

H-6 地下水利用に伴う広域的ヒ素汚染に対する地球環境保全のための環境計画に関する研究
(5) 飲料井戸などの小規模飲料水におけるヒ素除去手法の開発
(5) - 1 バングラデシュにおける飲料水供給装置のヒ素除去性能評価

東京大学

環境安全研究センター 山本 和夫

平成12年度～平成14年度合計予算額 13,064千円
(うち、平成14年度予算総額 2,484千円)

[要旨] 本研究はバングラデシュにおけるヒ素汚染地下水を浄化するための簡易浄化装置の性能評価を行ったものである。評価対象とした浄化装置はIARPとAIRPと呼ばれる浄化装置であり、主に鉄との共沈と砂ろ過によりヒ素を除去する。装置はすべて現地で調達可能な材料を使用し住民でメンテナンスが可能である。装置は鉄濃度が十分な箇所では良好な除去効率を示したが、鉄濃度が不足している箇所では除去効率が不十分である場合があった。また両濾過筒から濾材を直接採取し分析することで所定の濾層深さにおける濾材単位重量あたりフロック捕捉量の経時変化をみた結果、上向流濾過では深層濾過、下向流濾過では表層濾過の様相を呈していることが明らかになった。運転副産物として産出されるスラッジは適切に管理されておらず、改善が必要である。

[キーワード] ヒ素、砂ろ過、IARP、AIRP、飲料水

1. はじめに

近年バングラデッシュ・インド西ベンガル地方における地下水のヒ素汚染問題が顕在化している。地下水のヒ素汚染は地質由来の自然的要因に起因され、飲料水・生活用水の大半を tubewell からの地下水に依存しているバングラデッシュではヒ素を除去した安全な水を供給することが喫緊の課題である。

現地では多種のヒ素除去装置が試験的に導入されているが、使用上・維持管理上の問題よりすべての装置が適切に運転されているわけではない。また装置の構造がヒ素除去に最適なデザインであるというわけではない。

2. 目的

本研究では現地への適応能力が潜在的に高いと考えられる AIRP と IARP (数家族が利用できる規模の装置) を研究対象装置とし、まず現状把握のため現地で実際に利用されている AIRP・IARP について調査をおこない、その結果および考察から、処理水のヒ素濃度がバングラデッシュの水質基準値を超過する原因を明らかにするために実験ならびに既存の研究の整理をおこす事を目的とする。最終的には本研究で得られた知見をもとに、装置構造とメンテナンス方法に関する改善案を提起した。AIRP の構造を図 1、IARP の構造を図 2 に示す。

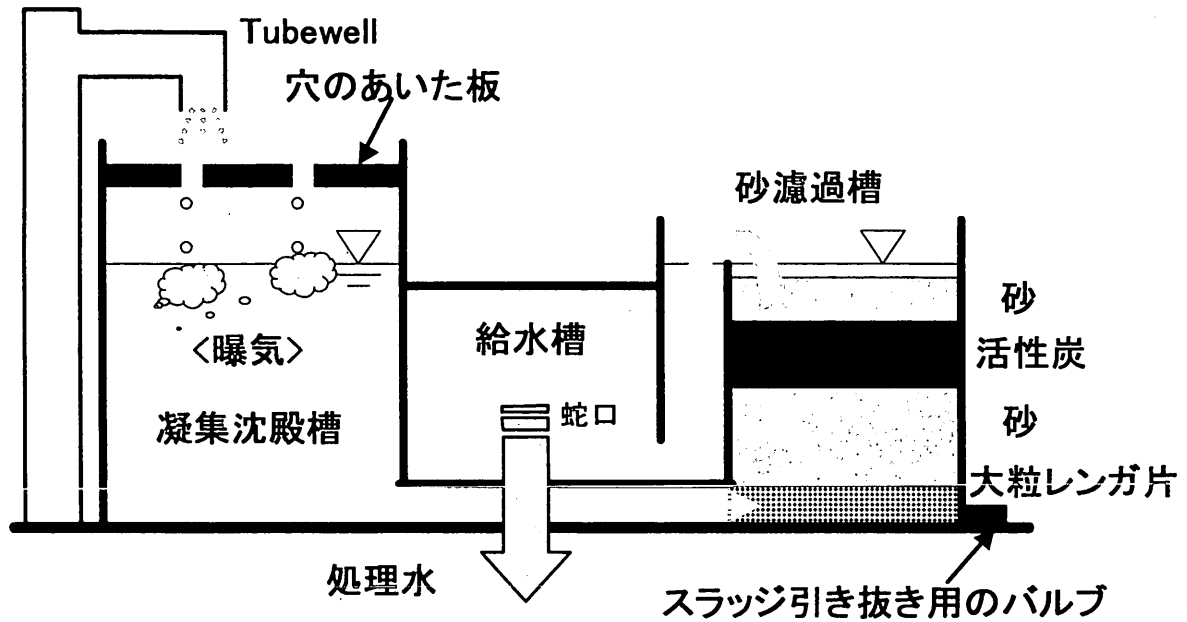


図1 AIRP の構造

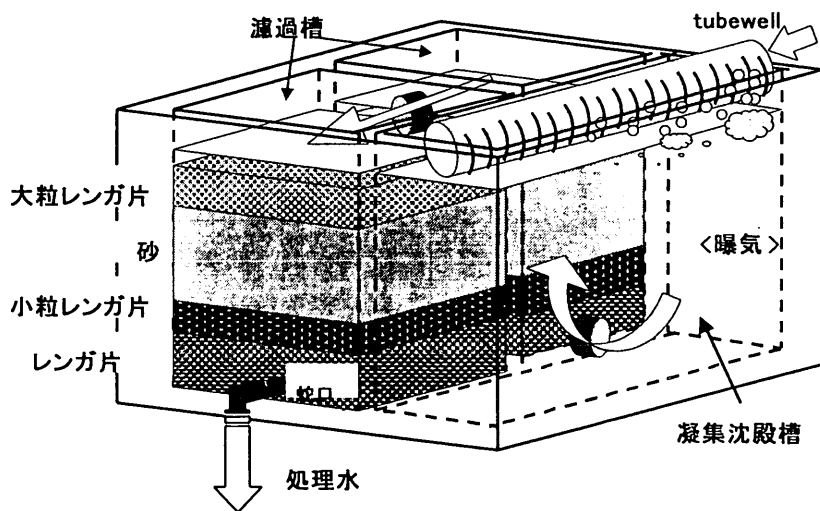


図2 IARP の構造

3. 研究方法：現地の AIRP・IARP に関する調査

本研究グループが実施した現地調査は2000年12月・2001年8月・2002年3月・2002年11月の4回である。それぞれの調査時に訪れた地域ならびに調査対象となったAIRP・IARPについて表1、図3に記す。また各調査時には大別して以下の3つの事項を調べた。

