

## ベトナム農村水道整備の報告

藤川陽子<sup>1</sup> Phan Do Hung<sup>2</sup> 菅原正孝<sup>3</sup>、古川憲治<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>京大 <sup>2</sup>ベトナム環境技術研 <sup>3</sup>大産大 <sup>4</sup>熊本大

## 研究の経緯

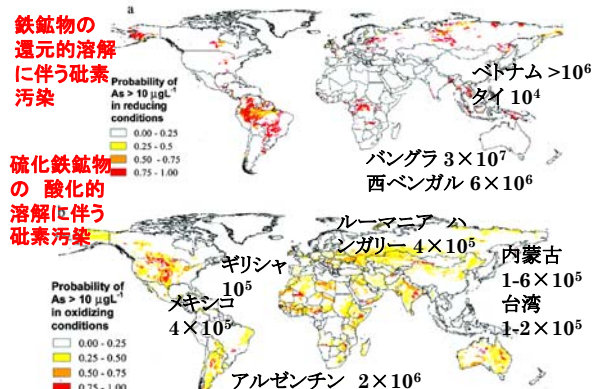
### ベトナム地下水の砒素・アンモニア汚染問題

- 地下水はベトナムで重要な水資源(全水需要の35－50%は地下水で賄われる)
- 地質由来の砒素・アンモニアによる地下水汚染が北部を中心に広範囲に存在

ベトナムHaNam県の農村で鉄バクテリア法による地下水中砒素除去の浄水施設を建設、2012年4月より供用開始

## 世界及びアジア途上国における地下水砒素汚染の現況と問題

### 地下水の砒素汚染 図中の数字は影響人口



### 地下水砒素汚染による健康被害 症状(非特異的なものも多い 因果関係の証明に難)

- 皮膚障害
- 心臓血管系障害や高血圧
- 消化器系の障害 (例. II型糖尿病)
- 神経系・免疫系の症状
- 肝臓・鼻腔・肺・皮膚の悪性腫瘍



### ベトナム農村における井水利用状況



ハノイ近郊の民家の井戸端



ハナム省 井戸水の砂ろ過

灌漑には天水を用いる  
 幼稚園や学校では地下水を砂ろ過で処理(一部の砒素は除去される)。バングラデシュやインドに比べれば被害は少ないはず。  
 問題は乾季の水供給時の水質

## ベトナムの地下水砒素汚染問題



ベトナム北部

ベトナム南部

## ベトナムの井水の砒素濃度

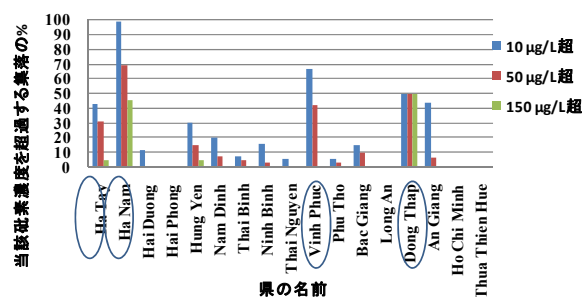


図 井戸の10%以上がある砒素濃度を超過する集落の%

ベトナム・ハノイ周辺の地下水調査  
農村地帯：雨水と井戸水を併用

| サイト                | 砒素<br>(µg/L) | 全鉄<br>(mg/L) |
|--------------------|--------------|--------------|
| 37<br>(pilot site) | 48 to 97     | 8 to 13      |

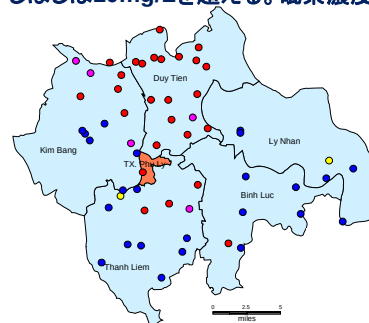


WHOの砒素水質基準：10 µg/L

| サイト     | 砒素<br>(µg/L) | 全鉄<br>(mg/L) |
|---------|--------------|--------------|
| 1       | 24           | 15.5         |
| 2 (20m) | 20           | 13.2         |
| 2 (40m) | 185          | 12.2         |
| 3       | 23           | 4.2          |
| 4       | 428          | 5.4          |
| 5       | 522          | 4.4          |
| 6 (50m) | 9            | 22.8         |
| 6 (25m) | 38           | 3.4          |
| サイト     | 砒素<br>(µg/L) | 全鉄<br>(mg/L) |
| 7       | 200          | 25           |
| 8       | 186          | 6            |
| 9       | 472          | 13           |
| 10      | 7            | 0            |
| 11      | 299          | 7            |

