

国際協力事業団

財務省経済関係局

地方政府農村開発協同組合省公衆衛生局

バングラデシュ人民共和国政府

バングラデシュ国砒素汚染地域地下水開発計画調査 最終報告書

要約

2002年12月

**国際航業株式会社
三井金属資源開発株式会社**

序 文

日本国政府は、バングラデシュ人民共和国の要請に基づき、同国の砒素汚染地域地下水開発計画調査にかかる開発調査を実施することを決定し、国際協力事業団がこの調査を実施いたしました。

当事業団は、平成 12 年 5 月から平成 14 年 11 月までの間、4 回にわたり国際航業株式会社の鎌田烈氏を団長とし、同社並びに三井金属資源開発株式会社から構成される調査団を現地に派遣いたしました。

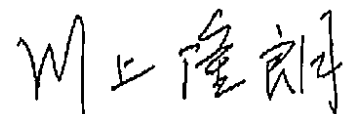
また、平成 12 年 5 月から平成 14 年 11 月の間、国際協力事業団 国際協力専門員の牛木久雄氏を委員長とする作業監理委員会を設置し、本件調査に関し、専門的かつ技術的な見地から検討・審議が行われました。

調査団はバングラデシュ人民共和国政府及び同国地方政府農村開発共同組合省公衆衛生局関係者と協議を行うとともに、計画対象地域における現地調査を実施し、帰国後の国内作業を経て、ここに本報告書完成の運びとなりました。

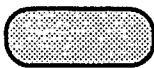
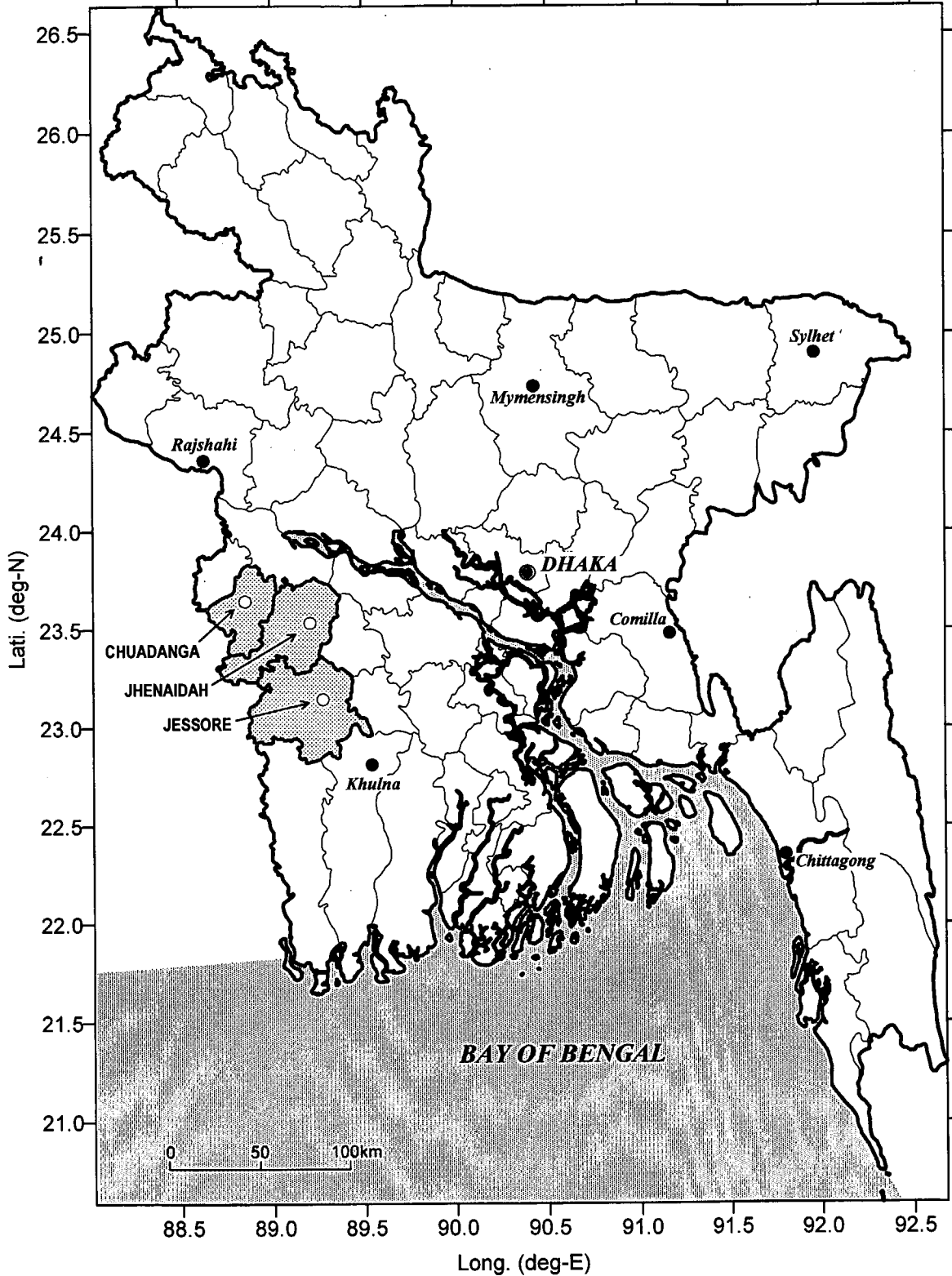
この報告書が、本計画の推進に寄与するとともに、両国の友好・親善の一層の発展に役立つことを願うものです。

終わりに、本調査にご協力とご支援をいただいた関係各位に対しまして、心より感謝申し上げます。

平成 14 年 12 月



国際協力事業団
総裁 川上 隆朗



STUDY AREA

調査位置図

THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

通貨換算率

(March 1, 2002)

US\$ 1.00 = 55.26 Taka = 134.45 Yen

1 Taka = 2.433 Yen = US\$ 0.01810

1 Yen = US\$ 0.007438 = 0.4110 Taka

略号

AAN	Asia Arsenic Network
AAS	Atomic Absorption Spectrophotometer
ADP	Annual Development Program
ARD	Arsenic Removal Device
BADC	Bangladesh Agricultural Development Corporation
BAMWSP	Bangladesh Arsenic Mitigation Water Supply Project
BBS	Bangladesh Bureau of Statistics
BGS	British Geological Survey
BMD	Bangladesh Meteorological Department
BWDB	Bangladesh Water Development Board
DANIDA	Danish International Development Assistance
DCH	Dhaka Community Hospital
DFID	Department for International Development (UK)
DOEH	Department of Occupational & Environmental Health
DPHE	Department of Public Health Engineering
DTW	Depth To Groundwater Level from the ground surface
DWL	Dynamic Water Level
EC	Electric Conductivity
EIRR	Equity Internal Rate of Return
FIRR	Financial Internal Rate of Return
FK	Field Kit
FY	Fiscal Year
GHCN	Global Historical Climatology Network
GIS	Geographic Information System
GSB	Geological Survey of Bangladesh
GW	Groundwater
GWL	Groundwater Level

IRP	Iron Removal Plant
JICA	Japan International Cooperation Agency
LGED	Local Government Engineering Department
LLDC	Least-Less Developed Countries
MLD	Million Liters per Day
MLGRD&C	Ministry of Local Government, Rural Development & Cooperatives
masl	meter above sea level
MCM	Million Cubic Meter
MoF	Ministry of Finance
MoHFW	Ministry of Health & Family Welfare
mS/m	1 mS/m = 10 microS/cm
M/M	Minutes of Meeting
NGO	Non-governmental organizations
NIPSOM	National Institute of Preventive and Social Medicine
NPV	Net Present Value
OHT	Over Head Tank
OJT	On the Job Training
OM	Operation and Maintenance
ORP	Oxidation-Reduction Potential
PETP	Potential Evapotranspiration
PSF	Pond Sand Filter
RGAG	Research Group for Applied Geology
RWH	Rain Water Harvesting
PWSS	Pourashava Water Supply System
SOB	Survey of Bangladesh
SWL	Static Water Level
S/W	Scope of Work
TRT	Trainer's Training
UNDP	United Nations Development Program
UNICEF	United Nations Children's Fund
USGS	United States Geological Survey
WASA	Water and Sewerage Authority
WHO	World Health Organization
WTP	Willingness To Pay

バングラデシュ国砒素汚染地域地下水開発計画調査

最終報告書

要 約

要旨

この調査結果概要は、バングラデシュ国砒素汚染地域地下水開発計画調査の最終報告書に記述されている 2000 年 5 月から 2002 年 11 月までの期間に実施された調査結果すべての概要をとりまとめたものである。

調査の背景

バングラデシュ国(以下「バ」国)では衛生的に安全な飲料水を確保するため 1970 年代から井戸の掘削が積極的に進められ、現在、国民の約 95%が飲料水を地下水に依存している。飲料水の地下水への依存が高まるにつれ、伝染病による死亡率は大きく低下したが 1990 年代になって砒素による地下水汚染問題が発生した。

医療機関や国際機関等による調査の結果、1999 年末までには、「バ」国全体の 64 県のうち、山地や丘陵部を除く 59 県で地下水の砒素汚染が確認された。現在までに確認された砒素中毒患者は 7,000 人以上、砒素中毒にかかるリスクのある人口は、最低 2,000 万人、最大 7,000 万人以上と見積もられている。

こうした非常事態に対し、「バ」国政府は国家砒素対策委員会を設置した。また、国際機関、ドナー国、NGO、研究機関などが砒素問題に取り組み始めた。1998 年からは、世銀の援助による 15 年計画のバングラデシュ砒素緩和供水供給プロジェクト (BAMWSP) が開始されている。しかしながら、現時点では砒素汚染の実態やメカニズムが十分に解明されておらず、具体的な対策の確立が急務となっている。

第1章 序論

本調査の目的は、「バ」国西部の砒素汚染地域において、深層地下水開発計画に係るマスタープランを策定すること、優先プロジェクトについてのプレ・フェージビリティ調査を実施すること、および調査の実施を通じてカウンターパートに対して技術移転を行うこと、の3点である。調査地域は、ジェソール、ジェナイダおよびチュアダンガの3県である。本調査の主な内容は、水文地質に重点をおいた調査、砒素除去装置や改良型深井戸等の砒素汚染対策の現地での実証試験、詳細なモデル村落での調査、マスタープランの策定、および優先プロジェクトのプレフェージビリティ調査である。

第2章 対象地域の自然環境

「バ」国および調査地域の自然環境についてレビューした。調査地域の気象条件は、「バ」国の他地域と比較して少ない降水量と高い気温、そして大きな蒸発散量で特徴付けられる。調査地域の日別の降水量や蒸発量データを収集し解析した。調査地域の地形標高は、海拔 0.5～15m である。調査地域はガンジスデルタの一部を占めており、表層地質は完新世のデルタ性堆積物により構成される。調査地域のほとんどでは、浅層部に粘土層が分布する。地下地質は、調査地域北部では主に砂層・礫層であり、南部では砂層および粘土層である。調査地域の帯水層は、既存井戸資料や本調査の試掘結果により、浅層帯水層と深層帯水層に区分される。両者を区分する難透水層は調査地域南部に明瞭に発達するが、北部では分布しない。この難透水層の層厚は、南部ほど大きくなる。調査地域の砒素汚染問題は、既存情報及び本調査の結果から、単に浅層地下水中の砒素濃度が高いだけでなく、数多くの砒素中毒患者が発生していることで特徴付けられる。