- ・ 水試料の採取ならびに水質分析
- ・ 現地測定
- ・ インタビュー

表1 現地調査の対象装置とその所在

District	Upzilla	本研究での名称	調査時期
Narayanganj	Sonargaon	AIRP1	2000/12, 2001/3
	Sonargaon	AIRP2	2001/3
	Sonargaon	AIRP3	2001/8
Manikgonj	Manikgonj	IARP1	2001/8, 2002/3
	Manikgonj	IARP2	2002/3
	Ghior	AIRP4	2002/3, 2002/11
	Ghior	AIRP5	2002/3, 2002/11
Comilla	Daudkhandi	AIRP6	2002/11

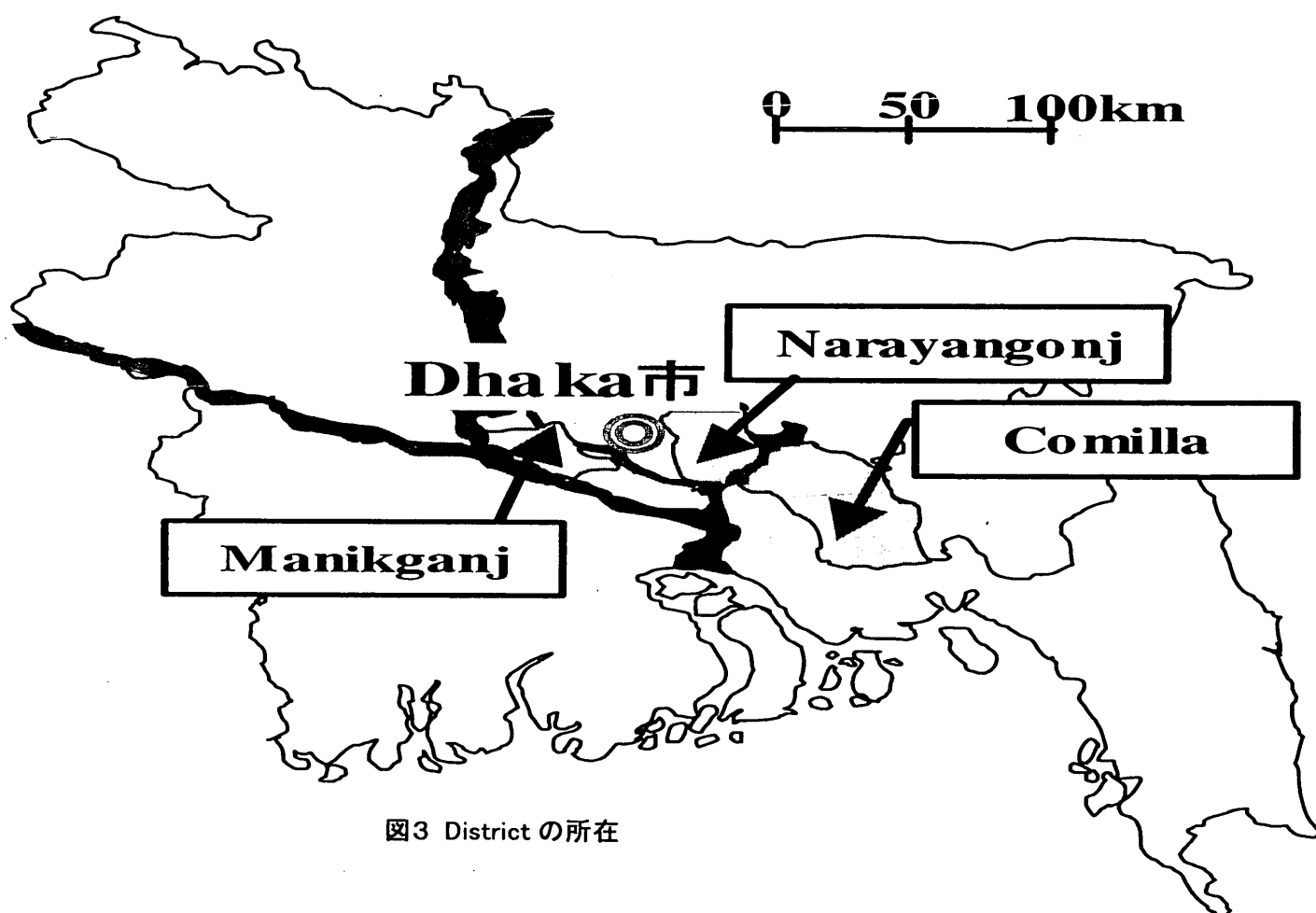


図3 Districtの所在

4. 結果・考察

4-1 採取した水試料の分析結果および考察

現地の AIRP または IARP から原水 (tubewell 水)・凝集沈殿槽下部の水・上向流砂濾過槽上部の水・処理水をサンプリングし、それぞれを孔径の異なる 2 種類のメンブレンフィルターで濾過することで試料水に含まれるヒ素化合物を 3 つの異なる粒径範囲に分割した。3 つの異なる粒径範囲のヒ素化合物の装置内推移を明らかにしたところ、いくつかの AIRP については処理水の全ヒ素濃度がバングラデッシュ水質基準値 (0.05mg/L) を超過していることが明らかになり、その原因は処理水中の溶存態ヒ素の残存 (図 4a)、または粒子状ヒ素の残存 (図 4b) である可能性が示された。この結果より、一部の AIRP ではヒ素除去効率が悪い原因として以下の 2 つの仮説をたてた。

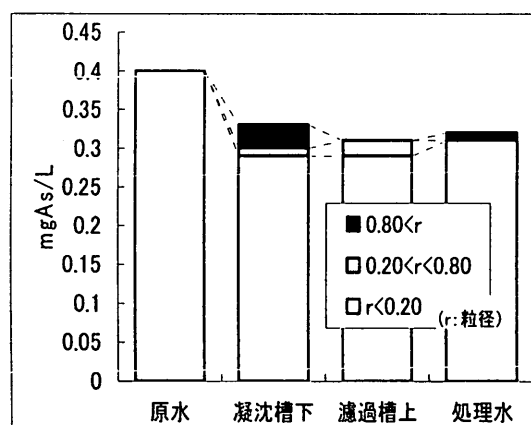


図 4a AIRP6 ヒ素の粒径別濃度変化(2002/11)