ベトナム ハナム省等の地下水中のアンモニア問題

しばしば10mg/Lを超える。砒素濃度も高い。表流水汚濁



アンモニア濃度 (mg/L)

|           |      |
|-----------|------|
| 10 to 150 | (26) |
| 3 to 10   | (5)  |
| 1.5 to 3  | (2)  |
| 0 to 1.5  | (24) |

ベトナム・ハナム省の農村水道の原水水質  
鉄・砒素・アンモニア等について水質基準超過

| 場所         | As<br>[µg/L] | As(3)<br>[µg/L] | Fe<br>[mg/L] | NH <sub>4</sub><br>[mg/L] | TOC<br>[mg/L] | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N<br>[mg/L] | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N<br>[mg/L] | Na<br>[mg/L] |
|------------|--------------|-----------------|--------------|---------------------------|---------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------|
| 水質基準       | 10           | 10<br>(全砒素)     | 0.5          | 3.0 *                     | 3<br>(日本)     | 11                                        | 2.3                                       | 200<br>(日本)  |
| Dong Hoa   | 35           | 58.5            | 2.3          | 29                        | 2.9           | ND                                        | 4.7                                       | 658          |
| Van Xa     | 110          | 85              | 21           | 28                        | 6.5           | ND                                        | ND                                        | 46           |
| Le Ho      | 3            | 0.0             | 25.9         | 7                         | 3.3           | 0.8                                       | ND                                        | 57           |
| Nhat Tan 2 | 156          | 87.5            | 7.4          | 24                        | 4.9           | 0.3                                       | ND                                        | 68           |
| Nhat Tan 3 | 83           | 70.8            | 7.5          | 23                        | 2.9           | ND                                        | 5.5                                       | 284          |

鉄バクテリア法砒素除去の  
研究経緯と同法の性能

## 鉄バクテリア法の原理



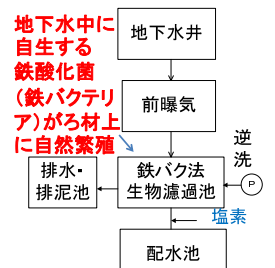
運転開始直後の生物ろ過塔



地下水中のバクテリアがろ材上に定着繁殖した状態



処理水で定期的に逆洗

鉄バクテリア法砒素除去のシステム構成  
日本国内で10年近いパイロット試験実施

生物濾過池では、 $\text{Fe}^{2+}$ の生物酸化で  
 $\text{FeOOH}$ 生成、  
 $\text{FeOOH}$ に砒素が吸着・除去

## 鉄バクテリア法の処理システム



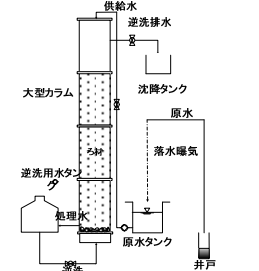
## 鉄バクテリア法砒素除去の研究経緯



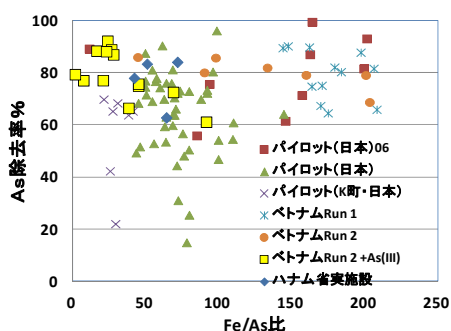
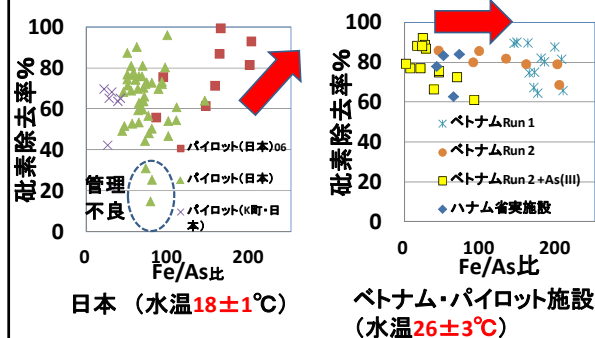
日本での鉄バクテリア法砒素除去のパイロット試験 (2004-2014-)