第3章 社会経済と水利用

調査地域の人口は、1991年のセンサスで約427万人である。ジェソール県の総生産量は約310億タカであり、1人当たりでは1997/98年度で11,511タカとなり、1996/97年の国レベルより僅かに多い。調査地域の主要な経済活動は農業である。一方、製造業は非常に限られている。調査地域の家庭のほとんどは、管井戸の水を主要な飲料水源または唯一の飲料水源として利用している。とくに農村部では管井戸はほとんど唯一の水源となっており、調査地域の都市部の一部ではパイプ給水を利用している。「バ」国の現5ヵ年計画では、水と衛生について改善するとともに砒素汚染地域での調査と対策を

行うように定めている。

調査地域の 260 村落で実施した質問表による現状調査の結果、村落の一般的状況や水利用状況、砒素汚染問題等の状況が詳細に明らかにされた。

第 4 章 地下水砒素汚染の現状

調査地域の既存井戸 300 箇所について、雨季（2000 年 7～8 月）と乾季（2000 年 12 月～2001 年 1 月）の砒素濃度等を調査した。260 本の DPHE が所有する浅い管井戸と 40 本のポルシャバ生産井戸を調査の対象としたが、前者を選定するにあたっては対象井戸が調査地域に均一に分布するような選定クライテリアを設定した。地下水中の砒素濃度は、DPHE ジェナイダ事務所に調査団が設置した原子吸光分析装置（AAS）を使用して分析した。

作成した砒素濃度分布図によると、0.1 mg/l よりも高い砒素濃度は雨季・乾季ともに主として調査地域の西部に分布していることが判明した。一方、調査地域の東部では砒素濃度が全般に低い。乾季の砒素濃度の分布パターンは、雨季のそれと良く似ている。しかし、チュアダンガ県北部やジェナイダ県の北西部および南西部、ジェソール県の中央部などの比較的広い地域では、乾季の砒素濃度が雨季のそれよりもわずかに上昇した。一方、ジェナイダ県西部からジェソール県西部にかけての地域では、砒素濃度は乾季に減少した。

雨季に砒素濃度が高い地域では、鉄（ Fe^{2+} ）濃度が高く酸化還元電位（Eh）値が低い傾向がみられた。乾季にはジェソール県中部～西部で Eh 値が上昇したが、乾季の Eh 値の最高値は雨季のそれよりも低かった。電気伝導度（EC）はジェソール県南部で雨季・乾季とも 150 mS/m と大きな値を示し、浅層地下水が塩水化の影響を受けていることを示している。ケシャプール郡やジェソールサダール郡など雨季に EC 値が高い地区では、乾季に EC 値がさらに上昇した。

既存井戸の中から 30 箇所を選んで地下水の一般水質を分析した。23 箇所の浅井戸の分析結果から、チュアダンガ県からジェソール県中央部にかけての地下水は $Ca-HCO_3$ タイプの水質組成を示すことが明らかになった。しかし、ジェソール県南部の浅層地下水は $Na-Cl$ タイプを示す。

第 5 章 深層帯水層の調査

1) 試掘サイト

深度 300m のコアボーリングを、チュアダンガ県、ジェナイダ県およびジェソール県においてそれぞれ 2 サイトずつで掘削した。また、深度 300m の観測用深井戸 1 本と深度 50～300m の深度別地下水観測孔 4 本を、チュアダンガ、ジェナイダおよ

びジェソールの各ポルシャバから2サイトずつ選定して掘削した。さらに、ジェソール県ケシャプール郡で、帯水層の能力と深層地下水の水質を確認する目的で観測用深井戸1本を掘削した。

2) 地下地質と帯水層区分

チュアダンガ県およびジェナイダ県では、深度300mまでの地下地質は、上位から細粒～中粒砂層を主体とするA層およびB層、中粒砂層～礫層を主体とするC層、およびシルト層を含む細粒～中粒砂層を主体とするD層およびE層に区分される。この地質区分にもとづき、帯水層は上位から第1帯水層（浅層帯水層、A層及びB層）、第2帯水層（中間帯水層、C層）、および第3帯水層（深層帯水層、D層及びE層）に区分される。このうち、前者2つの帯水層はBGS・DPHE（2001）が区分した「Shallow aquifers」に相当し、後者は「Deep Aquifer」に相当する。本調査地域中央部～北部では、浅層・中間帯水層と深層帯水層との間に厚い粘土層は存在しない。一方、調査地域南部では、堆積物の粒度は一般に細粒となり、ジェソール県南部～西部ではC層中に厚い粘土層が発達する。この粘土層の層厚は、南にいくほど増加する。この粘土層は水文地質的には難透水層の役割を果たし、浅層帯水層と深層帯水層を区分している。なお、調査地域南部ではC層の層相が粘土となるため第2帯水層（中間帯水層）は存在しない。

3) コアボーリングと物理検層の結果

チュアダンガ・ポルシャバのCH-2サイトの比抵抗検層結果によると、第2帯水層は明瞭に高い比抵抗値を示す。一方、第3帯水層（＝深層帯水層）は低い比抵抗値を示す。第2帯水層の基底面深度は、チュアダンガ・ポルシャバで約160m、ジェナイダ・ポルシャバで約190m、ジェソール・ポルシャバで約220mである。ジェソール県ケシャプール郡におけるコアボーリングおよび試掘結果によると、A層の上部は粘土層およびピート層からなる。浅層帯水層は深度50～90mに分布しており、その下位には深度90mから219mまで厚い粘土層が発達している。深層帯水層は深度220m以深に分布する。

4) 地層中および地下水中の砒素

地層中および地下水中の砒素の深度別分布状況は、調査地域の3箇所において比較・検討された。チュアダンガ・ポルシャバのCH-2サイトでは、コアサンプル中の砒素含有量は深度200mよりも浅い部分で10 ppm以下と低い。コアサンプルからの砒素溶出量も浅層部で少ない。しかし、地下水中の砒素濃度は深度44.5～53.5mにスクリーンを有する最も浅いCh-2-1観測孔において最も高く、0.12～0.23 mg/lを示す。地下水中の砒素濃度は深度とともに減少する。深度200m以上の深層部では、深度207.50～207.72mのシルト質粘土試料から、本調査で最も高い117.3 ppm

の砒素含有量が検出された。また、深度 210～250mのコアサンプルからも、20～50 ppmの砒素含有量が検出された。しかし、深層部に設置した Ch-2 観測井や Ch-2-4 観測孔から得られた地下水中の砒素濃度は 0.002 mg/l 以下と極めて低い。

これまでの「バ」国における調査では、砒素原因層は主に深度 100mより浅い部分に存在するとされていた。しかし、本調査により、砒素原因層は浅い部分だけではなく、深度 100～300mの中間部～深層部にも存在することが確認された。

5) 深層地下水中の砒素濃度

地下水中の砒素濃度は、本調査により設置された観測井・観測孔により 6 ヶ月間以上モニタリングされた。ほとんどの地域において、深層帯水層中の地下水は砒素により汚染されていないことが確認された。合計 15 本の観測井・観測孔のうち、ジェナイダ県クリシュナ・チャンドラプール村に設置された Jh-CB-2 孔から得られた地下水だけが、「バ」国基準値(= 0.05 mg/l)以上の砒素により汚染されていた。この観測孔で「バ」国基準値以上を超えた回数は、8 回のモニタリング中 5 回である。

6) 深層地下水の水質

重金属を含む合計 27 項目の一般水質が「バ」国内の分析室において測定された。一般水質項目分析用の地下水サンプルは、モデル村落を除いて、新設したすべての観測井および観測孔から揚水試験中に採取された。また、ポルシャバに設置した観測用深井戸およびモデル村落に設置した観測孔においては、月別の地下水水質モニタリングが実施された。

深層地下水の水質組成は、中間帯水層と深層帯水層との間に厚い粘土層が分布しない地域においても、浅層部とは異なっている。深度 150m以浅の浅層地下水の水質組成はほぼ同じである。深層地下水の水質組成は、ポルシャバの掘削サイトにおいても浅層地下水のそれとは異なる。

深度 200m以上の深層地下水の飲用に対する安全性について、水質分析結果を「バ」国飲料水基準値および WHO 飲料水水質ガイドライン値と比較して検討した。両者の基準値/ガイドライン値とも全く超過しなかった項目は、カドミウム、全クロム、銅、シアン、水銀、亜鉛、フッ素、ナトリウム、塩素、硫酸、硝酸、そして蒸発残留物総量 (TDS) である。鉛はジェナイダ・ポルシャバの 3 試料が WHO ガイドライン値 (= 0.01 mg/l) を超えたが、「バ」国基準値 (= 0.05 mg/l) を超えなかった。これらのサンプルは揚水試験中に採取されたものである。ニッケルについては、Js-CB2 から得られた 1 試料が WHO ガイドライン値 (= 0.02 mg/l) を上まわった。しかし、得られた値 (= 0.037 mg/l) は「バ」国基準値の 0.1 mg/l よりは低い。健康への障害という観点からみると、調査地域の深層地下水を飲用するにあつ

て最も問題となるのがマンガンである。マンガンの WHO 健康ガイドライン値は 0.5 mg/l であり、利用者から色や臭い等で苦情がでるレベルは 0.1 mg/l とされている。一方、「バ」国の飲料水基準ではマンガンの基準値は 0.1 mg/l とされている。深層観測井および深層観測孔から得られた合計 87 試料のうち、0.1 mg/l を超えたものは 50 試料、0.5 mg/l を超えたものは 15 試料である。設置した合計 15 本の深層地下水観測井および観測孔のなかで、マンガン濃度がほぼ連続して 0.5 mg/l を超過しているのは、ジェソール・ポルシャバに設置した Js-1 および Js-2 観測井と Js-1-4 観測孔である。これらの井戸の深層地下水を飲用する場合には、マンガン処理を行う必要がある。

7) TEM 探査と水文地質構造

過渡現象電磁探査法 (TEM 法) およびシュランベルジャー法による物理探査を調査地域で実施した。このうち、TEM 法による電磁探査は 200 地点で実施した。TEM 法では、深度 400m までの区間の比抵抗層構造を明瞭にとらえることができた。第 2 帯水層 (= 中間帯水層) に対比される高比抵抗層は、調査地域の大部分の地区で深度 100 ~ 200m の深度で追跡することができた。しかし、調査地域南部では C 層中に厚い粘土層が発達するため、この高比抵抗層は検出されなかった。深度 200 m 以上の深層部では比抵抗値は全般に低いが、チュアダンガ県やジェソール県南部では、深度 250 ~ 300m に高比抵抗層の存在が確認された。

第 6 章 モデル村落の調査

調査地域の砒素汚染対策マスタープランを策定するための具体的資料を得るために、本調査で計画した調査活動が実施可能なモデル村落 3 箇所を注意深く選定した。モデル村落は各県から 1 つずつ選定した。選定されたモデル村落は、チュアダンガ県のボロドゥウパティラ村、ジェナイダ県のクリシュナ・チャンドラプール村、およびジェソール県のラジュナガール・バンカバルシ村である。