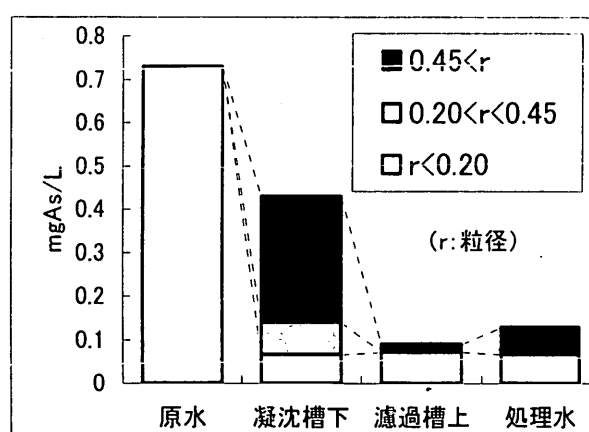


図 4b AIRP5 ヒ素の粒径別濃度変化(2002/3)

仮説①：凝集沈殿槽内で溶存態ヒ素の水酸化鉄への吸着が十分におこなわれておらず吸着されなかった部分が処理水中にまで残存した

仮説②：ヒ素と鉄のフロックが上向流砂濾過槽で完全に捕捉されず一部がリークした

またヒ素・鉄濃度以外の水質項目についてもいくつか注目すべき結果が得られた。まず微生物試験を実施したがその結果、測定した 3 つの AIRP の処理水からは大腸菌群が検出された。次にある AIRP (AIRP6) では原水が黄色く着色し、おそらく有機物汚染 (フミン質等による汚染) を受けていることがわかった。

4-2 インタビュー結果および考察

装置利用者は建設コストの一部を負担しなければならないがこの負担額は家計を逼迫するほどではなく、支障なく支払われていることがわかった。また AIRP や IARP は生活する上でもはやなくてはないものだとし、暖かく受け入れられていることがわかった。処理水の水質や装置の操作・メンテナンスについての不満も特になかった。そして砂濾過槽の濾材構成は地域によって異なっており、フロック除去に最適な構成を確立する必要があると考えられた。また装置洗浄後に排出されるスラッジは集積され廃棄されている地域もあれば、未処理のまま排出されている地域もあった。

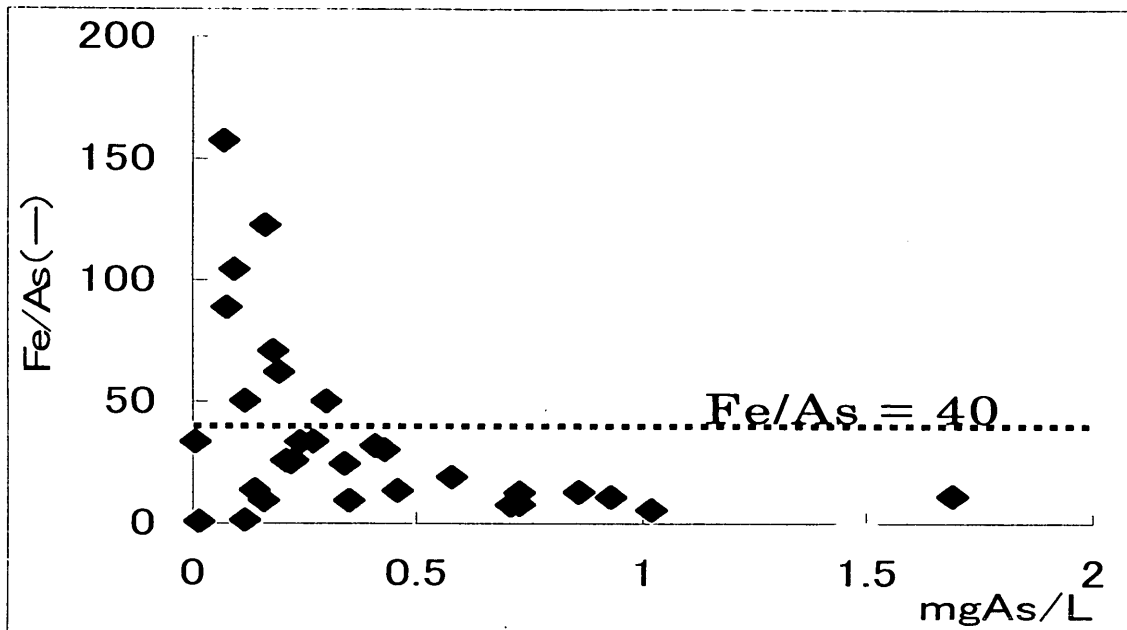


図 5 tubewell 水のヒ素濃度と鉄/ヒ素重量比の関係
 (呉・杉村による 2000/3-2002/11 実測データをもとに作成)

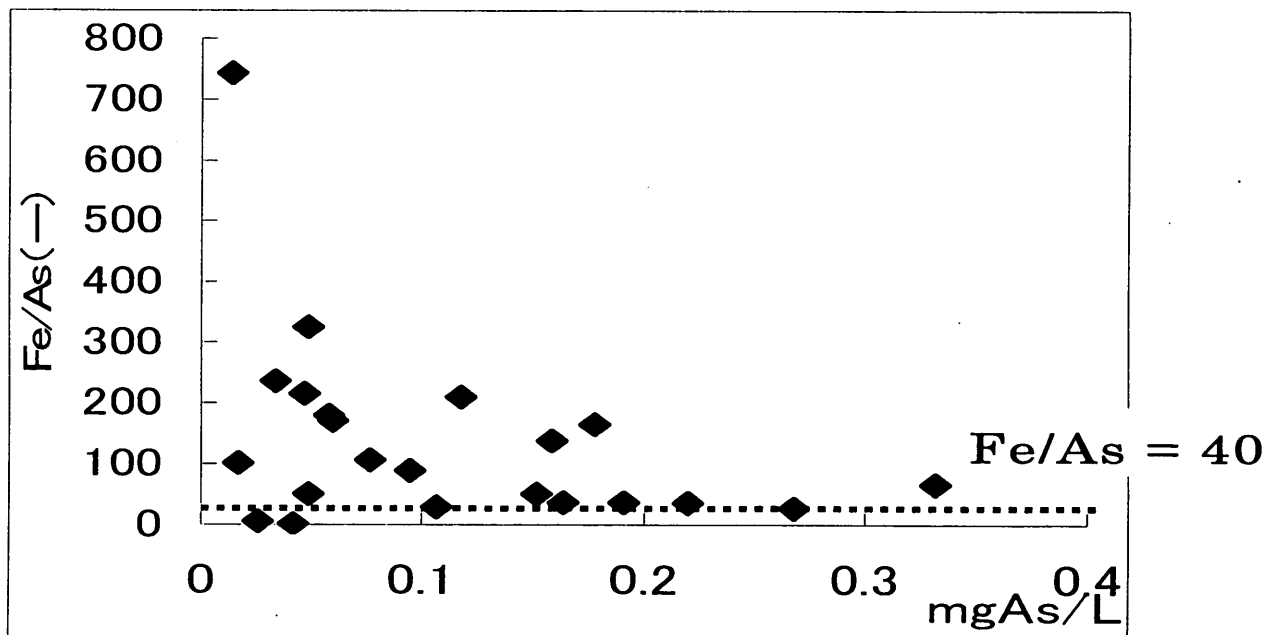


図 6 tubewell 水のヒ素濃度と鉄/ヒ素重量比の関係
 (Nickson らによる 1997/5-6 実測データをもとに作成)