ベトナム・ハノイ近郊での鉄バクテリア法砒素除去のパイロット試験 (2009-2011)

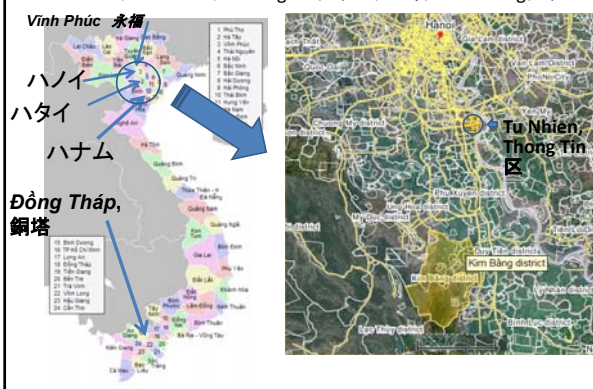
ベトナムでの鉄バクテリア法砒素除去パイロット試験  
2009年11月より ハノイThong Tin地区にて開始

- 原水: 鉄 8.8、砒素 0.059、マンガン 0.12、 $\text{NH}_4\text{-N}$  2.0 [mg/L]
- 全砒素の90%は還元形・亜砒酸 (砒素基準値 0.010mg/L)
- ろ材: レンガ (1期試験: 3-5 mm  $\Phi$ , 2期試験: 1-3 mm  $\Phi$ )
- ろ材高: <1 m
- 通水速度: 100 - 600 m/日 12時間運転ごとに逆洗

鉄バクテリア法の砒素除去率と  
原水中鉄/全砒素濃度比 (mg/Lの比率) の関係  
日本およびベトナムのデータ 一見、相関不明確？実は: 鉄バクテリア法の砒素除去率  
—原水中鉄/全砒素濃度比・水温の影響

## ベトナムでの農村水道整備の経過

農村水道調査地点、パイロット試験施設、浄水施設設置位置：  
ベトナム ハノイ Thông Tin区、ハナム省 Kim Bang区、



ハナム省の既存浄水施設



Dong Hoa



Le Ho

三井物産環境基金でベトナム・ハナム省に設置した  
鉄バクテリア生物濾過法浄水施設の概要と課題



生物濾過池（側面）

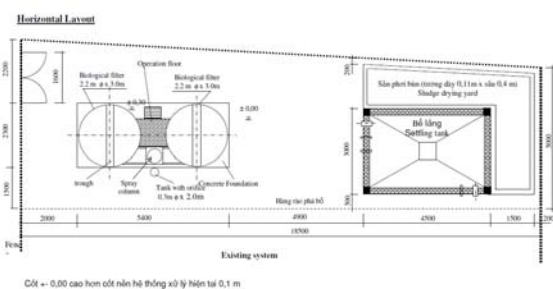


生物濾過池（上面概観）

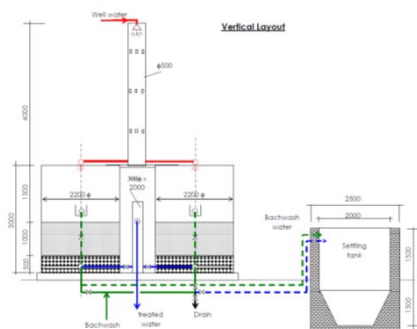
給水能力600m<sup>3</sup>/日  
1日12時間運転 300m<sup>3</sup> 給水  
自然濾過方式、LVは65-80m/日  
砒素・鉄除去は鉄バクテリア法