モデル村落内すべての既存井戸の水質と選定された池の水質を測定した。2000 年 10 月に実施した既存井戸の地下水中砒素濃度の分析結果から、既存井戸の砒素汚染の程度は村ごとに異なることが明らかになった。ボロドゥウパティラ村では、全体の 2/3 の井戸が砒素により汚染されていた。クリシュナ・チャンドラプール村では 3/4 が汚染されていた。ラジュナガール・バンカバルシ村では、DPHE が設置した深井戸 1 本を除くすべての浅井戸が汚染されていた。2000 年 12 月には再度砒素濃度を測定したが、砒素濃度の分布パターンは 2000 年 10 月の結果と似ていた。それぞれの村落で、砒素濃度のわずかな増加または減少が認められた。調査した池水のほとんどは、砒素濃度が 0.01 mg/l 以下であった。池水中の砒素濃度の最高

値 0.02 mg/l は、ラジュナガール・バンカバルシ村で検出された。

モデル村落の社会経済状況についても精力的な調査を実施した。ポロドゥウパティラ村の人口は約 2,300 人で、世帯数は 515 である。すべての世帯は浅い管井戸を飲用水源としており、村落には 175 本の個人所有の井戸がある。特定された砒素中毒患者数は 73 人で、これらの人々の大部分は村中央部にある管井戸の水を飲用していた。

クリシュナ・チャンドラプール村の人口は約 1,000 人で、世帯数は 220 である。すべての世帯は浅い管井戸を飲用水源としており、村落には 115 本の主に個人所有の井戸がある。砒素に汚染された井戸は村落内の南北に縦断する未舗装の道路の東側に位置している。特定された 45 人の砒素中毒患者の約 80% が一つの集落に住んでいる。

ラジュナガール・バンカバルシ村の人口は約 1,800 人で、世帯数は 380 である。約 70% の住民が村の縁に DPHE が設置した深井戸の水を飲料用に使用しており、残りの約 30% が浅い管井戸を使用している。この村では 23 名の砒素中毒患者が特定された。この村ではすべての浅井戸が 0.05 mg/l 以上の砒素により汚染されているが、砒素中毒リスク人口に対する砒素中毒患者数の比率は他の 2 つのモデル村落よりも小さい。

モデル村落に共通して、1 世帯あたり平均約 5 名が雨季に使用する飲用水および調理水の消費水量は約 45 リットル/日である（食器を洗うための水は除く）。乾季の消費水量は 10～15% 増加する。モデル村落ごとの世帯数は数百程度であるが、住民の間の経済格差は大きい。1 人あたりの年間の現金収入は、裕福な家庭では 11,000 タカ以上であるが、貧しい家庭では 3,000 タカ以下である。

調査団は、砒素問題に関係したコミュニティー活動を活発化させるために、コミュニティー組織の設立を村人に促した。それにより、各モデル村落ではすでに約 20 名ほどのメンバーからなる組織が設立され、砒素問題や啓蒙活動を討論するための会議が開かれている。調査団は、村の代表者や住民をサポートしている NGO のスタッフに対して、村人の砒素問題への意識を啓蒙させるためのトレーニングを実施した。戸別訪問や野外でのミーティングを行い、砒素中毒にかかったリキシャ運転手を題材にした紙芝居を作成して村人への教育活動を続けている。

第 7 章 砒素汚染対策手法の検討

調査団の現地での様々な活動にもとづき、いくつかの砒素汚染対策手法が提案され検討された。都市給水施設については、既存給水施設の問題点を指摘し、ポルシャバ給水システムの改善計画を提案した。

脱砒素装置については、2段バケツ方式、曝気・濾過方式、活性アルミナ吸着方式、ベーズン型太陽熱蒸留方式、および真空型太陽熱蒸留方式の5種類の装置がモデル村落に設置された。脱砒素装置のモニタリングは2001年11月まで継続されたが、その結果を踏まえて、曝気・濾過装置と雨水集水システムと組み合わせた太陽熱蒸留装置、および活性アルミナ吸着装置の3種類を推奨した。

代替水源としては、調査地域の実態を考慮して、池水ろ過装置（PSF）や雨水集水装置等について、その可能性や適用性、実現可能性について評価した。

現地の井戸掘削技術を踏まえた改良型深井戸は、3種類の遮水工法を考案して各モデル村落に設置した。施工方法や遮水方法の効果について評価を行った。改良型深井戸の水質は2002年7月までモニターした。

調査地域の地下水状況についての利用可能な情報やデータを総合して、深層帯水層を対象とした地下水開発計画を策定した。深層地下水開発の長所や短所についても評価を行った。それらを踏まえて、深層地下水を持続的に利用するための基本方針と、深層帯水層の最適な開発計画策定のために必要な準備作業を提示した。

第8章 砒素汚染メカニズムと深層帯水層の開発評価

1990年代から砒素汚染のメカニズムについて多くの研究が行われてきたが、本調査では過去10年間に公表された論文やレポート等をレビューして、砒素の起源や溶出メカニズム、移動についてこれまでの知見をとりまとめた。

本調査では、30 mg/kg以上の砒素を含有する砒素原因層が、深度10～20mの浅層部だけではなく深度200～300mの深層部にも存在することを6箇所で開催したコアボーリング調査で明らかにした。このうち、浅層部の砒素原因層が活動的であり、そこからの砒素の溶出が地下水汚染を引き起こしているものと判断した。

調査地域の地下水は、低い酸化還元電位と高い鉄濃度で特徴付けられる。したがって、還元環境下で鉄の水酸化物が溶解し、鉄や砒素が地下水中に溶出している可能性が高いと判断した。

地下水中に溶出した砒素は、地下水の流動にしたがって移動する。調査地域では、1980年代からとくに農業用の地下水揚水量が大幅に増加している。2000年の調査地域の地下水揚水量は3,016.0 MCM/yearと推定され、これは1983年の揚水量の4.5倍に相当する。このような地下水の大量揚水が地下水位の低下を起し、さらに難透水層中の砒素が溶け込んでいる間隙水の漏水や絞り出しを引き起こしたと推測される。

コンピュータを使用した二次元および三次元の地下水流動シミュレーションおよび物質輸送シミュレーション解析を行い、砒素に汚染された地下水の挙動を模擬

した。シミュレーションの結果、浅層帯水層の下部でかんがい用井戸からの大量揚水により地下水位が大きく低下することが明らかになった。この水位低下により、浅層帯水層上部の汚染地下水が水位低下ゾーンに引き込まれる。また、広域的には、浅層帯水層下部に向かって、中間帯水層や深層帯水層の地下水が流動する。しかし、ジェソール県南部では、C層中に存在する厚い粘土層が、深層帯水層からの上向きの地下水流動を遮断する。また、この難透水層の存在により、調査地域北部から南部への広域的な地下水流動が南部の深層帯水層に流入することも妨げられている。

ジェソール県南部の深層地下水は、現時点では砒素に汚染されておらず安全である。しかし、深層帯水層の比湧出量や透水量係数は浅層帯水層や中間帯水層よりも小さいので、少量の地下水揚水で地下水位が低下する可能性がある。したがって、将来深層帯水層にシフトする可能性のあるかんがい用井戸などにより、深層地下水が大量に揚水されないようにすることが、深層地下水の安全性を維持するために重要となる。

第9章 マスタープラン

「バ」国の「安全な水供給と衛生国家政策」(MLGRD&C、1998)を踏まえて、調査地域の砒素汚染対策についてのマスタープランを策定した。本マスタープランの目的は、主として深層地下水の開発によりチュアダング、ジェナイダ、ジェソールの3県の住民に砒素汚染のない安全な飲料水を供給することである。マスタープランの目標年次は2010年とした。

マスタープランは、調査地域の地下水流動を規制する水文地質構造を考慮して、戦略的な観点から策定した。調査地域は、浅層帯水層の地下水砒素汚染状況により、緊急改善地域、準緊急改善地域および監視地域に区分される。

マスタープランを実施する前に、対象地域の既存井戸すべてについてスクリーニング調査とそのマッピングが実施されるべきであり、砒素汚染地域のゾーニングを行って適切な砒素汚染対策を適用する必要がある。

本マスタープランでは、農村地域と都市地域に分けて、短期、中期、長期の計画を策定した。農村地域で必要となる施設は、ハンドポンプつき深井戸、池水の砂ろ過装置、雨水集水システムおよび脱砒素装置等である。住民への教育活動も含まれる。都市地域で必要となる施設は、砒素除去装置や既存給水システムの改修や拡張である。現在、既存の給水システムでカバーされていない都市地域では、リキシャによる水の運搬や水運搬トラックの導入、高架水槽やパイプライン、公共水栓の建設などを計画する。

調査地域の中期的な重要な対策のひとつとして、広域農村水道を提案した。広域農村水道は、調査地域北部、すなわち、C層中に厚い粘土層が発達しない地域の緊急および準緊急改善地域に適用する。広域農村水道の長所は、(1)いくつかの郡では既存のポルシャバ給水施設が活用できる、(2)水処理が必要な場合でも運営維持管理が容易にできる、(3)地下水の量と質を効果的に管理・コントロールできる点である。この広域農村水道システムは、「バ」国における深層地下水を活用した安全な飲料水供給のモデルになりうる。

第10章 優先プロジェクト

策定したマスタープランにもとづき、4つの優先プロジェクトを選定し、プレフィジビリティ調査を実施した。優先プロジェクトのコストは「バ」国の現地価格で積算した。

1) ケシャプール郡深層地下水開発

このプロジェクトは、ジェソール県南部のケシャプール郡の緊急改善地域 61 モザ（人口約 84,000 人）に安全な深層地下水を供給するプロジェクトである。給水施設はレベル 2 とし、モザごとに深井戸（深度 300m）、高架水槽、パイプラインおよび公共水栓を建設する。プロジェクトコストは 624 百万タカと見積もられる。維持管理コストは 1 人 1 ヶ月あたり 23.9 タカである。この代替案はレベル 1 給水システムであり、ハンドポンプ付の深井戸を建設する。この代替案の場合、建設コストは 278 百万タカ、維持管理コストは 1 人 1 ヶ月あたり 3.7 タカと見積もられる。

2) 3 ポルシャバ都市給水施設 (PWSS) の改善及び拡張

3つのポルシャバの既存給水施設を改善・拡張する。チュアダンガ、ジェナイダおよびモヘシュプールの PWSS では、すでにいくつかの水源井の水が砒素により汚染されている。深井戸、高架水槽、砒素除去装置、パイプラインおよび公共水栓を改修または新設する。プロジェクトコストは 388 百万タカと見積もられ、1 接続あたりの月別水道料金は、O&M 費用を確保するために 1 人 1 ヶ月あたり 200 タカと算出される

上記以外の 2 つの優先プロジェクトは、「社会的弱者層に対する砒素除去装置設置プロジェクト」および「タナ砒素対策促進センター設置プロジェクト」である。予備的な財政的および経済評価により、これら 2 つのプロジェクトも実施可能であると判断される。