4-3 tubewell 水の鉄/ヒ素重量比について

Mengら (2001)¹⁾ はバングラデッシュにある tubewell の水に含まれるヒ素の濃度を 0.05mg/L 以下に低下させるには、水中に共存する重炭酸イオン・珪酸イオン・リン酸イオン・硫酸イオンによる干渉作用を考慮すると、完全に鉄とヒ素が酸化される条件下で鉄/ヒ素重量比が 40 以上求められるとしている。この Meng の知見と現地調査結果 (表 5 参照) を照合した結果、整合性がみられた。AIRP4・5・6 と IARP1・2 については原水 (tubewell 水) の鉄/ヒ素重量比が 40 未満の場合、処理水を 0.20 μm メンブレンフィルターで濾過した試料のヒ素濃度 (すなわち処理水に含まれる溶存態ヒ素の濃度) は 0.05mg/L を超過していた。

これまで山本研究グループでは本研究での活動を含め合計 6 度のバングラデッシュ現地調査を実施し、30 の tubewell について水のヒ素濃度と鉄濃度を測定してきた。その実測データをもとに tubewell 水のヒ素濃度と鉄/ヒ素重量比の関係を表したのが図 3-1 である。また同様の現地調査を実施しその結果について述べている Nickson ら (2000)²⁾ の論文に掲載されたデータをもとに図 5 と同様の図を作成した (図 6)。両方の図より tubewell によって鉄/ヒ素重量比は異なるが、ヒ素濃度が高ければ重量比が減少する傾向にあることがわかった。図 5 によるとヒ素濃度が約 0.3mg/L 以上の場合は鉄/ヒ素重量比は 40 未満になる。よって tubewell 水のヒ素濃度が 0.3mg/L 以上のときには仮説① (鉄不足) が適用できる可能性が高いことが示唆される。

表 2 各装置における原水の鉄/ヒ素重量比

	調査時期	原水 鉄/ヒ素 (-)	原水ヒ素 (mg/L)	原水鉄 (mg/L)	処理水ヒ素		処理水鉄 (mg/L)
					未濾過 (mg/L)	0.20濾過 (mg/L)	
AIRP1	2000/12	5.5	1.0	5.6	0.41	-	0.47
AIRP1	2001/3	7.7	0.73	5.6	0.45	-	0.29
AIRP2	2001/3	30	0.43	13	0.17	-	0.93
AIRP3	2001/8	11	0.93	10	0.12	-	1.1
AIRP4	2002/3	100	0.094	9.8	0.018	0.018	0.011
AIRP4	2002/11	86	0.095	8.2	<0.01	<0.01	0.059
AIRP5	2002/3	13	0.73	9.3	0.13	0.067	0.93
AIRP5	2002/11	7.0	1.1	7.7	0.15	0.15	0.21
AIRP6	2002/11	1.2	0.40	0.47	0.32	0.31	0.25
IARP1	2001/8	50	0.30	15	0.016	-	0.96
IARP1	2002/3	72	0.18	13	0.019	0.017	0.32
IARP2	2002/3	88	0.08	6.8	0.037	0.035	0.18

「-」 No Data

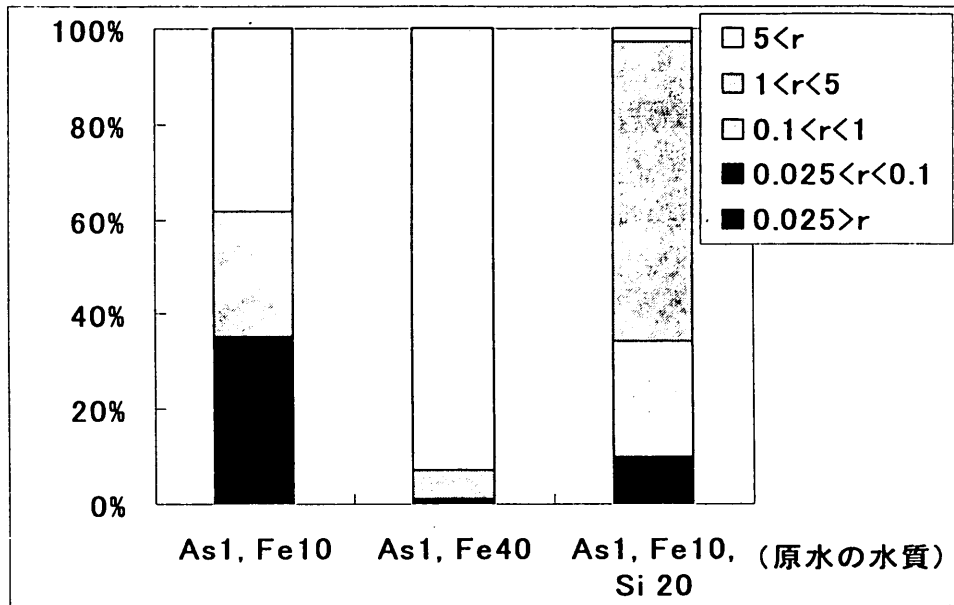


図7 3種類の異なる原水に含まれる
フロックの粒径範囲別存在割合

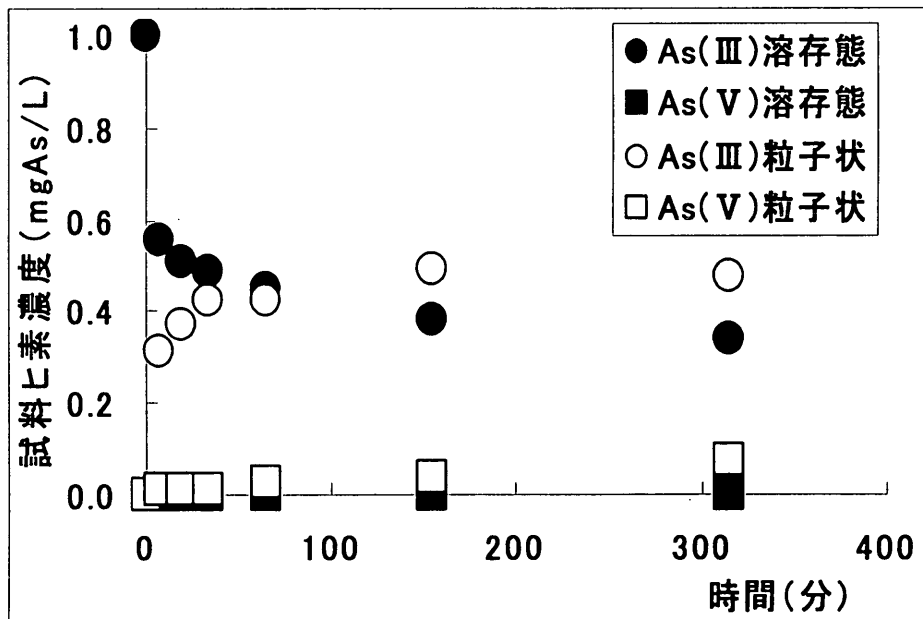


図8 バッチ凝集試験におけるヒ素の形態別濃度変化
(初期条件: As(III) 1.0mg/L, Fe(III) 5.0mg/L)