課題：原水中NH<sub>4</sub> 約25mg/Lの処理 &  
平均200μg/Lの原水中砒素に対する高度処理

## 2012年4月稼働の鉄バク法浄水施設 設計図

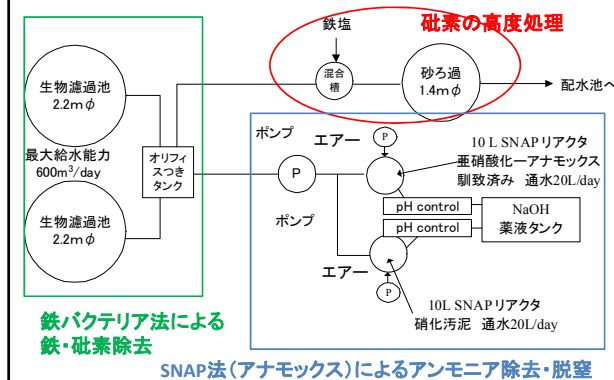


## 2012年4月稼働時の鉄バク法浄水施設 立面図





### 現在稼働中のシステム(試験機含む)



### 稼働中のシステムの処理成績

| 表-2 鉄バク法浄水施設での鉄および砒素の除去率 |             |                      |           |       |            |          |
|--------------------------|-------------|----------------------|-----------|-------|------------|----------|
| 日付                       | 試料種別        | 全砒素および5価砒素<br>[μg/L] | Fe [mg/L] | Fe/As | As 除去率 % * | Fe 除去率 % |
| 2012-5-25                | 原水          | 264                  | 11.2      | 42    | 78         | 85       |
| 2012-5-25                | 処理水         | 58                   | 1.6       |       |            |          |
| 2012-7-6                 | 原水          | 165                  | 10.6      | 64    | 63         | 92       |
| 2012-7-6                 | 処理水         | 61                   | 0.8       |       |            |          |
| 2012-8-28                | 原水          | 211                  | 10.8      | 51    | 83         | 98       |
| 2012-8-28                | 処理水         | 35                   | 0.21      |       |            |          |
| 2012-8-28                | 処理水(2週間)    | 35                   | 0.22      |       |            |          |
| 2012-11-8                | 原水(配管中の残り水) | 199                  | 13.90     |       |            |          |
| 2012-11-8                | 原水(配管中の残り水) | 3価砒素 : 56            |           |       |            |          |
| 2012-11-8                | 原水(新鮮)      | 205                  | 14.75     | 72    | 84         | 99       |
| 2012-11-8                | 原水(新鮮)      | 3価砒素 : 116           |           |       |            |          |
| 2012-11-8                | 処理水         | 32                   | 0.11      |       |            |          |
| 2012-11-8                | 処理水         | 3価砒素 : 検出限界以下        |           |       | 100% **    |          |
| 2013-5-9                 | 原水          | 209                  | 13.1      | 63    | 71         | 98       |
| 2013-5-9                 | 処理水         | 60                   | 0.3       |       |            |          |
| 2013-7-5                 | 原水          | 210                  | 14.6      | 69    | 78         | 99       |
| 2013-7-5                 | 処理水         | 47                   | 0.1       |       |            |          |
| 2014-1-6                 | 原水          | 194                  | 12.3      | 64    | 77         | 97       |
| 2014-1-6                 | 処理水         | 45                   | 0.4       |       |            |          |
| 2014-3-18                | 原水          | 145                  | 10.5      | 73    | 81         | 99       |
| 2014-3-18                | 処理水         | 27                   | 0.1       |       |            |          |

### 鉄バク法処理水中の 残余の砒素の高度処理

- 残余の砒素は主に、5価砒素(砒酸):  
砒素の形態別分析で判明
  - ナノ鉄(ベトナム産)による高度処理を検討 →  
数か月で砒素が破過、経済的に維持不可能と判断
  - 鉄バク法処理水に塩化鉄(III)を添加+直後\*に  
砂ろ過: 経費月額1万6千円(数千人への給水)
- \* 敷地余裕なく、沈殿熟成のための沈殿池は設置不能