第11章 ケシャプール地区補足調査

優先プロジェクト4案件の1つであるケシャプール地区の深層地下水開発プロジェクトの実施可能性を検討するために、ケシャプール郡の16モザを対象に補足調査を実施した。

16モザにはかんがい用井戸を除き合計3,037本の浅い管井戸が存在する。ほとんどの井戸水は0.2~0.5 mg/lの砒素濃度を示し、比較的汚染程度の低い地域は西部および南部に分布している。

深層帯水層の水文地質状況や砒素濃度を確認するために、ブラマカティ・モザで1本の試掘調査を実施した。深度287mで粗粒砂および礫層に到達し、それらは深度298mまで連続している。井戸仕上げを施した後、段階揚水試験、連続揚水試験および回復試験を実施した。その結果、透水量係数が2.450 m²/day、貯留係数が5.87E-01と算出された。帯水層の能力はそれほど高くないと評価されるが、生活用水の供給には十分であると判断される。水質分析用の地下水サンプルは、段階揚水試験中と連続揚水試験中に採取した。AASによる砒素濃度分析の結果、いずれのサンプルも砒素濃度は「バ」国基準値(=0.05 mg/l)よりはるかに低い値を示し、深層地下水は砒素に対して安全であることが確認された。

社会調査の結果、住民の安全な水への支払意思額(WTP)は、1世帯1ヶ月あたり30タカであることが明らかになった。また、この調査結果により、住民に砒素汚染問題についての啓蒙活動を行うことにより、住民のWTPが向上する見通しが得られた。

住居の分布や密度、住民の能力等を考慮して、2種類の給水施設を提案した。農村地域ではハンドポンプ付深井戸(レベル1給水施設)を建設することとし、ケシャプールおよびアルタポル・モザの都市地域では深井戸に高架水槽をつけた改良レベル1給水施設を建設することを提案した。この計画では、対象16モザに水供給を行うために、180本のレベル1深井戸と3本の改良レベル1深井戸が必要となる。プロジェクトコストは約95百万タカと見積もられ、O&Mコストはレベル1が適用される農村地域では1世帯1ヶ月あたり16タカ、改良レベル1が適用される都市地域では1世帯1ヶ月あたり105タカと算出された。改良レベル1給水システムを適用する場合、住民の支払意思額をさらに厳密に調査する必要がある。

第12章 結論と提言

調査地域3県では、砒素汚染地域は主に西部に分布している。浅層地下水の砒素濃度が0.1 mg/lを超える緊急改善地域の面積は670 km²であり、そこに位置する319モザには約51万人が居住している。さらに、浅層地下水の砒素濃度が0.05 mg/l以上0.1 mg/l以下の準緊急改善地域の面積は1,221 km²であり、そこに属する517モザには約89万人が居住している。

本調査で策定したマスタープランは2010年を目標年次とし、緊急改善地域および準緊急改善地域の住民に砒素に安全な水を供給し、砒素汚染からのリスクを軽減するとともに安全で衛生的な水を確保することを目的とした。また、策定した砒素汚染対策マスタープランにもとづき、4つの優先プロジェクトを選定してプレフィージビリティ調査を実施した。その調査結果により、いずれの優先プロジェクトも実施可能であると判断した。これらのプロジェクトの実施前には、詳細なフィージビリティ調査が必要となる。

本調査の結果を踏まえて、以下の項目について提言を行った。

- (1) 地下水開発と地下水管理について
- (2) 深層帯水層の調査について
- (3) 農村地域および都市地域の水供給計画について
 - 1) プロジェクトの早期実施
 - 2) 広域農村水道の建設
 - 3) ポルシャバ給水施設(PWSS)の改善
- (4) 砒素汚染問題の啓蒙普及活動について
- (5) DPHE ジェナイダ事務所に設置した砒素分析ラボのビジネスプランについて
- (6) DPHE に供与した GIS データベースシステムの活用について

序 文
位 置 図
略 語 集
要 旨

目 次

第 1 章 序論

1.1	調査の背景.....	1-1
1.2	調査の目的.....	1-2
1.3	調査の対象地域.....	1-3
1.4	調査の実施.....	1-3

第 2 章 対象地域の自然環境

2.1	気候.....	2-1
2.1.1	概況.....	2-1
2.1.2	調査地域の降水量、蒸発量.....	2-1
2.2	水分.....	2-9
2.2.1	流域パターン.....	2-9
2.2.2	河川流量.....	2-9
2.3	地勢と地質.....	2-14
2.3.1	地勢.....	2-14
2.3.2	地質.....	2-14
2.4	地下水.....	2-21

第 3 章 社会経済と水利用

3.1	社会経済の状況.....	3-1
3.1.1	人口.....	3-1
3.1.2	社会経済.....	3-2
3.1.3	国の会計.....	3-6

3.1.4	現5ヵ年計画における水と衛生	3-7
3.2	給水の現状.....	3-11
3.2.1	都市の給水.....	3-11
3.2.2	ルーラル地域の給水	3-15
3.3	対象地域の村の現状	3-17
3.3.1	村の概況	3-17
3.3.2	家庭用水	3-19
3.3.3	砒素汚染問題	3-21

第4章 地下水砒素汚染の現状

4.1	300 既存井戸の現状.....	4-1
4.1.1	300 既存井戸の選定.....	4-1
4.1.2	井戸構造	4-2
4.1.3	地下水位	4-3
4.2	300 既存井戸の砒素濃度	4-14
4.2.1	AAS による砒素分析	4-14
4.2.2	地下水水質.....	4-15
4.2.3	FK と AAS の結果の比較	4-16
4.3	一般水質	4-27
4.3.1	浅井戸からの地下水	4-27
4.3.2	生産井からの地下水	4-27

第5章 深層帯水層の調査

5.1	コアボーリング	5-1
5.1.1	目的	5-1
5.1.2	調査地点	5-1
5.1.3	調査方法	5-1
5.1.4	地下地質	5-1
5.1.5	水文地質区分	5-3
5.2	観測井掘削.....	5-15
5.2.1	目的	5-15
5.2.2	試掘サイトの選定	5-15
5.2.3	試掘配置	5-16
5.2.4	試掘結果	5-16

5.3	揚水試験	5-55
5.3.1	目的	5-55
5.3.2	方法	5-55
5.3.3	段階揚水試験結果	5-55
5.3.4	連続揚水および回復試験結果	5-55
5.4	砒素濃度	5-58
5.4.1	目的	5-58
5.4.2	方法	5-58
5.4.3	揚水試験中の砒素濃度	5-59
5.4.4	モニタリング期間中の砒素濃度	5-61
5.5	一般水質	5-103
5.5.1	バングラデシュ飲用水水質基準及び WHO ガイドライン値との比較	5-103
5.5.2	砒素と一般水質との関係	5-113
5.5.3	ハンドポンプ設置予定観測孔の水質再確認と井戸利用指導	5-113
5.5.4	一般水質項目の評価	5-115
5.6	コア分析	5-152
5.6.1	コア砒素分析結果	5-152
5.6.2	砒素分析の評価	5-155
5.7	深層帯水層の評価	5-162
5.7.1	量的評価	5-162
5.7.2	質的评价	5-163
5.8	広域地質構造	5-175
5.8.1	地質断面図	5-181
5.8.2	粘土層等層厚線図	5-182

第 6 章 モデル村落の調査

6.1	モデル村落の選定	6-1
6.1.1	調査の目的	6-1
6.1.2	モデル村落の選定	6-1
6.2	社会経済状況の概況	6-5
6.2.1	モデル村落の一般的特性	6-5
6.2.2	水汲みと消費	6-6
6.3	水質	6-7
6.3.1	地下水水質	6-7

6.3.2	池の水質	6-8
6.4	砒素中毒患者の特定	6-16
6.4.1	砒素中毒患者の診察	6-16
6.4.2	チューブウェル使用と砒素中毒患者	6-16
6.4.3	砒素中毒患者発症の特性	6-16
6.4.4	砒素中毒患者の治療	6-17
6.5	モデル村落での啓蒙活動	6-19
6.5.1	コミュニティ組織	6-19
6.5.2	砒素問題の啓蒙活動	6-19
6.5.3	砒素問題啓蒙と飲料水源の変更	6-20
6.5.4	啓蒙プログラム	6-21

第7章 砒素汚染対策手法の検討

7.1	都市給水施設の改善	7-1
7.1.1	給水施設の問題点	7-1
7.1.2	ボルシャバ給水施設の砒素対策	7-2
7.1.3	改善計画	7-2
7.1.4	組織及び管理	7-4
7.2	砒素除去装置	7-4
7.2.1	目的	7-4
7.2.2	砒素除去技術	7-4
7.2.3	砒素除去装置の設計	7-5
7.2.4	野外実験	7-8
7.2.5	評価と結論	7-15
7.3	改良型深井戸	7-17
7.3.1	改良型井戸の必要性	7-17
7.3.2	改良型井戸のタイプ	7-18
7.3.3	改良型井戸の建設工法	7-19
7.3.4	改良型深井戸の建設結果と評価	7-21
7.4	代替水源	7-22
7.4.1	代替水源の問題点	7-22
7.4.2	代替水源の概要	7-22
7.4.3	代替水源開発調査	7-24

第8章 砒素汚染メカニズムと深層帯水層の開発評価

8.1	水文地質構造と汚染メカニズム	8-1
8.1.1	砒素原因層	8-1
8.1.2	砒素原因層と水文地質構造	8-2
8.1.3	汚染メカニズム	8-2
8.2	地下水砒素汚染のシミュレーション	8-4
8.2.1	地下水シミュレーションの目的	8-4
8.2.2	方法	8-4
8.2.3	断面二次元局所モデル	8-5
8.2.4	三次元広域モデル	8-19
8.2.5	断面二次元広域モデル	8-65
8.3	深層地下水の開発可能性評価	8-96
8.3.1	現在の地下水流動条件の評価	8-96
8.3.2	将来の深層地下水開発の影響	8-97
8.3.3	深層地下水利用に必要な対策	8-97

第9章 マスタープラン

9.1	マスタープランの基本方針	9-1
9.2	砒素汚染対策地域区分	9-2
9.3	スクリーニングとマッピング	9-6
9.4	砒素汚染メカニズムと対策の方向	9-7
9.5	マスタープランのフレームワーク	9-9
9.5.1	調査	9-9
9.5.2	農村地域の対策	9-10
9.5.3	都市地域の対策	9-13
9.5.4	研究開発及びモニタリング	9-14
9.6	運営維持管理と啓蒙活動	9-17
9.6.1	運営維持管理計画	9-17
9.6.2	啓蒙活動	9-17

第10章 優先プロジェクト

10.1	ケシャプール深層地下水開発	10-1
10.1.1	プロジェクトの妥当性	10-1
10.1.2	プロジェクト概要	10-1

10.1.3	給水施設	10-2
10.1.4	プロジェクトコスト	10-2
10.1.5	プロジェクトの実施	10-3
10.1.6	運営維持管理 (OM) 方針	10-3
10.1.7	維持管理コスト	10-3
10.1.8	水料金	10-3
10.1.9	代替案	10-4
10.2	都市給水施設改善及び拡張	10-5
10.2.1	プロジェクトの妥当性	10-5
10.2.2	計画内容	10-5
10.2.3	プロジェクトの提案	10-6
10.2.4	建設コスト	10-9
10.2.5	年間維持管理費	10-9
10.3	社会的弱者層への砒素安全水供給	10-10
10.3.1	目的及び妥当性	10-10
10.3.2	プロジェクトの内容	10-10
10.3.3	受益者とコスト	10-12
10.4	タナ砒素対策促進センター	10-13
10.4.1	目的及び妥当性	10-13
10.4.2	プロジェクトの内容	10-14
10.4.3	受益者とコスト	10-14
10.5	プロジェクト評価	10-15
10.5.1	ケシャプール深層地下水開発プロジェクト	10-15
10.5.2	都市給水施設改善及び拡張	10-17
10.5.3	その他の2プロジェクトの評価	10-17
10.6	広域農村水道計画	10-18
10.6.1	計画の目的及び設計条件	10-18
10.6.2	施設計画	10-20
10.6.3	工事費概算	10-21

