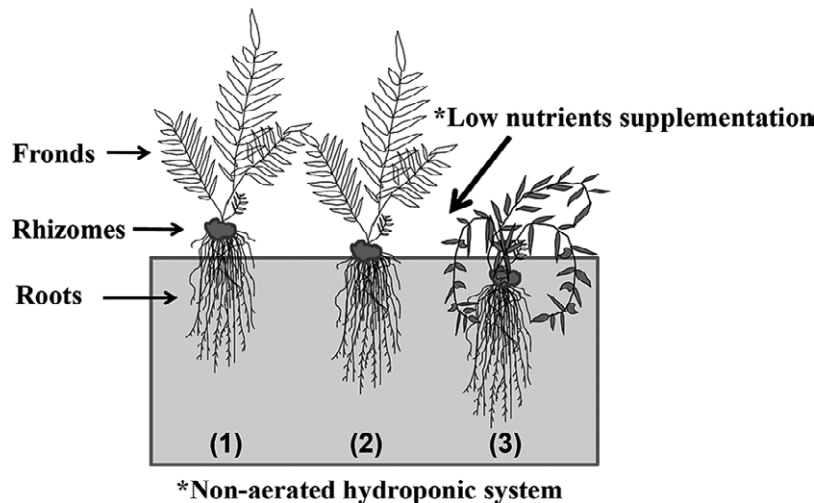


図5. 確立したモエジマシダの水耕栽培法の概要

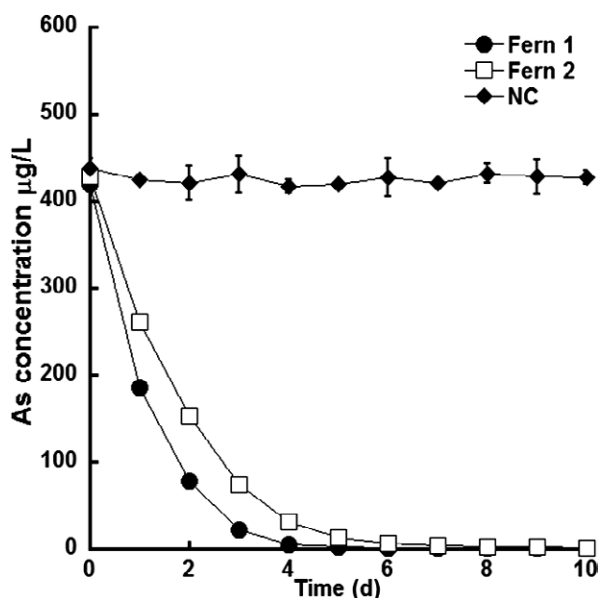


図6. モエジマシダ水耕栽培処理によるヒ素除去結果
 Fern 1: 前水耕栽培シダを使用, Fern 2: 前水耕栽培しないシダを使用, NC: シダ栽培なしのネガティブコントロール

の水耕栽培処理は効果的と考えられる。

3.2.3 ベトナム・ホーチミン市に設置したパイロットプラントを用いたモエジマシダ水耕栽培処理による地下水からのヒ素除去実験の結果

ベトナム・ホーチミン市の Nong Lam 大学構内において、水耕栽培系によるヒ素除去の現地実験のためのパイロットプラントを用いた模擬地下水からヒ素を除去するためのバッチ実験と連続実験を行った。前述のように、まず地下水中に約 500 $\mu\text{g/L}$ の濃度で溶存しているヒ素のヒ酸イオンへの微生物酸化処理によって鉄酸化物と共沈させてヒ素濃度が 20 ~ 40 $\mu\text{g/L}$ に低下した地下水について、さらにモエジマシダ水耕栽培処理を行った。その結果は、図7に示したように、最終水耕処理水中の全ヒ素濃度は 2 $\mu\text{g/L}$ 以下に低下することが知られ、生活用水のヒ素基準値を達成することができた。また、

この際モエジマシダによって吸収除去されたヒ素は、羽片部に比較的高濃度に蓄積されていることが知られた。

3.3 生活用水確保のための微生物酸化処理技術とヒ素高蓄積植物水耕栽培処理技術とを組み合わせたヒ素汚染地下水浄化プロセスの提案

本研究では、国内における基礎実験とベトナム現地におけるパイロットプラント実験の結果に基づいて、東南アジア・南アジア大河川デルタのヒ素汚染地下水の浄化技術の開発を検討した。この検討に当たっては、地下水からヒ素および鉄の除去を行い農村集落に水道水として給水することを目標としたが、東南アジア・南アジアの開発途上国農村地帯の経済状況に見合ったコストでの浄水処理が前提であることから、吸着材や凝集剤等の資材・薬剤の使用を極力行わないこと、および消費電力が極力小さい省エネルギー技術として開発することとした。そこで、上記に示したバイオ技術を最大限取り入れることとし、微生物酸化処理技術とヒ素高蓄積植物水耕栽培処理技術とを組み合わせた、ハイブリッド型省資材・省エネルギーバイオ浄化技術を開発することを検討した。