### 砒素高度処理の試み 鉄バクテリア法処理水に 塩化鉄(III)添加 + 直後に砂ろ過

| 表 小規模パイロットによる砒素高度処理の試験結果 |         |         |          |          |
|--------------------------|---------|---------|----------|----------|
| 小規模パイロット                 | Fe mg/L | As μg/L | As 除去率 % | Fe 除去率 % |
| 鉄バク法処理水                  | 0.43    | 45      | 77       | 97       |
| 高度処理 LV170m/day          | 0.18    | 24      | 68       | 100      |
| 高度処理 LV170m/day          | 0.15    | 24      | 69       | 100      |
| 高度処理 LV95m/day           | 0.15    | 23      | 70       | 100      |
| 高度処理 LV 95m/day          | 0.12    | 23      | 70       | 100      |

### 実施設で砒素高度処理試験 砒素除去率には、まだ課題残す

| 表 本設備の砒素高度処理の結果 |         |         |          |          |
|-----------------|---------|---------|----------|----------|
| 本設備             | Fe mg/L | As μg/L | As 除去率 % | Fe 除去率 % |
| 鉄バク法処理水         | 0.6     | 17      |          |          |
| 高度処理            | 0.0     | 17      | 3        | 99       |
| 鉄バク法処理水         | 0.2     | 28      |          |          |
| 高度処理            | 0.0     | 15      | 45       | 76       |
| 鉄バク法処理水         | 0.1     | 27      |          |          |
| 高度処理 (鉄過剰)      | 5.9     | 15      | 44       | -6976    |
| 高度処理            | 0.5     | 12      | 55       | -450     |

### 地下水中アンモニア対策

### 浄水処理における高濃度アンモニア (数十 mg/L の $\text{NH}_4$ )の問題

- 有機物添加＋硝化脱窒は実現困難。処理水に有機物残存→病原性微生物増殖の可能性あり。
- 独立栄養細菌による脱窒として、一槽型アナモックス法の一つであるSNAP法(Single stage Nitrogen removal using Anammox and Partial nitrification)処理検討。
- HaNam省の現場で40%程度の脱窒に成功。

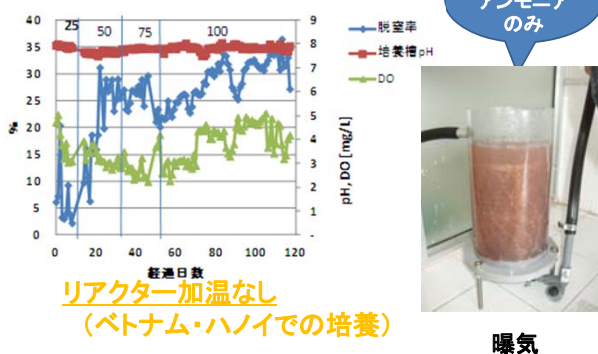
### SNAPリアクタ (熊本大)

- 担体上にアンモニア酸化細菌(AOB)とアモックス菌を馴致。
- 担体の外表面にAOB、深部にアナモックス菌が繁殖
- 温度・pH・DOの管理で亜硝酸酸化細菌(NO<sub>2</sub>)を抑制することで性能を維持。
- 大気開放状態で運用。