第11章 ケシャプール地区補足調査

11.1	スクリーニング調査	11-1
11.1.1	サイトの選定	11-1
11.1.2	調査項目と方法	11-2

11.1.3	スクリーニング結果	11-3
11.2	さく井・揚水試験	11-14
11.2.1	さく井	11-14
11.2.2	揚水試験	11-14
11.2.3	ケシャプール地区の水文地質構造	11-14
11.3	社会調査結果	11-25
11.3.1	モザの特徴	11-25
11.3.2	住民生活・世帯状況	11-25
11.3.3	新たな給水施設のサステナビリティーに関する考察	11-26
11.4	給水施設計画	11-27
11.4.1	砒素対策	11-27
11.4.2	給水方式の選定	11-28
11.5	給水施設及び建設コスト	11-30
11.5.1	給水面積	11-30
11.5.2	給水人口と消費水量	11-30
11.5.3	給水施設	11-31
11.5.4	プロジェクト・コスト	11-32
11.5.5	実施スケジュール	11-32
11.5.6	事業実施の問題点	11-34
11.6	事業実施の問題点	11-34

第12章 結論と提言

12.1	結論	12-1
12.1.1	砒素汚染の実態	12-1
12.1.2	深度毎の砒素汚染	12-1
12.1.3	水文地質単元と帯水層の能力	12-2
12.1.4	砒素汚染メカニズム	12-3
12.1.5	深層地下水の安全性	12-4
12.1.6	砒素対策手法	12-5
12.1.7	モデル村落の社会経済調査	12-7
12.1.8	砒素汚染対策マスタープラン	12-8
12.1.9	優先プロジェクト	12-9
12.1.10	ケシャプール地域補足調査	12-10
12.2	提言	12-12

12.2.1	地下水 開発管理.....	12-12
12.2.2	深層地下水の調査.....	12-12
12.2.3	農村部及び都市部の給水対策.....	12-13
12.2.4	農村部への砒素問題普及活動.....	12-14
12.2.5	砒素分析ラボラトリー.....	12-14
12.2.6	GIS の活用.....	12-14

表リスト

表 1.1	行政単位、ポルシャバおよび調査地域の面積.....	1-4
表 2.2.1	ハルディンジ橋で観測されたパドゥマ川の平均流量.....	2-10
表 3.1.1	バングラデシュの人口及び人口統計学的指標.....	3-1
表 3.1.2	調査地域 3 県の主要人口統計学的指標の比較.....	3-1
表 3.1.3	調査地域の小学校純就学率.....	3-2
表 3.1.4	成人識字率の地域別比較.....	3-3
表 3.1.5	医療機関のレベル及び医師、看護婦数の地域別比較.....	3-3
表 3.1.6	家庭トイレ現状.....	3-4
表 3.1.7	調査地域 3 県での農村部および都市部の電気普及率.....	3-6
表 3.1.8	2000 年度のバングラデシュ国家予算および配分額.....	3-6
表 3.1.9	年間開発プログラム予算.....	3-7
表 3.1.10	1990-1997 年における水供給および環境衛生の達成度.....	3-9
表 3.1.11	5 カ年計画での水供給および環境衛生セクターの開発プログラム (1997-2002)	3-10
表 3.2.1	調査地域の既存都市給水システム.....	3-13
表 3.2.2	DPHE が管理する調査地域内の既存井戸.....	3-14
表 3.2.3	村落給水のための既存砒素除去技術.....	3-16
表 3.3.1	3 県の村落人口規模.....	3-17
表 3.3.2	現在活動中の現地 NGO.....	3-19
表 3.3.3	1 世帯 1 日の料理及び飲料用の水消費量.....	3-19
表 3.3.4	1 井戸あたりの使用者.....	3-20
表 3.3.5	公共井戸を維持管理する村落組織.....	3-20
表 3.3.6	住民集会に基づいて起こされた各村の行動.....	3-23
表 4.1.1	3 県での対象井戸の配分.....	4-2
表 4.1.2	ジェソールポルシャバの生産井の井戸構造.....	4-5
表 4.1.3	ジェナイダポルシャバの生産井の井戸構造.....	4-6
表 4.1.4	チュアダンガポルシャバの生産井の井戸構造.....	4-7
表 5.1.2	地質と帯水層の対比.....	5-5
表 5.1.1	調査地域の層序及びその特徴.....	5-6
表 5.2.1	観測井／観測孔の試掘結果および仕様.....	5-17
表 5.3.1	観測井ごとの段階揚水試験結果.....	5-56
表 5.3.2	連続揚水試験及び回復試験結果.....	5-57

表 5.5.1	分析項目と分析方法.....	5-103
表 5.5.2	観測井及び観測孔の水質測定結果 (1/7)	5-119
表 5.5.2	観測井及び観測孔の水質測定結果 (2/7)	5-120
表 5.5.2	観測井及び観測孔の水質測定結果 (3/7)	5-121
表 5.5.2	観測井及び観測孔の水質測定結果 (4/7)	5-122
表 5.5.2	観測井及び観測孔の水質測定結果 (5/7)	5-123
表 5.5.2	観測井及び観測孔の水質測定結果 (6/7)	5-124
表 5.5.2	観測井及び観測孔の水質測定結果 (7/7)	5-125
表 5.5.3	コアボーリングにおける水質測定結果.....	5-126
表 5.5.4	改良深井戸における水質測定結果 (1/2)	5-127
表 5.5.4	改良深井戸における水質測定結果 (2/2)	5-128
表 5.5.5	300 既存井戸における水質測定結果 (雨季)	5-129
表 5.5.6	300 既存井戸における水質測定結果 (乾季)	5-130
表 5.5.7	ベースライン調査での水質測定結果 (既存井戸)	5-131
表 5.5.8	ベースライン調査における水質測定結果 (池)	5-132
表 5.5.9	観測井及び観測孔での水質測定結果 (ポルシャバ) の WHO ガイドライン及び バングラデシュ基準値との比較 (1/12、2/12)	5-133
表 5.5.9	観測井及び観測孔での水質測定結果 (ポルシャバ) の WHO ガイドライン及び バングラデシュ基準値との比較 (3/12、4/12)	5-134
表 5.5.9	観測井及び観測孔での水質測定結果 (ポルシャバ) の WHO ガイドライン及び バングラデシュ基準値との比較 (5/12、6/12)	5-135
表 5.5.9	観測井及び観測孔での水質測定結果 (ポルシャバ) の WHO ガイドライン及び バングラデシュ基準値との比較 (7/12、8/12)	5-136
表 5.5.9	観測井及び観測孔での水質測定結果 (ポルシャバ) の WHO ガイドライン及び バングラデシュ基準値との比較 (9/12、10/12)	5-137
表 5.5.9	観測井及び観測孔での水質測定結果 (ポルシャバ) の WHO ガイドライン及び バングラデシュ基準値との比較 (11/12、12/12)	5-138
表 5.5.10	観測井及び観測孔での水質測定結果 (モデル村落) の WHO ガイドライン及び バングラデシュ基準値との比較 (1/3、2/3)	5-139
表 5.5.10	観測井及び観測孔での水質測定結果 (モデル村落) の WHO ガイドライン及び バングラデシュ基準値との比較 (3/3)	5-140
表 5.5.11	改良型深井戸における水質のバングラデシュ基準値および WHO ガイドライ ン値との比較.....	5-141
表 5.5.12	既存井戸における水質のバングラデシュ基準値および WHO ガイドライン値	

	との比較	5-141
表 5.5.13	モデル村落の既存井戸における水質のバングラデシュ基準値および WHO ガイドライン値との比較	5-142
表 5.5.14	モデル村落の池水における水質のバングラデシュ基準値および WHO ガイドライン値との比較.....	5-142
表 5.5.15	深井戸（深度 300m）における一般水質項目基準値及びガイドライン値超過サンプルの状況（1/2）	5-143
表 5.5.15	深井戸（深度 300m）における一般水質項目基準値及びガイドライン値超過サンプルの状況（2/2）	5-144
表 5.5.16	深井戸（深度 300m）における一般水質項目基準値及びガイドライン値超過サンプルへの考え方.....	5-145
表 5.5.17	観測孔での水質測定結果（再測定）	5-146
表 6.1.1	モデル村落の特徴.....	6-2
表 6.1.2	モデル村落の社会経済状況.....	6-3
表 6.2.1	モデルルーラル村落の一般的特徴と砒素問題との関係	6-5
表 6.2.2	水汲みと消費量及び砒素問題との関係	6-6
表 6.4.1	モデル村落の男女別砒素中毒患者数	6-16
表 6.4.2	砒素中毒のリスク人口	6-17
表 7.1.1	現在の給水時間（Hour/day）	7-3
表 7.1.2	毎月平均の運営維持管理費（タカ）	7-3
表 7.2.1	砒素除去技術の 4 グループ	7-4
表 7.2.2	砒素除去装置実験計画	7-5
表 7.2.3	3 村落の原水水質	7-8
表 7.2.4	酸化用薬品による曝気・濾過テストデータ	7-11
表 7.2.5	曝気・濾過方式モニタリング結果.....	7-11
表 7.2.6	活性アルミナのテストデータ	7-12
表 7.2.7	太陽熱蒸留（ベーズン型）のテスト結果.....	7-13
表 7.2.8	真空型太陽熱蒸留装置のテストデータ	7-14
表 7.2.9	砒素除去技術の評価.....	7-16
表 7.3.1	改良型深井戸工法の比較評価	7-21
表 8.2.1	作成したシミュレーションモデルと使用したプログラム	8-5
表 8.2.2	三次元広域モデルのための水文地質条件のモデル化	8-19
表 8.2.3	地下水揚水量データの種類.....	8-21
表 8.2.4	調査地域の年別水収支の推定結果.....	8-21