この検討の結果開発したプロセスの概要を図8に示す。誌面の都合上、開発技術の詳細を説明することはできないが、この技術は地下水中に含まれる亜ヒ酸と第一鉄を酸化するための散水ろ床装置、酸化鉄およびヒ酸を共沈除去するための中間沈殿槽、共沈処理水中のヒ素をさらに高度に除去するためのモエジマシダ水耕栽培処理装置、そして濁質を除去する（必要に応じてマンガンも除去する）ための緩速砂ろ過装置を組み合わせた浄水プロセス技術である。このプロセスによりヒ素汚染地下水を低コストで浄化し、簡易水道システムによって水道水として給水することが可能であると考えている。

4. おわりに

本研究では、ヒ素によって汚染された大量の地下水をできるだけ経済的に浄化し、生活用水や農業用水として利用できるようにする技術を開発することによって、特

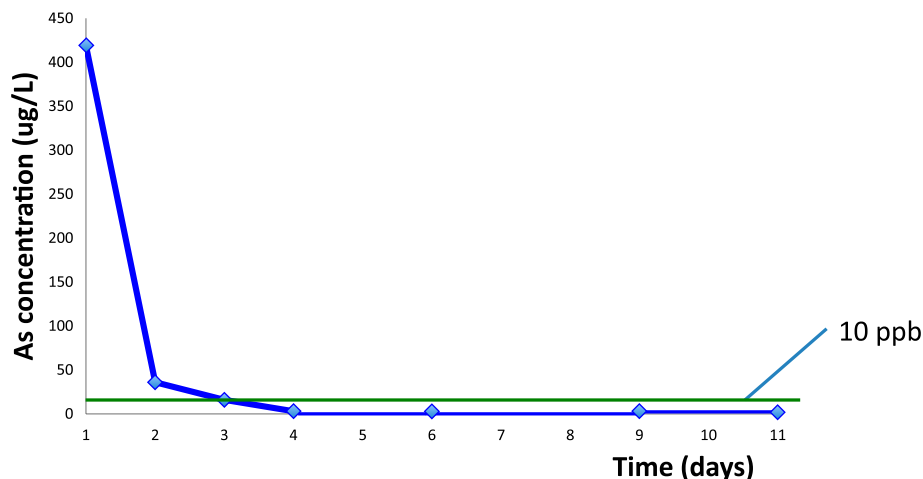


図7. 散水ろ床微生物酸化処理+モエジマシダ水耕栽培処理によるヒ素除去結果

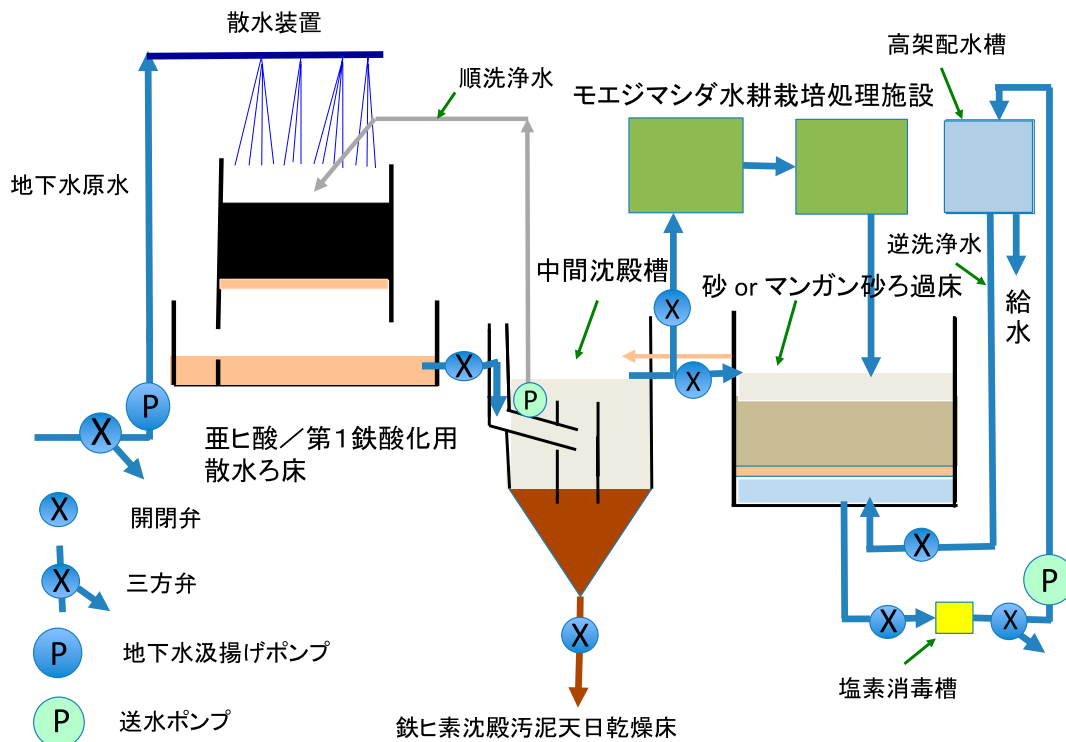


図8. 本研究の成果に基づいて提案するヒ素汚染地下水の浄水プロセス

に開発途上国の農村部等における地域開発を可能にすることを目的とした。研究の成果として、微生物によるヒ素と鉄の同時酸化技術とヒ素高蓄積植物の水耕栽培によるファイトレメディエーション技術を組み合わせたバイオ技術が有効であることを、実験室レベルおよび模擬ヒ素汚染地下水を用いた現地パイロット実験レベルで明らかにできたと考えている。しかし、この開発技術を南アジアおよび東南アジア等のヒ素汚染地下水の問題を抱える大河デルタ地域の現地において実際の地下水の浄化に適用し、その性能を評価すると共に、現地の社会状況や経済状況に見合った技術であるかどうかを検証することはこれからの課題となる。また、さらに経済性や処理効率の点で改善すべき点の検討や、微生物酸化処理によっ