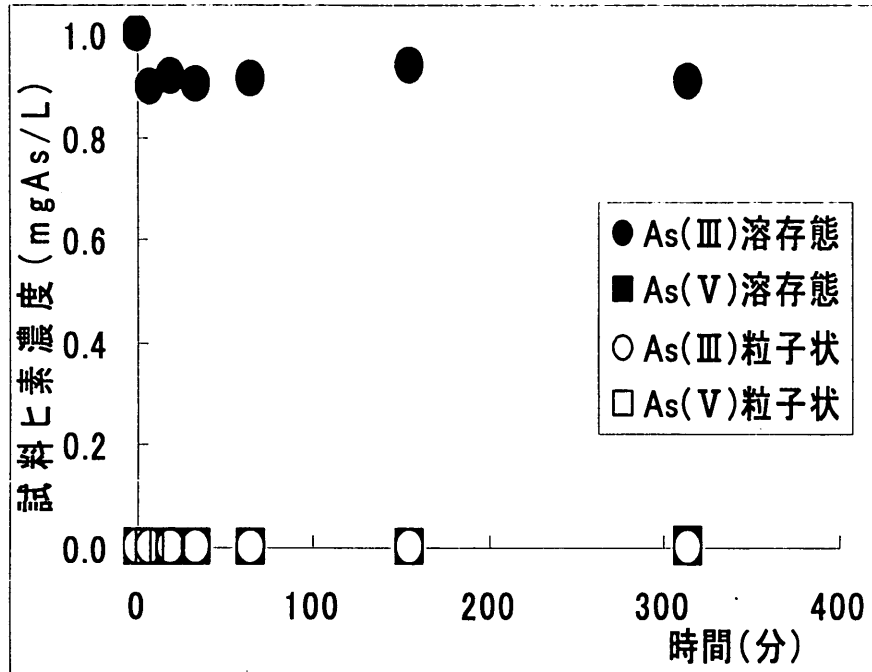


図9 パッチ凝集試験におけるヒ素の形態別濃度変化
(初期条件: As(III) 1.0mg/L, Fe(III) 0mg/L)

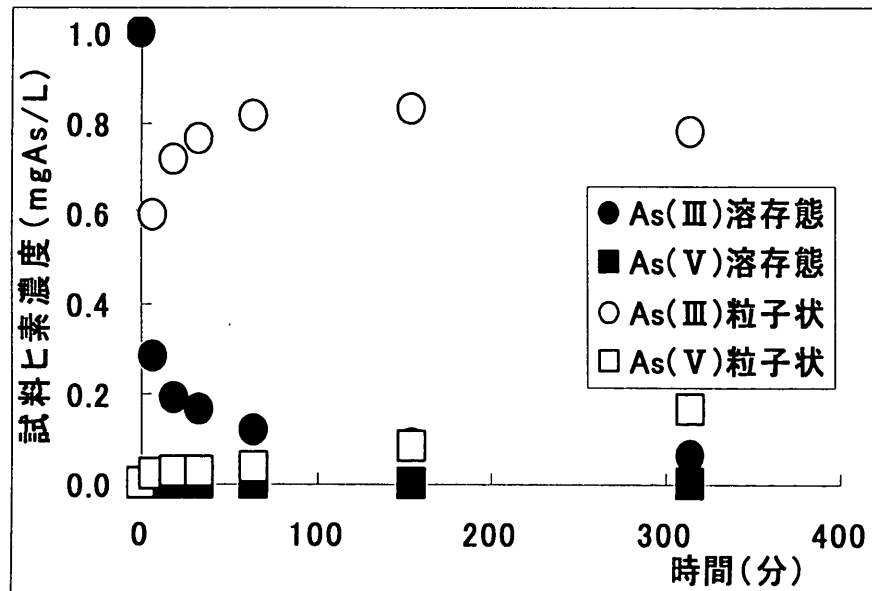


図10 パッチ凝集試験におけるヒ素の形態別濃度変化
(初期条件: As(III) 1.0mg/L, Fe(III) 20mg/L)

4-4 現地の濾材に関する研究

現地では濾材として粗砂 (60%有効径 0.72mm, 均等係数 2.6)・細かい砂 (60%有効径 0.38mm, 均等係数 1.5)・レンガ片・活性炭が用いられている。それらの溶存態ヒ素の吸着能を調べるために粗砂とレンガ片についてはカラム通水試験、大粒レンガ片と活性炭についてはバッチ吸着試験を実施した(データ未掲載)。その結果これらの濾材は少量の溶存態ヒ素を吸着することがわかった。溶存態ヒ素は砂鉄により吸着されたものと推測される。

4-5 フロックに関する研究

4-5-1 フロックの粒径分布

図 4-1 で示したように 3 種類の異なる原水を 36 時間自然放置後、容器下部より採取した水を孔径の異なる 4 種のフィルターを用いて濾過し、水中のフロックの粒径範囲別存在割合を明らかにした。その結果生成するフロックの粒径分布は原水の水質によって異なることがわかった。例えば図 7 中の実験条件①と実験条件③を比較すると、高濃度の珪素が含まれている③の方が微細なフロックを多く含んでいる。

4-5-2 フロック中のヒ素の存在形態変化

3 種類の異なる原水をもうけジャーテスターを用いて急速攪拌 (300rpm) させ、所定の時間に水試料を採取し、それに含まれているヒ素濃度の経時変化を存在形態別 (溶存態 As(III)・溶存態 As(V)・粒子状 As(III)・粒子状 As(V)) に解析した。

まず図 9 では原水に鉄は含まれていなかったが、実験開始当初は溶存態 As(III) しか検出されず、315 時間後に 0.0070mg/L 程度の濃度の溶存態 As(V) が検出されたことから、溶存態 As(III) から溶存態 As(V) への酸化は進行がきわめて遅いと考えられる。

次に図 8 では原水の鉄/ヒ素重量比が 5 であったが、実験開始当初に溶存態 As(III) が鉄に吸着されて粒子状 As(III) に変化する挙動がみられた。さらに時間が経つにつれ粒子状 As(III) は徐々に酸化され粒子状 As(V) に変化している。なお溶存態 As(III) の溶存態 As(V) への酸化は確認できなかった。