表 8.2.5	将来の地下水揚水シナリオとケース.....	8-24
表 8.2.6	断面二次元広域モデルに入力した検証済みパラメータ.....	8-67
表 8.2.7	断面二次元広域モデルで使用した将来地下水揚水量のシナリオとケース.....	8-68
表 9.2.1	砒素汚染地域の区分.....	9-3
表 9.2.2	各ポルシャバの人口、給水率、水源井戸数と砒素濃度.....	9-4
表 9.2.3	砒素汚染対策地域区分.....	9-4
表 10.1.1	給水施設表.....	10-2
表 10.1.2	プロジェクトコスト.....	10-2
表 10.1.3	OM コスト Costs (モザ当たり月額).....	10-3
表 10.1.4	建設コスト.....	10-4
表 10.1.5	コスト比較.....	10-4
表 10.1.6	建設費と維持管理費.....	10-5
表 10.2.1	ポルシャバ給水施設諸元.....	10-6
表 10.2.2	給水人口予測.....	10-6
表 10.2.3	単位水需要.....	10-6
表 10.2.4	需要予測.....	10-7
表 10.2.5	3 ポルシャバの計画施設数.....	10-8
表 10.2.6	2010 年目標の場合の建設コスト.....	10-9
表 10.2.7	年間運営維持管理費.....	10-9
表 10.2.8	年次ごとの収入.....	10-9
表 10.3.1	タナ別モザ数及び人口.....	10-11
表 10.5.1	年間の施設運転費.....	10-15
表 10.5.2	計画施設の OM コストと WTP.....	10-15
表 10.5.3	施設の OM コスト.....	10-16
表 10.5.4	財務的実施可能性指標の推定.....	10-16
表 10.5.5	施設維持管理費.....	10-17
表 10.6.1	タナ別計画対象地域及び人口.....	10-18
表 10.6.2	各タナの設計配水量及びモザ受水タンク平均容量.....	10-20
表 10.6.3	各タナ毎の施設数量内訳.....	10-20
表 10.6.4	広域水道建設コスト (10 万タカ).....	10-21
表 11.1.1	ケシャプール地区 16 モザの面積と人口.....	11-1
表 11.5.1	16 モザの消費水量.....	11-31
表 11.5.2	各モザの必要施設数.....	11-32
表 11.5.3	プロジェクトコスト計算結果.....	11-32

図リスト

図 2.1.1	バングラデシュ国内の月別平均降水量.....	2-3
図 2.1.2	バングラデシュ国内の月別平均気温.....	2-4
図 2.1.3	バングラデシュ国内の月別最大蒸発散量.....	2-5
図 2.1.4	調査地域の年間平均降水量.....	2-6
図 2.1.5	調査地域の月別平均降水量.....	2-7
図 2.1.6	ジェソールの日別降水量と蒸発量 (1993-1994)	2-8
図 2.2.1	バングラデシュの水系図.....	2-11
図 2.2.2	調査地域内の河川及び湖沼.....	2-12
図 2.2.3	ハルディンジ橋で観測されたパドゥマ川の月別平均流量.....	2-13
図 2.3.1	調査地域のランドサット画像.....	2-16
図 2.3.2	調査地域の標高.....	2-17
図 2.3.3	バングラデシュの簡易地質図.....	2-18
図 2.3.4	ジェナイダ県の地質断面図.....	2-19
図 2.3.5	ジェソール県の地質断面図.....	2-20
図 2.4.1	ジェソール県シャムタ村の地質層序及び帯水層区分.....	2-22
図 3.1.1	調査地域 3 県での農村部における飲料用水源.....	3-4
図 3.1.2	調査地域 3 県での都市部における飲料用水源.....	3-4
図 3.1.3	調査地域 3 県での農村部での家庭収入源.....	3-5
図 3.1.4	調査地域 3 県での都市部での家庭収入源.....	3-5
図 4.1.1	300 本の既存井戸位置.....	4-8
図 4.1.2	県ごとの DPHE 既存浅井戸 260 本の深度.....	4-9
図 4.1.3	既存生産井から得られた比湧出量.....	4-10
図 4.1.4	雨季における 300 本既存井戸の DTW.....	4-11
図 4.1.5	乾季における 300 本既存井戸の DTW.....	4-12
図 4.1.6	300 本既存井戸の雨季と乾季における水位変化.....	4-13
図 4.2.1	雨季における各県の砒素濃度 (原子吸光により測定)	4-17
図 4.2.2	雨季における砒素濃度 (原子吸光により測定)	4-18
図 4.2.3	雨季と乾季での砒素濃度変化.....	4-19
図 4.2.4	雨季における 300 本既存井戸での鉄濃度 (Fe^{2+})	4-20
図 4.2.5	雨季における 300 本既存井戸での pH 値.....	4-21
図 4.2.6	雨季における 300 本既存井戸での Eh 値.....	4-22
図 4.2.7	雨季と乾季での Eh 値変化率.....	4-23

図 4.2.8	雨季における 300 本既存井戸での EC 値.....	4-24
図 4.2.9	雨季における 300 本既存井戸での Eh-pH-Fe ²⁺ の相関図	4-25
図 4.2.10	フィールドキットと原子吸光で測定した砒素濃度の比較 (log-log plot) ..	4-26
図 4.3.1	雨季における各県の浅層地下水の化学組成 (トリリニアダイアグラム) ..	4-28
図 4.3.2	雨季における各県の生産井の化学組成 (トリリニアダイアグラム)	4-29
図 5.1.1	コアボーリング地点.....	5-7
図 5.1.2	コアボーリング結果に基づいた地質断面図.....	5-8
図 5.1.3	ラミナ構造の見られるコアサンプルの写真及びスケッチ (ジェナイダ、JH-1、 15-16m)	5-9
図 5.1.4	生物擾乱の見られるコアサンプルの写真及びスケッチ (モヘシュプール、 JH-KC、19-20m)	5-10
図 5.1.5	貝化石を含むコアサンプルの写真及びスケッチ (チュアダンガ、CH-2、 119-120m)	5-11
図 5.1.6	生痕化石の見られるコアサンプルの写真及びスケッチ (モヘシュプール、 JH-KC、87-88m)	5-12
図 5.1.7	材化石を含むコアサンプルの写真及びスケッチ (ジェナイダ、JH-1、16-17m)	5-13
図 5.1.8	シルト質粘土ブロックを含むコアサンプルの写真及びスケッチ (ジェナイダ、 JH-1、69-70m)	5-14
図 5.2.1	観測井および観測孔の掘削計画概念図.....	5-18
図 5.2.2	チュアダンガポルシャバでの既存生産井位置および新規掘削位置図	5-19
図 5.2.3	ジェナイダポルシャバでの既存生産井位置および新規掘削位置図	5-20
図 5.2.4	ジェソールポルシャバでの既存生産井位置および新規掘削位置図	5-21
図 5.2.5	掘削現場模式図 CH-1 (ポシュハット、チュアダンガポルシャバ)	5-22
図 5.2.6	掘削現場模式図 CH-2 (ガールズカレッジ、チュアダンガポルシャバ) ..	5-23
図 5.2.7	掘削現場模式図 JH-1 (アラブプール、ジェナイダポルシャバ)	5-24
図 5.2.8	掘削現場模式図 JH-2 (ハムダ、ジェナイダポルシャバ)	5-25
図 5.2.9	掘削現場模式図 JS-1 (ゴープ、ジェソールポルシャバ)	5-26
図 5.2.10	掘削現場模式図 JS-2 (コルキー、ジェソールポルシャバ)	5-27
図 5.2.11	物理検層結果 CH-1 (ポシュハット、チュアダンガポルシャバ)	5-28
図 5.2.12	物理検層結果 CH-2 (ガールズカレッジ、チュアダンガポルシャバ)	5-29
図 5.2.13	物理検層結果 CH-BD (バラドウドパティラ、ダムルダ)	5-30
図 5.2.14	物理検層結果 JH-1 (アラブプール、ジェナイダポルシャバ)	5-31
図 5.2.15	物理検層結果 JH-2 (ハムダ、ジェナイダポルシャバ)	5-32

図 5.2.16	物理検層結果 JH-KC (クリシュナチャンドラプール、モヘシュプール)	5-33
図 5.2.17	物理検層結果 JS-1 (ゴープ、ジェソールポルシャバ)	5-34
図 5.2.18	物理検層結果 JS-2 (コルキー、ジェソールポルシャバ)	5-35
図 5.2.19	物理検層結果 JS-RB (ラジュナガール バンカバルシ、ケシャプール)	5-36
図 5.2.20	地質柱状図と物理検層結果 CH-1(ポシユハット、チュアダングポルシャバ)	5-37
図 5.2.21	地質柱状図と物理検層結果 CH-2(ガールズカレッジ、チュアダングポルシャバ)	5-38
図 5.2.22	地質柱状図と物理検層結果 CH-BD (バラドゥドパティラ、ダムルフダ)	5-39
図 5.2.23	地質柱状図と物理検層結果 JH-1 (アラブプール、ジェナイダポルシャバ)	5-40
図 5.2.24	地質柱状図と物理検層結果 JH-2 (ハムダ、ジェナイダポルシャバ)	5-41
図 5.2.25	地質柱状図と物理検層結果 JH-KC (クリシュナチャンドラプール、モヘシュプール)	5-42
図 5.2.26	地質柱状図と物理検層結果 JS-1 (ゴープ、ジェソールポルシャバ)	5-43
図 5.2.27	地質柱状図と物理検層結果 JS-2 (コルキー、ジェソールポルシャバ)	5-44
図 5.2.28	地質柱状図と物理検層結果 JS-RB (ラジュナガール バンカバルシ、ケシャプール)	5-45
図 5.2.29	観測井及び観測孔のケーシングプログラム CH-1(ポシユハット、チュアダングポルシャバ)	5-46
図 5.2.30	観測井及び観測孔のケーシングプログラム CH-2(ガールズカレッジ、チュアダングポルシャバ)	5-47
図 5.2.31	観測孔のケーシングプログラム CH-BD (ボロドゥドゥパティラ、ダムルフダ)	5-48
図 5.2.32	観測井及び観測孔のケーシングプログラム JH-1 (アラブプール、ジェナイダポルシャバ)	5-49
図 5.2.33	観測井及び観測孔のケーシングプログラム JH-2 (ハムダ、ジェナイダポルシャバ)	5-50
図 5.2.34	観測孔のケーシングプログラム JH-KC (クリシュナチャンドラプール、モヘシュプール)	5-51
図 5.2.35	観測井及び観測孔のケーシングプログラム JS-1 (ゴープ、ジェソールポルシャバ)	5-52
図 5.2.36	観測井及び観測孔のケーシングプログラム JS-2 (コルキー、ジェソールポルシャバ)	5-53