て発生する鉄／ヒ素水酸化物の後処理・処分方法およびモエジマシダ羽片バイオマスに蓄積されたヒ素の処理・処分方法の検討が課題として残されている。これらの処理処分方法として酸化鉄沈殿物の鉄鉱石としての回収・利用や、シダバイオマス焼却灰の不溶性レンガへの加工やセメント固化などが選択肢となる。これらの開発課題を含め、今後はヒ素汚染地下水の総合的水処理技術としての完成が必要である。さらには、南アジアおよび東南アジアヒ素汚染地帯他における地下水浄化技術としての普及に取り組む必要があると考えている。

謝 辞

本研究を行うにあたり、多くのご助言をいただいた東北大学大学院環境科学研究科の井上千弘先生、(株)フジタ・建設本部・環境エンジニアリングセンターの北島信行博士、水ing(株)・技術開発統括の渡邊昭氏に感謝いたします。また、ベトナム現地での調査およびパイロットプラント実験では、Nong Lam University, Research Institute for Biotechnology and Environment の Le Dinh Don 教授, Nguyen Ngoc Ha 博士および Nguyen Cong Manh 氏のご協力を得ましたことに感謝いたします。

なお、本研究は文部科学省科研費・基盤研究(B)(海外学術調査)(No. 24404018)および三井物産環境基金(No. R11-F1-011)より研究助成を受けて実施したことを付記し、謝辞といたします。