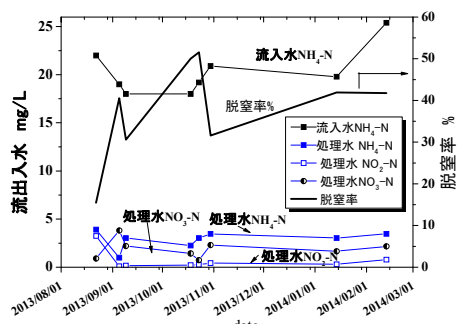
### 地下水中アンモニア対策

SNAP法(一槽式)アナモックス種汚泥

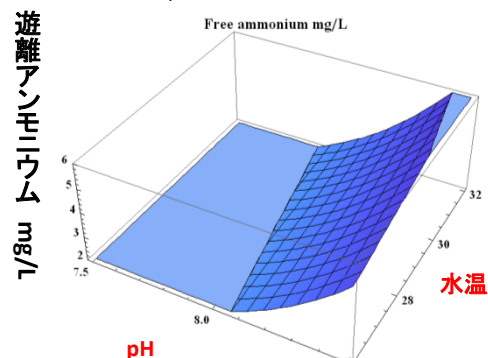
窒素源:  
アンモニアのみ



### ベトナムの地下水処理の SNAPリアクターの成績



SNAP法リアクターでの亜硝酸化維持(硝酸化抑制)のために  
遊離アンモニウム>2mg/L  
pH、温度条件調整・高い温度が有利



## 鉄バクテリア法浄水処理の 費用効果

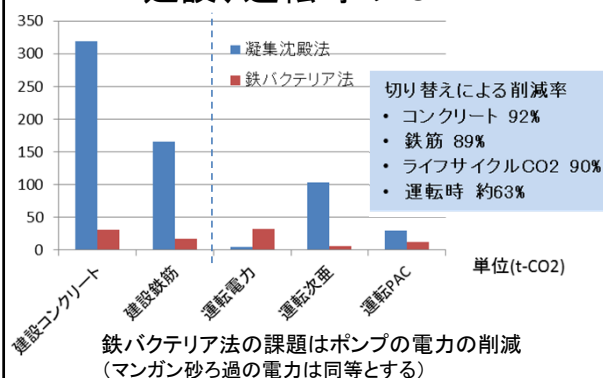
### LCAから見た鉄バク法の評価

#### 凝集沈殿法との比較

鉄・砒素・マンガン・アンモニアを含む地下水を原水とする日本の既存浄水施設の**前塩素注入**、**酸化池**、**高速沈殿池**及び**接合井**、**マンガン砂ろ過池**を鉄バク法の**生物ろ過池**に置き換えた場合。

|                     | 塩素注入(不連) | PAC           | マンガン                    |
|---------------------|----------|---------------|-------------------------|
|                     | 凝集沈殿法    | 鉄バクテリア法       |                         |
| 電力 <sup>*1</sup>    | 4,000    | 31,000~34,000 |                         |
| 次亜(1) <sup>*2</sup> | 69,000   | 0             |                         |
| 次亜(2) <sup>*2</sup> | 34,000   | 6,000         |                         |
| PAC <sup>*3</sup>   | 30,000   | 12,000        |                         |
| 計                   | 137,000  | 51,000        |                         |
| 廃棄段階については未検討        |          |               | CO <sub>2</sub> 排出量とした。 |

### 建設、運転時のLCA



### ベトナムの浄水場建設コストに基づいた救命 の費用効果比

ベトナムで給水人口3500人、用水70~100L/人・日、**施設建設費500万円**→約1,429円/人

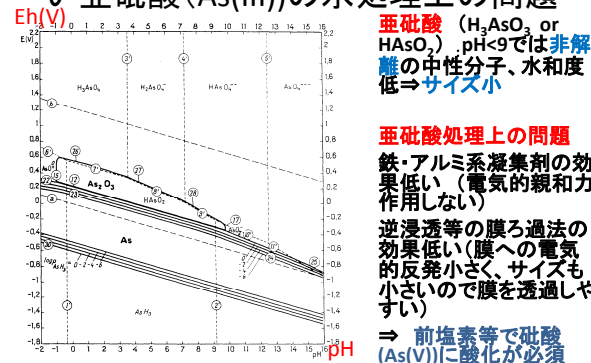
| 健康状況           | 損失余命<br>LLE(年) | 救命1年あたりの費用(円/人・年) |
|----------------|----------------|-------------------|
| 重度の障害: 日常生活が不可 | 14.3           | 100               |
| 軽度の障害: 日常生活が困難 | 6.24           | 229               |
| 慢性的病態: 複数の慢性疾患 | 3.27           | 437               |
| 慢性的病態: 一つの慢性疾患 | 2.01           | 711               |
| 自覚症状: 痙攣や疲労など  | 1.05           | 1361              |

米国での各種の救命措置の救命1年あたりの費用(42,000\$)