図 5.2.37	観測井及び観測孔のケーシングプログラム JS-RB (ラジュナガール バンカバルシ、ケシャプール)	5-54
図 5.4.1	段階揚水試験時の水質変化図 CH-1 (チュアダング)	5-69
図 5.4.2	段階揚水試験時の水質変化図 CH-2 (チュアダング)	5-70
図 5.4.3	段階揚水試験時の水質変化図 JH-1 (ジェナイダ)	5-71
図 5.4.4	段階揚水試験時の水質変化図 JH-2 (ジェナイダ)	5-72
図 5.4.5	段階揚水試験時の水質変化図 JS-1 (ジェソール)	5-73
図 5.4.6	段階揚水試験時の水質変化図 JS-2 (ジェソール)	5-74
図 5.4.7	連続揚水試験時の水質変化図 CH-1 (チュアダング)	5-75
図 5.4.8	連続揚水試験時の水質変化図 CH-2 (チュアダング)	5-76
図 5.4.9	連続揚水試験時の水質変化図 JH-1 (ジェナイダ)	5-77
図 5.4.10	連続揚水試験時の水質変化図 JH-2 (ジェナイダ)	5-78
図 5.4.11	連続揚水試験時の水質変化図 JS-1 (ジェソール)	5-79
図 5.4.12	連続揚水試験時の水質変化図 JS-2 (ジェソール)	5-80
図 5.4.13	月別モニタリング結果 CH-2 (ポシュハット、チュアダングポルシャバ)	5-81
図 5.4.14	地下水位及び水質変化 CH-2 (チュアダング)	5-82
図 5.4.15	月別モニタリング結果 CH-2 (ガールズカレッジ、チュアダングポルシャバ)	5-83
図 5.4.16	地下水位及び水質変化 CH-2 (チュアダング)	5-84
図 5.4.17	月別モニタリング結果 CH-BD (ポロドゥウパティラ、ダムルフダ) ...	5-85
図 5.4.18	地下水位及び水質変化 CH-BD (チュアダング)	5-86
図 5.4.19	月別モニタリング結果 JH-1 (アラブプール、ジェナイダポルシャバ)	5-87
図 5.4.20	地下水位及び水質変化 JH-1 (ジェナイダ)	5-88
図 5.4.21	月別モニタリング結果 JH-2 (ハムダ、ジェナイダポルシャバ)	5-89
図 5.4.22	地下水位及び水質変化 JH-2 (ジェナイダ)	5-90
図 5.4.23	月別モニタリング結果 JH-KC (クリシュナチャンドラプール、モヘシュプール)	5-91
図 5.4.24	地下水位及び水質変化 JH- KC (ジェナイダ)	5-92
図 5.4.25	月別モニタリング結果 JS-1 (ゴープ、ジェソールポルシャバ)	5-93
図 5.4.26	地下水位及び水質変化 JS-1 (ジェソール)	5-94
図 5.4.27	月別モニタリング結果 JS-2 (コルキー、ジェソールポルシャバ)	5-95
図 5.4.28	地下水位及び水質変化 JS-2 (ジェソール)	5-96
図 5.4.29	月別モニタリング結果 JS-RB (ラジュナガールバンカバルシ、ケシャプール)	5-97

図 5.4.30	地下水位及び水質変化 JS- RB (ジェソール)	5-98
図 5.4.31	月別モニタリング結果 CH-BD (ポロドウドゥパティラ、ダムルフダ) ...	5-99
図 5.4.32	月別モニタリング結果 JH- KC (クリシュナチャンドラプール、ジェナイダ)	5-100
図 5.4.33	月別モニタリング結果 JS-RB (ラジュナガールバンカバルシ、ケシャプール)	5-101
図 5.4.34	観測井／観測孔から得られた地下水の Eh-pH-As 相関図.....	5-102
図 5.5.1	観測井／観測孔中の溶解鉄と砒素、アンモニア、酸化還元度及び pH の相関図	5-147
図 5.5.2	ラジュナガール バンカバルシにおける浅層地下水と深層地下水での TDS 濃 度の比較.....	5-148
図 5.5.3	ラジュナガール バンカバルシにおける浅層地下水と深層地下水中での Na 濃 度の比較.....	5-149
図 5.5.4	ラジュナガール バンカバルシにおける浅層地下水と深層地下水中での NH ₄ 濃度の比較.....	5-150
図 5.5.5	ラジュナガール バンカバルシにおける浅層地下水と深層地下水中での Cl 濃 度の比較.....	5-151
図 5.6.1	砒素含有量試験及び砒素溶出試験結果 CH-2(ガールズカレッジ、チュアダンガ ポルシャバ).....	5-156
図 5.6.2	砒素含有量試験及び砒素溶出試験結果 CH-BD (ポロドウドゥパティラ、ダム ルフダ)	5-157
図 5.6.3	砒素含有量試験及び砒素溶出試験結果 JH-1 (アラブプール、ジェナイダポル シャバ)	5-158
図 5.6.4	砒素含有量試験及び砒素溶出試験結果 JH-KC (クリシュナチャンドラプール、 モヘシュプール)	5-159
図 5.6.5	砒素含有量試験及び砒素溶出試験結果 JS-2 (コルキー、ジェソールポルシャ バ)	5-160
図 5.6.6	砒素含有量試験及び砒素溶出試験結果 JS-RB (ラジュナガール バンカバルシ、 ケシャプール)	5-161
図 5.7.1	試掘サイトごとの比湧出量.....	5-167
図 5.7.2	県ごとに得られた透水量係数の深度別分布.....	5-168
図 5.7.3	地下水中の砒素濃度と水質 CH-1(ポシュハット、チュアダンガポルシャバ)	5-169
図 5.7.4	地下水中の砒素濃度と水質 JH-1 (アラブプール、ジェナイダポルシャバ)	

	5-170
図 5.7.5	地下水中の砒素濃度と水質 JS-1 (ゴープ、ジェソールポルシャバ)	5-171
図 5.7.6	地下水のトリリニアダイアグラム (CH-1、チュアダンガ)	5-172
図 5.7.7	地下水のトリリニアダイアグラム (CH-2、チュアダンガ)	5-173
図 5.7.8	地下水のトリリニアダイアグラム (JH-1、ジェナイダ)	5-174
図 5.7.9	地下水のトリリニアダイアグラム (JH-2、ジェナイダ)	5-175
図 5.7.10	地下水のトリリニアダイアグラム (JS-1、ジェソール)	5-176
図 5.7.11	地下水のトリリニアダイアグラム (JS-2、ジェソール)	5-177
図 5.7.12	土壌及び地下水中の砒素濃度 CH-2(ガールズカレッジ、チュアダンガポルシャバ).....	5-178
図 5.7.13	土壌及び地下水中の砒素濃度 JH-1 (アラブプール、ジェナイダポルシャバ)	5-179
図 5.7.14	土壌及び地下水中の砒素濃度 JS-2 (コルキー、ジェソールポルシャバ)	5-180
図 5.8.1	地質断面位置図	5-183
図 5.8.2	地質断面図 (A-A')	5-184
図 5.8.3	地質断面図 (B-B')	5-185
図 5.8.4	C 層中粘土層の等層厚分布図	5-186
図 6.1.1	モデル村落位置とボーリング掘削を行ったポルシャバの位置図	6-4
図 6.3.1	モデル村落の既存井戸中の砒素濃度 (AAS により分析)	6-10
図 6.3.2	ポロドウドゥパティラ村の砒素濃度分布図 (2000 年 10 月)	6-11
図 6.3.3	クリシュナチャンドラプール村の砒素濃度分布図 (2000 年 10 月)	6-12
図 6.3.4	ラジュナガルバンカバルシ村の砒素濃度分布図 (2000 年 10 月)	6-13
図 6.3.5	モデル村落浅層地下水の水質を示したトリリニアダイアグラム	6-14
図 6.3.6	モデル村落池水の水質を示したトリリニアダイアグラム	6-15
図 6.4.1	モデル村落の砒素中毒患者の年齢層	6-18
図 6.4.2	砒素濃度と砒素中毒患者が使用した井戸の割合	6-18
図 7.2.1	曝気・濾過方式による砒素除去結果	7-10
図 7.2.2	クリシュナ・チャンドラプール村の実験結果	7-13
図 7.3.1	シーリングがない場合の深層の砒素汚染	7-18
図 7.3.2	改良型井戸のシーリング方法	7-18
図 7.3.3	ナイスシールの巻き付け	7-19
図 7.3.4	メタルペタルバスケット	7-20
図 8.2.1	モデル条件と計算被圧水頭 (Case-01、井戸なし)	8-11
図 8.2.2	計算砒素濃度 (Case-01、井戸なし)	8-12

図 8.2.3	モデル条件と計算被圧水頭 (Case-02、かんがい用井戸)	8-13
図 8.2.4	計算砒素濃度 (Case-02、かんがい用井戸)	8-14
図 8.2.5	モデル条件と計算被圧水頭 (Case-03、Case-02+生活用深井戸)	8-15
図 8.2.6	計算砒素濃度 (Case-03、Case-02+生活用深井戸)	8-16
図 8.2.7	モデル条件と計算被圧水頭 (Case-04、Case-03+生活用深井戸)	8-17
図 8.2.8	計算砒素濃度 (Case-04、Case-03+かんがい用深井戸)	8-18
図 8.2.9	三次元広域モデルのモデルグリッド	8-32
図 8.2.10	三次元広域モデルに入力した過去の地下水揚水量	8-33
図 8.2.11	用途別及びモデル層別の過去の地下水揚水量	8-34
図 8.2.12	ジェナイダ・ポルシャヴァにおける計算 地下水頭と実測地下水位との比較	8-35
図 8.2.13	ジェソール・ポルシャヴァにおける計算 地下水頭と実測地下水位との比較	8-36
図 8.2.14	検証計算による計算被圧水頭の分布 (2001 年、Layer-3)	8-37
図 8.2.15	2001 年 1 月における計算被圧水頭分布と実測地下水位分布との比較	8-38
図 8.2.16	将来の地下水揚水シナリオの概念	8-39
図 8.2.17	シナリオ-1 による将来地下水揚水量	8-40
図 8.2.18	ケース-1、シナリオ-1 による将来地下水揚水量	8-41
図 8.2.19	ケース-1、シナリオ-1 による計算被圧水頭分布 (2020 年、Layer-3) ..	8-42
図 8.2.20	ケース-2、シナリオ-1 による将来地下水揚水量	8-43
図 8.2.21	シナリオ-1 におけるケース-1 とケース-2 の計算水頭差 (2020 年 4 月)	8-44
図 8.2.22	シナリオ-1 におけるケース-1 とケース-2 の計算水頭差 (ジェソール県)	8-45
図 8.2.23	シナリオ-2 による将来地下水揚水量	8-46
図 8.2.24	ケース-1、シナリオ-2 による将来地下水揚水量	8-47
図 8.2.25	2002 年から 2020 年までの計算水頭 (ジェソール・ポルシャヴァ、ケース-1、 シナリオ-2)	8-48
図 8.2.26	モデル村落における 2002 年から 2020 年までの計算水頭 (ケース-1、シナリ オ-2)	8-49
図 8.2.27	ケース-1、シナリオ-2 による計算被圧水頭分布 (2020 年、Layer-3)	8-50
図 8.2.28	2020 年 4 月におけるケース-1、シナリオ-1 とケース-1、シナリオ-2 の計 算水頭差	8-51
図 8.2.29	2020 年 9 月におけるケース-1、シナリオ-1 とケース-1、シナリオ-2 の計 算水頭差	8-52