文 献

- Agusa, T., R. Kubota, T. Kunito, T.B. Minh, P.T. Trang, C. Chamnan, H. Iwata, P.H. Viet, T.S. Tana, and S. Tanabe. 2007. Arsenic Pollution in Groundwater of Vietnam and Cambodia. A Review. Biomed. Res. Trace. Elements. 18: 35–47.
- Berg, M., C. Stengel, P.T.K. Trang, P. Hung Viet, M.L. Sampson, M. Leng, S. Samreth, and D. Fredericks. 2007. Magnitude of arsenic pollution in the Mekong and red river deltas—Cambodia and Vietnam. Sci. Total Environ. 372(2–3): 413–425.
- Bissen, M. and F.H. Frimmel. 2003. Arsenic—a Review. Part II: Oxidation of arsenic and its removal in water treatment. Acta hydrochimica et hydrobiologica 31(2): 97–107.
- Buschmann, J., M. Berg, C. Stengel, L. Winkel, M.L. Sampson, P.T. Trang, and P.H. Viet. 2008. Contamination of drinking water resources in the Mekong delta floodplains: Arsenic and other trace metals pose serious health risks to population. Environ. Int. 34: 756–764.
- Clifford, A.D. and L.G. Ghurye. 2002. Metal-oxide adsorption, ion exchange, and coagulation-microfiltration for arsenic removal from water. pp. 217–245. In W.T. Frankenberger (ed.) Environmental Chemistry of Arsenic. Marcel Dekker, New York, USA.
- Hamamura, N., R.E. Macur, S. Korf, G. Ackerman, W.P. Taylor, M. Kozubal, A.-L. Reysenbach, and W.P. Inskeep. 2009. Linking microbial oxidation of arsenic with detection and phylogenetic analysis of arsenite oxidase genes in diverse geothermal environments. Environ. Microbiol. 11: 421–431.
- Hamamura, N., K. Fukushima, and T. Itai. 2013. Identification of antimony- and arsenite-oxidizing bacteria associated with antimony mine tailing. Microbes & Environ. 28: 257–263.
- Hatayama, M., T. Sato, K. Shinoda, and C. Inoue. 2011. Effects of cultivation conditions on the uptake of arsenite and arsenic chemical species accumulated by *Pteris vittata* in hydroponics. Journal of Bioscience and Bioengineering. 111(3): 326–332.
- Huang, Y., M. Hatayama, and C. Inoue. 2011. Characterization of As efflux from the roots of As hyperaccumulator *Pteris vittata* L. Planta. 234: 1275–1284.
- Huang, Y., K. Miyauchi, I. Inoue, and G. Endo. 2016. Development of suitable hydroponics system for phytoremediation of arsenic-contaminated water using an arsenic hyperaccumulator plant *Pteris vittata*. Bioscience Biotechnology and Biochemistry. 80(3): 614–618.
- 簡 梅芳, 小幡和貴, 黃 毅, 宮内啓介, 遠藤銀朗. ヒ素高蓄積植物による土壌ヒ素の吸収・除去と土壌微生物の亜ヒ素酸化に関する研究. 土木学会論文集 G (環境). 69(7): III_9–15.
- Kertulis-Tartar, G.M., L.Q. Ma, C. Tu, and T. Chirenje. 2006. Phytoremediation of an arsenic-contaminated site using *Pteris vittata* L.: a two-year study. Int. J. Phytoremediation. 8(4): 311–322.
- Kumar, P.R., S. Chaudhari, K.C. Khilar, and S.P. Mahajan. 2004. Removal of arsenic from water by electrocoagulation. Chemosphere. 55(9): 1245–1252.
- Ma, L.Q., K.M. Komar, C. Tu, W.H. Zhang, Y. Cai, and E.D. Kennelley. 2001. A fern that hyperaccumulates arsenic - a hardy, versatile, fast-growing plant helps to remove arsenic from contaminated soils. Nature. 409: 579.
- 宮内啓介, 簡 梅芳, 黃 毅, 大友俊介, 和泉卓也, 井上千弘, 北島信行, 遠藤銀朗. 2013. 津波による土壌のヒ素汚染とその修復への取り組み. J. Environmental Biotechnology (環境バイオテクノロジー学会誌). 13(1): 27–30.
- Oremland, R.S. and J.F. Stolz. 2003. The ecology of arsenic. Science. 300: 939–944.
- Penn, J.R. 2001. Rivers of the world: a social, geographical, and environmental sourcebook. ABC-CLIO. Santa Barbara. CA. USA.
- Rahman, M.M., R. Naidu, and P. Bhattacharya. 2009. Arsenic contamination in groundwater in the Southeast Asia region. Environ. Geochem. Health. 31: 9–21.
- Silver, S. and L.T. Phung. 2005. Genes and enzymes involved in bacterial oxidation and reduction of inorganic arsenic. Appl. Environ. Microbiol. 71: 599–608.
- Sugawara, K., A. Kobayashi, G. Endo, M. Hatayama, and C. Inoue. 2014. Evaluation of the effectiveness and salt stress of *Pteris vittata* in the remediation of arsenic contamination caused by tsunami sediments. Journal of Environmental Science and Health. 49(14): 1631–1638.
- Tamura, T., Y. Saito, S. Sieng, B. Ben, M. Kong, S. Choup, and S. Tsukawaki. 2007. Depositional facies and radiocarbon ages of a drill core from the Mekong River lowland near Phnom Penh, Cambodia: Evidence for tidal sedimentation at the time of Holocene maximum flooding. J Asian Earth Sci. 29: 585–592.
- Vaughan, D.J. 2006. Arsenic. Elements. 2: 71–75.
- Wang, J., F.J. Zhao, A.A. Meharg, A. Raab, J. Feldmann, and S.P. McGrath. 2002. Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata*. Uptake kinetics, interactions with phosphate, and arsenic speciation. Plant Physiol. 130(3): 1552–1561.
- WHO. 1993. Recommendations. Guidelines for drinking-water quality, 3rd ed.; The World Health Organization: Geneva, Switzerland.
- Yamamura S. and S. Amachi. 2014. Microbiology of inorganic arsenic: From metabolism to bioremediation. Journal of Bioscience and Bioengineering. 118(1): 1–9.
- Yamamura, S., M. Watanabe, N. Yamamoto, K. Sei, and M. Ike. 2009. Potential for microbially mediated redox transformations and mobilization of arsenic in uncontaminated soils. Chemosphere. 77: 169–174.
- Zhao, F.J., J.F. Ma, A.A. Meharg, and S.P. McGrath. 2009. Arsenic uptake and metabolism in plants. New Phytol. 181: 777–794.