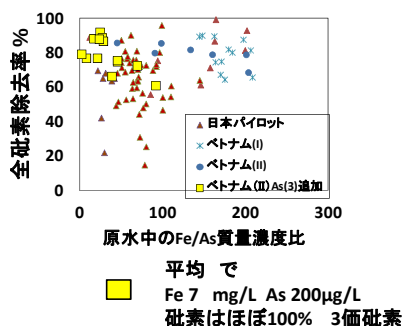
計算式 鉄バクテリア法建設費用/(砒素中毒による損失余命×患者数)

### 鉄バクテリア法での 3価砒素除去機構の検討

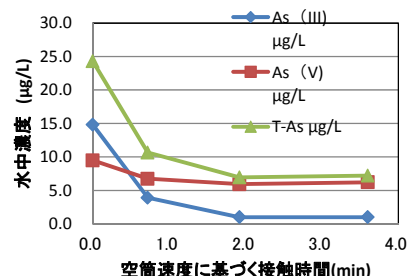
### アジア砒素汚染地域の地下水中に多い亜砒酸(As(III))の水処理上の問題



### 亜砷酸(3価砷素)が砷酸(5価砷素)より多い水での鉄バクテリア法の性能



### 鉄バクテリア法の生物濾過塔内での砷素のプロファイル 処理終了時には砷酸のほうが亜砷酸より多い



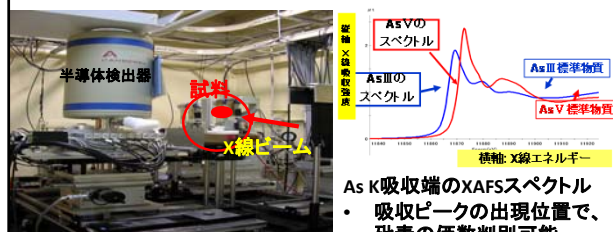
### 鉄バクテリア法による3価砷素除去のメカニズム解明

鉄バク法の特徴:  
3価砷素を含む地下水を  
砷素の前酸化過程なしに浄化  
**鉄バク法の3価砷素浄化機構の解明**

連続通水条件下でのX線吸収分光法(XAFS)で観測  
実際の水処理装置と同程度の線速度で、  
原水をろ材に連続的に通水  
ろ材上の生物起源の鉄酸化物に吸着蓄積される  
**砷素の価数**を観測

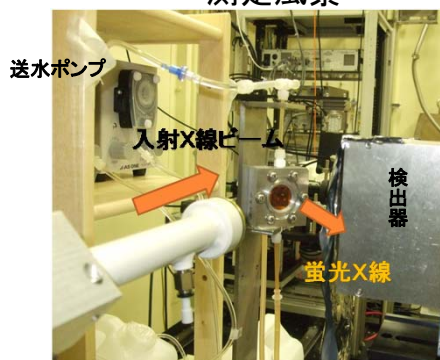
### X線吸収分光法: X線吸収微細構造 X-ray absorption fine structure (XAFS)