図 8.2.30	ケース-2、シナリオ-2による将来地下水揚水量	8-53
図 8.2.31	シナリオ-2におけるケース-1とケース-2の計算水頭差 (2020年4月)	8-54
図 8.2.32	シナリオ-2におけるケース-1とケース-2の計算水頭差 (ジェソール県)	8-55
図 8.2.33	ケース-3、シナリオ-2による2020年12月のLayer-5からの地下水揚水量 分布.....	8-56
図 8.2.34	ケース-3、シナリオ-2による将来地下水揚水量	8-57
図 8.2.35	シナリオ-2におけるケース-1とケース-3の計算水頭差 (2020年4月)	8-58
図 8.2.36	シナリオ-2におけるケース-1とケース-3の計算水頭差 (Chaugachha およ び Moheshpur)	8-59
図 8.2.37	ケース-3、シナリオ-2による計算被圧水頭分布 (2020年、Layer-5)	8-60
図 8.2.38	ケース-4、シナリオ-2による将来地下水揚水量	8-61
図 8.2.39	ケース-4、シナリオ-2による計算被圧水頭分布 (2020年、Layer-5)	8-62
図 8.2.40	ジェソール県 Rajnagar Bankabarsi 村における2002年から2020年までの計算水 頭 (ケース-4、シナリオ-2)	8-63
図 8.2.41	シナリオ-2におけるケース-1とケース-4の計算水頭差 (2020年4月)	8-64
図 8.2.42	地質断面図 (B-B'線) と帯水層区分	8-74
図 8.2.43	断面二次元広域モデルのモデルグリッド	8-75
図 8.2.44	断面二次元モデルにおける層相区分と地層境界	8-76
図 8.2.45	断面二次元モデルの位置と使用した三次元モデルの揚水セル	8-77
図 8.2.46	断面二次元モデルに入力した地下水揚水量 (2001年12月)	8-78
図 8.2.47	断面二次元モデルによる計算被圧水頭 (2001年12月)	8-79
図 8.2.48	断面二次元モデルによる計算砒素濃度 (2001年12月)	8-80
図 8.2.49	2005年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布 (ケース-1、シナリオ-1)	8-81
図 8.2.50	2020年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布 (ケース-1、シナリオ-1)	8-82
図 8.2.51	ケース-1、シナリオ-1における2002年と2020年の計算被圧水頭差 ...	8-83
図 8.2.52	2005年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布 (ケース-2、シナリオ-1)	8-84
図 8.2.53	2020年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布 (ケース-2、シナリオ-1)	8-85

図 8.2.54	シナリオ-1 におけるケース-1 とケース-2 の計算水頭差 (2020 年) ..	8-86
図 8.2.55	2005 年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布 (ケース-1、シナリオ-2)	8-87
図 8.2.56	2020 年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布 (ケース-1、シナリオ-2)	8-88
図 8.2.57	ケース-1、シナリオ-2 における 2002 年と 2020 年の計算被圧水頭差 ...	8-89
図 8.2.58	2005 年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布 (ケース-2、シナリオ-2)	8-90
図 8.2.59	2020 年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布 (ケース-2、シナリオ-2)	8-91
図 8.2.60	シナリオ-2 におけるケース-1 とケース-2 の計算水頭差 (2020 年) ..	8-92
図 8.2.61	2005 年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布 (ケース-4、シナリオ-2)	8-93
図 8.2.62	2020 年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布 (ケース-4、シナリオ-2)	8-94
図 8.2.63	シナリオ-2 におけるケース-1 とケース-4 の計算水頭差 (2020 年) ..	8-95
図 9.2.1	提案された優先プロジェクト	9-5
図 9.5.1	バングラデシュ国砒素汚染地域マスタープランフレームワーク (ジェソール、 ジェナイダ、チュアダンガ県)	9-16
図 10.3.1	太陽熱蒸留及び雨水集水システム概念図	10-12
図 10.4.1	タナ砒素対策促進センター概念図	10-13
図 10.6.1	広域農村水道のパイプライン施設概要図	10-22
図 11.1.1	16 モザ位置図	11-2
図 11.1.2	人口 100 人に対する井戸の本数	11-5
図 11.1.3	井戸深度区分 π グラフ	11-6
図 11.1.4	各井戸における砒素濃度分布図	11-7
図 11.1.5	フィールドキットで測定した砒素濃度分布図	11-8
図 11.1.6	原子吸光で測定した砒素濃度分布図	11-9
図 11.1.7	農業用井戸の砒素汚染分布図	11-10
図 11.1.8	既存井戸における電気伝導度分布図	11-11
図 11.1.9	既存井戸における Eh-pH-As 相関図	11-12
図 11.1.10	フィールドキットと原子吸光で測定した結果の比較	11-13
図 11.2.1	観測井の掘削位置図 1	11-16
図 11.2.2	観測井の掘削位置図 2	11-17
図 11.2.3	JS-OW-1 での柱状図及び物理検層結果[ブラマカティ、ケシャプール]....	11-18

図 11.2.4	観測井のケーシングプログラム (JS-OW-1:ブラマカティ)	11-19
図 11.2.5	JS-OW-1 での連続揚水試験及び回復試験結果	11-20
図 11.2.6	地質断面図位置図	11-21
図 11.2.7	地質断面図 (A-B)	11-22
図 11.2.8	地質断面図 (B-C)	11-23
図 11.2.9	地質断面図 (D-E)	11-24

第1章

序論

要約

第1章 序論

1.1 調査の背景

バングラデシュ人民共和国（以下、「バ」国とする）は、1971年12月にパキスタンから分離独立したが、人口1億2,300万人（1996年6月現在）をかかえ、1人当たりのGDP235米ドル（1994/1995年度）であり、世界48カ国の後発開発途上国（LLDC）の中で最大の人口を有する国となっている。「バ」国は、独立後も度重なる洪水やサイクロン等の被害に見舞われ、毎年国土の3分の1が冠水する。また、開発資金、インフラ、人的資源、天然資源等、ほとんどあらゆる面で不足がみられ、国土整備は農村部、都市部とも立ち後れている。

「バ」国において、安全な飲料水の確保は、重要な課題となっている。独立当時は、国民の多くが川や沼などの地表水を飲用していたが、水に起因する伝染病が多発したことから、UNICEFやWHO、ドナー国の援助や「バ」国政府の取組みにより、井戸の掘削が積極的に進められ、現在、国民の95%が飲料水を地下水に依存している。我が国も、1980年代中期に、無償資金協力により「バ」国西部地域に地方都市給水用の井戸及び給水施設を建設した。現在、「バ」国には500万本以上の井戸（内、公共井戸は約100万本）があると推定されている。こうして、飲料水の地下水への依存が高まるにつれ、伝染病による死亡率は大きく低下した。しかし、これを覆す大きな問題が1990年代になって発生した。それが、砒素による地下水汚染問題である。

「バ」国において、地下水の砒素による汚染が公式に確認されたのは、1993年である。1994年には、汚染が確認された同国北西部のナワブガンジ県において、砒素中毒の症状が出ている患者が発見された。隣のインド国西ベンガル州では、1980年代から地下水砒素汚染が問題となり、カルカッタのジャダプール大学等の研究者が精力的に調査を進めていたが、「バ」国側では国立予防社会医学研究所（NIPSOM）やダッカコミュニティーホスピタル（DCH）の医者が調査を開始したばかりであった。西ベンガル州での調査が進むにつれて、地形・地質的にも似た条件にあるガンジスデルタ地域で砒素汚染が広範囲に発生している危険性が指摘され、医療機関やNGO、国際機関、「バ」国政府が調査を開始した。

その結果、1996年までに、汚染の範囲は西部国境地帯だけではなく、「バ」国の国土の3分の2を超える地域で汚染が確認された。1999年末までには、「バ」国全体の64県のうち、山地や丘陵部を除く59県で地下水の砒素汚染が確認された。現在までに確認された砒素中毒患者は7,000人以上、砒素中毒にかかるリスクのある人口は、最低2,000万人、最大7,000万人以上と見積もられている。

こうした非常事態に対し、「バ」国政府もこの問題を国家の存亡にかかる重大問題としてとらえ、1996年に保健省大臣を議長とし、関係省庁をメンバーとした国家砒素対策委員会を設置した。また、UNICEF や世界銀行、WHO 等の国際機関や、イギリス、アメリカ、オランダ、デンマークなどの援助国や内外の NGO や研究機関などが砒素問題に取り組み始めた。1998年からは、世銀の援助による15年計画のバングラデシュ砒素緩和water供給プロジェクト（BAMWSP）が開始された。

砒素汚染問題が公式に確認されてから7年近く経っていたにもかかわらず、砒素汚染の実態やメカニズムが十分に解明されておらず、具体的な対策もほとんど実施されていない。

国際協力事業団は、こうした深刻な「バ」国砒素汚染問題への取り組み方を検討するために、1998年に、短期専門家3名をDPHEに派遣し砒素汚染の実態と対策について調査を開始した。このときに、砒素汚染対策としての地下水開発調査をおこなう地区として、砒素汚染が深刻であり、かつ、代替水源として地表水を確保することが難しい「バ」国西部の3県を対象地区とすることが検討された。

以上のような背景から「バ」国政府は、1999年に我が国に対して本件開発調査の実施に係る協力を要請した。これに対し我が国は1999年12月に事前調査団を派遣してS/Wを締結した。

調査団は2000年5月から2002年3月まで、砒素汚染実態の解明、深層地下水の開発可能性、砒素汚染対策手法や砒素汚染メカニズムについて詳細な調査を行い、それにもとづき砒素汚染対策のマスタープランを策定し、優先プロジェクトのプレ・フィージビリティ調査を行った。このファイナルレポートはこれらの調査結果をとりまとめたものである。

1.2 調査の目的

調査の目的は

「バ」国西部の砒素汚染地域において、深層地下水開発計画に係るマスタープランを策定する。

優先プロジェクトについてのプレ・フィージビリティ調査を実施する。

調査の実施を通じてカウンターパートに対して技術移転を行う。

の3項目である。

1.3 調査の対象地域

調査対象地域は、「バ」国西部3県（チュアダンガ、ジェナイダ、ジェソール）である。調査地域はガンジスデルタの一角を占め、ガンジス川右岸の南部に位置する。総面積は5,685 km²であり、北緯22° 80' 及び23° 80' と東経88° 60' 及び89° 50' の間にある（図 1.1）。

県は行政的に上からタナ、ユニオン、モザに区分される。3県及び18タナの人口は表 1.1 にしめす。調査地域は197 ユニオン及び2,620 モザから構成され総人口は5,088,000 人である。

1.4 調査の実施

調査は次の3段階に分けて実施された。

- フェーズ : 実態調査及びデータベース作成
- フェーズ : 深井戸掘削、砒素汚染対策等の調査及びマスタープラン（M/P）策定
- フェーズ : プレ・フィージビリティ調査

表 1.1 行政単位、ボルシャバおよび調査地域の面積

District	Thana	No. of Union	No. of Mouza	Population	Area (km ²)
Jessore	Jhikargachha	11	163	280,738	2,578
	Sharsha	11	135	308,002	
	Keshabpur	9	140	238,306	
	Jessore Sadar	16	245	631,480	
	Chaugachha	11	141	216,407	
	Monirampur	17	245	388,104	
	Abhaynagar	8	89	243,572	
	Bagherpara	9	156	201,064	
	Subtotal	92	1314	2,507,673	
Jhenaidah	Sailkupa	15	169	349,124	1,950
	Harinakunda	8	78	192,900	
	Moheshpur	13	156	293,197	
	Kotchandpur	6	80	127,577	
	Kaliganj	12	185	260,796	
	Jhenaidah Sadar	18	265	396,553	
		Subtotal	72	933	
Cuadanga	Chuadanga Sadar	8	101	265,701	1,158
	Alamdanga	14	125	292,214	
	Jibannagar	4	70	148,892	
	Dhamurhuda	7	77	253,851	
		Subtotal	33	373	
TOTAL	18	197	2,620	5,088,478	5,686

Data source: Administration units: LGED (1994)
Population: DfID (1999)
Area: BBS (1997)