次に図 10 では原水の鉄/ヒ素重量比が 20 であったが、実験開始当初に多くの溶存態 As(III) が粒子状 As(III) に変化しており、その変化量は図 8 (鉄/ヒ素重量比 5) よりも大きかった。また粒子状 As(III) の粒子状 As(V) への酸化量も図 8 (鉄/ヒ素重量比 5) よりも大きかった。なお溶存態 As(III) の溶存態 As(V) への酸化は確認できなかった。

このことから、本実験では原水の鉄/ヒ素重量比が大きいほど溶存態 As(III) の吸着量、ならびに粒子状 As(III) の酸化量は増加することがわかった。

4-6 実験室カラムによる研究

4-6-1 と 4-6-2 で用いた実験装置の概要を図 11 に示す。この装置は現地の AIRP と IARP を想定して設計された。

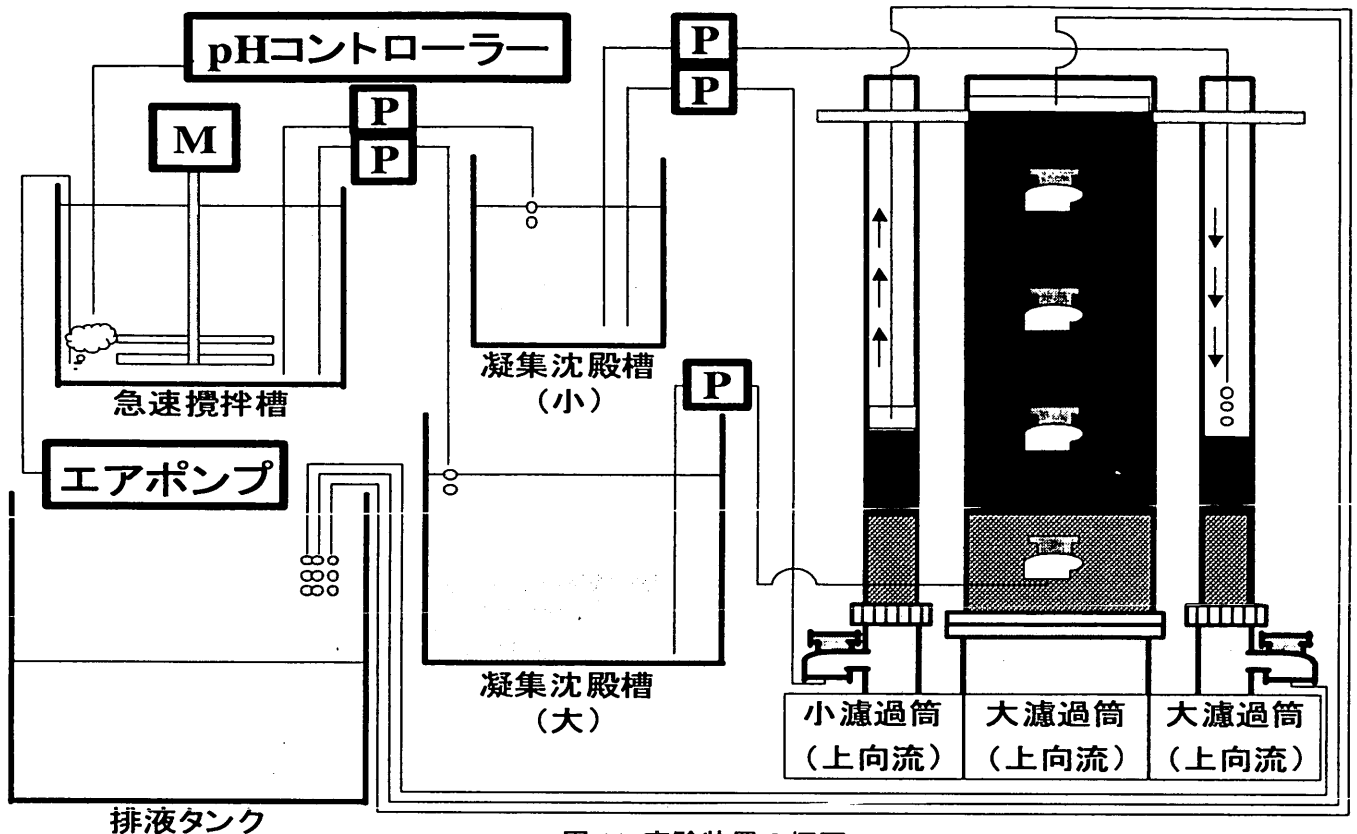


図 11 実験装置の概要

4-6-1 上向流砂濾過試験

図 11 の中の大濾過筒を使って上向流砂濾過試験を実施した。濾過速度は 1.0m/日、砂層は 80cm、原水は As(III)濃度 1.0mg/L、Fe(II)濃度は実験開始時から 565 時間後までが 10mg/L、565 時間後から 1290 時間後（運転終了時）までが 40mg/L であった。なお 565 時間後に凝集沈殿槽内にエアポンプを設置した。大濾過筒の所定の濾層深さにとりつけられたコックより水試料を採取し、分析することで溶存態ヒ素と粒子状ヒ素の装置内濃度推移を明らかにした。

図 12 で示したように砂層深さ 20cm における粒子状ヒ素すなわちフロックの漏出は、実験開始当初と開始 500 時間後付近の 2 度にわたり確認された。このことより、仮説②（フロック漏出）は尤もらしいことがわかった。また 2 度目の漏出中に鉄濃度を 40mg/L にしたところ、徐々に漏出が沈静化した。これは水中の鉄の量が増加したことにより生成したフロックが肥大し濾材に捕捉されやすくなったためだと考えられる。

一方溶存態ヒ素については実験開始時から開始 200 時間後付近にかけて徐々に濃度が上昇している。これは開始当初は濾材に吸着されたが、吸着最大許容量に達した後はそのまま流出したためだと考えられる。しかし鉄濃度が 40mg/L になった後は、徐々に流出が沈静化した。これは先に述べたように、水中の鉄の量が増加したことにより溶存態ヒ素の吸着量が増加したためだと考えられる。