固体および液体試料中のppmオーダー濃度の  
**砷素の価数と結合形態を非破壊的(in-situ)に観測。**

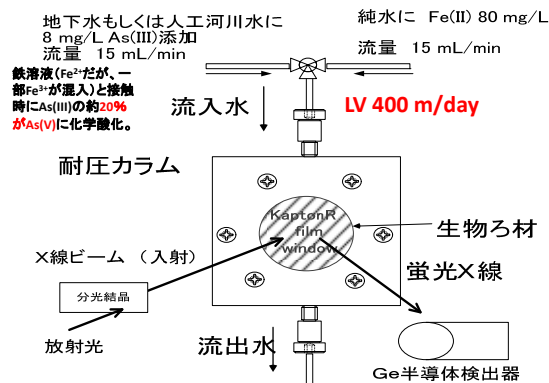


蛍光法でのXAFS測定

### 測定風景

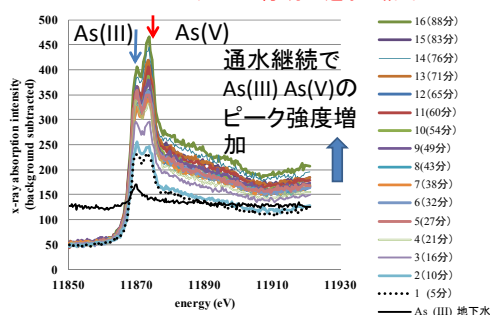


### 濾材(鉄バク法馴致済み)へのAs(III)・Fe(II)含有水 連続通水条件下でのX線吸収分光測定の方法

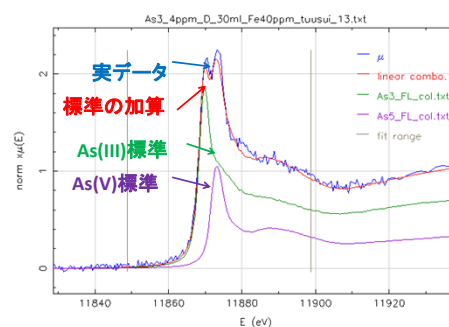




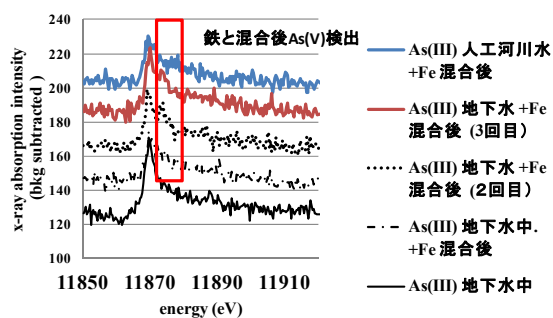
As K 吸収端でのXAFS測定結果 (鉄バク法で馴致済みのろ材K)にLV  
400m/dayで鉄40ppmとAs(III) 4ppmを含む地下水を通水)  
一つのスペクトルは約6分の通水に相当



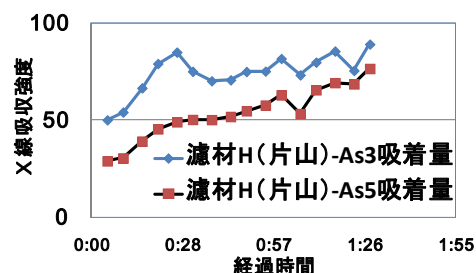
線形足し合わせによる実試料中砒素の価数構成推定



鉄溶液 ( $\text{Fe}^{2+}$ だが、一部 $\text{Fe}^{3+}$ が混入)と接触時に  
As(III)の約20%がAs(V)に化学酸化。

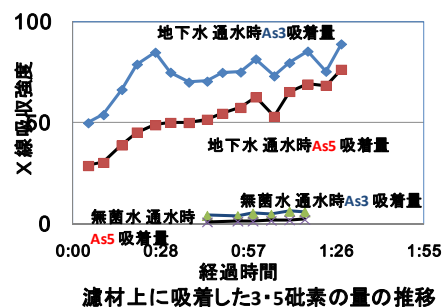


鉄バクテリアを含む水に2価鉄と3価砒素を加えて  
生物ろ材に通水 (As(3) 4ppm, Fe(2) 40ppm)  
ろ材K上のAs(3)およびAs(5)蓄積状況  
3価砒素が3価のままろ材上に蓄積  
鉄(3)により酸化されて生成した5価砒素のろ材上の蓄積



濾材上に吸着した3・5砒素の量の推移

地下水と無菌水 (As(III) 4ppm, Fe(II) 40ppm)通水時ろ材  
上のAs(III)およびAs(V)蓄積状況 地下水>>無菌水



鉄バクテリア法3価砒素除去機構の  
X線吸収分光測定による検討: 結論  
鉄バクテリア法では、3価砒素除去は、一義的に3価砒素  
の吸着によって起こることを連続通水条件下でのX  
線吸収分光測定で確認。

鉄バクを含む地下水通水は重要【無菌水ではろ材性能  
低下】

鉄バク存在下で3価砒素から5価砒素が生成することは  
別途確認済み。ただし、酸化速度は遅い。1日所要

我々の条件では通水速度が高いため、砒素の酸化が  
間に合わない可能性