なお外観ではフロックは支持材充填部で優先的に捕捉されている様子が観察できた。

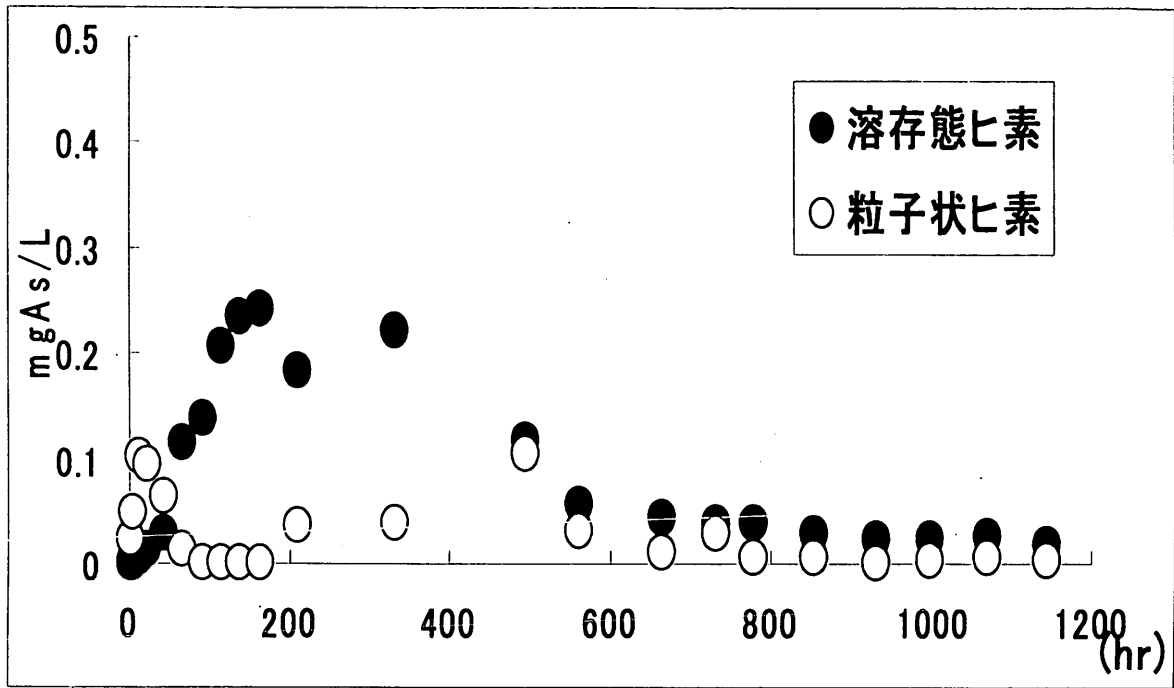


図 12 上向流砂濾過試験における砂層深さ 20cm からの流出水の形態別ヒ素濃度推移

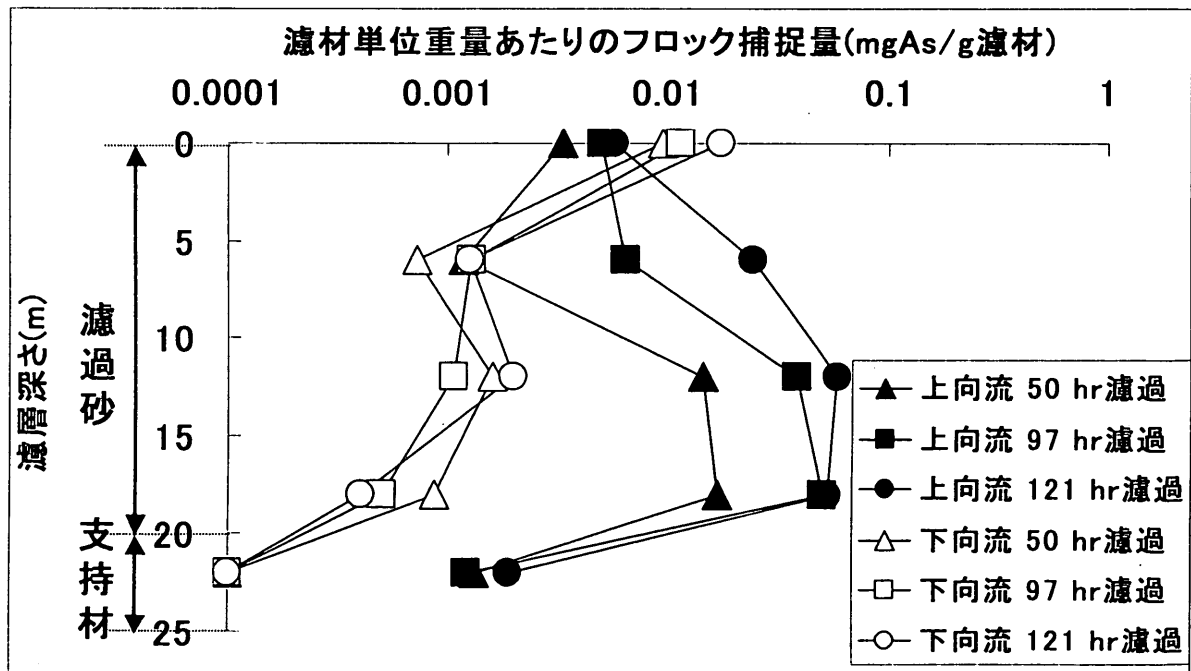


図 13 上向流砂濾過+下向流砂濾過試験における両濾過筒内の所定の深さの濾材単位重量あたりフロック捕捉量の経時変化

4-6-2 上向流砂濾過+下向流砂濾過試験

上向流砂濾過後の下向流砂濾過の効果を解明するため、図 11 の中の小濾過筒を使って上向流砂濾過と下向流砂濾過をつないだ試験を実施した。濾過速度は 10m/日、砂層は 20cm、原水は As (Ⅲ) 濃度 1.0mg/L、Fe(Ⅱ)濃度 10mg/L、ケイ素濃度 20mg/L であった。装置は運転開始 121 時間後に停止した。

所定の時間に原水・上向流濾過後の水・下向流濾過後の水を採取し、それぞれに含まれるヒ素化合物の装置内推移を粒径範囲別に解析した結果、図 11 で示したように上向流濾過では粒径 0.10 μm 以上のフロックが捕捉された。一方、下向流濾過では粒径 1.0 μm 以上のフロックは捕捉されたが 1.0 μm 未満のフロックは素通りしている挙動を示した。

また両濾過筒から濾材を直接採取し分析することで所定の濾層深さにおける濾材単位重量あたりフロック捕捉量の経時変化をみた結果、図 13 で示したように上向流濾過では深層濾過、下向流濾過では表層濾過の様相を呈していることが明らかになった。

なお下向流濾過筒は上向流濾過筒よりも早く閉塞した（運転開始 121 時間後）。

5. 本研究で得られた成果：装置構造とメンテナンスに関する改善案の提起

本研究で得られた知見に基づいた既存の AIRP・IARP の改善案を以下に示す。

①凝集沈殿槽に仕切り板を設置する（図 14 参照のこと）

粒径の大きなフロックが濾過槽へ流入するのを妨げることにより、濾過槽内の濾材の閉塞を遅らせることが出来ると考えられる。仕切り板を設置した場合、固液分離が促進され凝集沈殿槽下部には多量のフロックが蓄積するため、これまで以上に頻繁に洗浄する必要があると考えられる。

②スラッジは収集し埋め立てるか少量ずつ河川に廃棄する

装置洗浄後に排出されるスラッジの処理は現在確立されていないが、田畑や民家から離れた所にスラッジの収集場をもうけ（図 15 参照のこと）、収集されたスラッジはその後埋め立てるか少量ずつ河川に捨てることが望ましいと考えられる。

③メンテナンスのサイクルを確立する

装置利用開始時におこるフロックの漏出はしかたのないものとし、その後におこる濾材の破過によるフロック漏出は未然に防止することを目的とすると、濾過槽からスラッジを引き抜いた直後は装置の利用を避け、洗浄直後のフロック漏出が沈静化した後に給水槽を洗浄することで、濾過槽からのフロック漏出がなくかつ給水槽にフロックが蓄積していない状態で装置の利用を再開することができる。

④上向流砂濾過槽の後に下向流砂濾過槽は不要

上向流砂濾過後の下向流砂濾過の設置効果は疑問視されることから、上向流砂濾過槽を適切にメンテナンスすることを優先したほうがよいと考えられる。

⑤tubewell 水のヒ素濃度が高い地域へ適用する場合の措置

tubewell 水のヒ素濃度が高い地域に AIRP・IARP を適用した場合、仮説①によると、処理水に溶存態ヒ素が残存することが推測される。この問題を解決するための措置として以下の 2 案のうち、いずれかを実践する必要があると考える。

1. 凝集沈殿槽に鉄を添加し、粒子状ヒ素として濾過槽で捕捉
2. 上向流砂濾過後に吸着剤（セリウム吸着剤）を利用して溶存態ヒ素を吸着除去

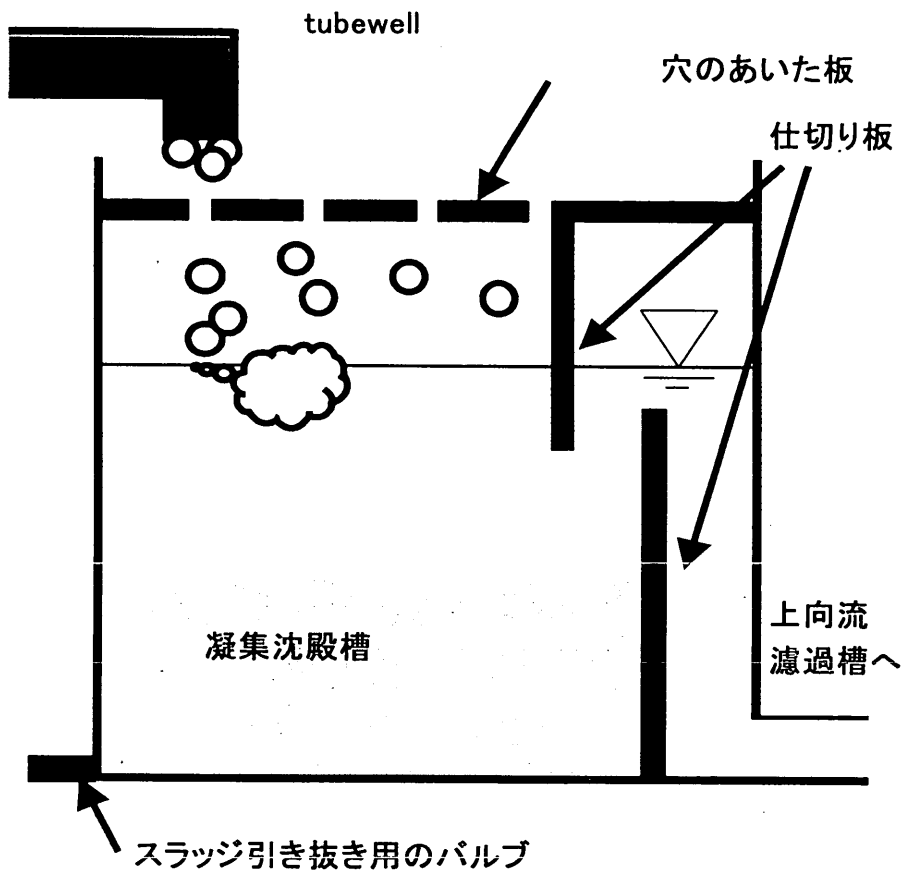


図 14 凝集沈殿槽に仕切り板を設置した例



図 15 窪地に収集されたスラッジ
(AIRP1, 2001 年 3 月)

6. 引用文献

- 1) Xiaoguang Meng, George P. Korfiatis, Christos Christodoulatos, Sunbaek Bang(2001) : Treatment of arsenic in Bangladesh well water using a household co-precipitation and filtration system, Elsevier Science Ltd 35(12) 2805-2810
- 2) R. T. Nickson, J. M. McArthur, P. Ravenscroft, W. G. Burgess, K. M. Ahmed(2000) : Mechanism of Arsenic Release to Groundwater, Bangladesh and West Bengal, Applied Geochemistry 15(2000) 403-413

7. 国際共同研究等の状況

バングラデシュ工科大学 (BUET) の M. H. Rahman 氏と M. M. Rahman 氏をカウンターパートとし、東洋大学北脇秀敏教授をアドバイザーとしてヒ素除去施設評価の現地調査を行った。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上发表 (学術誌・書籍)

<学術誌 (査読あり)>

- ① D. Shimazaki, J. Oh, R. Honda, M. Sugimura and K. Yamamoto (2002) ¥, Appropriate mitigation technologies for arsenic groundwater pollution in Bagladesh, Environmental Sciences, 8, 5, 481-489.
- ② 杉村昌紘、島崎大、福士謙介、山本和夫、バングラデシュにおけるヒ素汚染水浄化技術の開発と評価 (土木学会論文集投稿予定)

<学術誌 (査読なし)>

なし

<書籍>

なし

<報告書類等>

なし

(2) 口頭発表

- ① D. Shimazaki, M. Sugimura, and K. Yamamoto (2002), Performance of current arsenic mitigation technologies applied to arsenic-contaminated tubewells in Bangladesh, Proceedings of Symposium on the study for the arsenic mitigation in Chapai Nawabganji, Bangladesh, March 2002, 24-31.
- ② 島崎大、杉村昌紘、山本和夫、バングラデシュにおけるヒ素汚染地下水処理技術の性能評価 (2002)、第53回全国水道協会研究発表会、平成14年5月、336-337.
- ③ 杉村昌紘、島崎大、福士謙介、山本和夫、バングラデッシュにおける AIRP ・ IARP のヒ素汚

染地下水の浄化への適用、土木学会年次講演会、2002

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞

なし

(5) 一般への公表、報道

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

本研究に基づいて多くのヒ素除去プラントが制作される計画が現地 NGO で進められており、このことに関するバングラデシュ国内の厚生行政、また、我が国の国際協力行政に解決の方針を与えた。