

ボリヴィア国
ポトシ県鉱山セクター環境汚染評価調査

最終報告書
(要 約)

平成11年9月

JICA LIBRARY



J1152496(4)

三井金属資源開発株式会社
ユニコインターナショナル株式会社

鉱 鋼 資

J R

99-177



国際協力事業団

ボリヴィア共和国
持続開発計画省

ボリヴィア国
ポトシ県鉱山セクター環境汚染評価調査

最終報告書
(要 約)

平成11年9月

三井金属資源開発株式会社
ユニコインターナショナル株式会社



1152496{4}

目次

1. 背景	1
2. 調査目的、調査対象範囲及び調査概要	2
2-1 調査目的、調査対象範囲	2
2-1-1 調査目的	2
2-1-2 調査対象範囲	2
2-2 調査分野及び調査概要	2
2-2-1 調査分野と担当者	2
2-2-2 調査概要	3
3. ポトシ特別事情	5
3-1 世界遺産	5
3-2 ポトシ地域の鉱業	5
4. 汚染の現状	6
4-1 タラバヤ川水系水質汚濁の範囲と程度	6
4-1-1 汚染源	6
4-1-2 汚染状況	6
4-2 被害の範囲と程度	7
4-3 汚染の影響まとめ	7
4-3-1 社会的影響	7
4-3-2 経済的影響	8
4-3-3 環境的影響	8
5. 汚染源と鉱害発生メカニズム	9
5-1 汚染源	9
5-1-1 鉱山坑内水	9
5-1-2 低品位の採掘鉱の堆積場から流出する浸透水	9
5-1-3 スークから流出する浸透水	9
5-1-4 比重選鉱(錫)尾鉱の堆積場から流出する浸透水	9
5-1-5 鉛、亜鉛の浮遊選鉱尾鉱の堆積場から流出する浸透水	10
5-1-6 銀のヒーブリーチング場からの浸透水	10
5-1-7 インヘニオ尾鉱(SS、アルカリ性水)	10
5-2 鉱害発生メカニズム	11
5-2-1 発生源メカニズム	11
5-2-2 河川水質汚濁メカニズム	12
6. 対策のための検討	13
6-1 鉱害防止計画	13

6-1-1 対策項目	.....	13
6-1-2 鉱害防止計画基本フロー	.....	13
6-2 環境管理計画	.....	14
7. 啓蒙・教育・人材育成計画	.....	15
7-1 問題点	.....	15
7-2 啓蒙・教育・人材育成計画	.....	15
8. 財務・経済分析	.....	16
8-1 財務分析	.....	16
8-2 経済分析	.....	16
8-2-1 農業部門の機会損失の算出	.....	16
8-2-2 牧畜業部門の機会損失の算出	.....	17
8-2-3 基本ケース：水質改善が完全に達成された場合の結果	.....	18
9. 今後の施策に向けての提言とその効果	.....	19
9-1 今後の施策に向けての提言	.....	19
9-1-1 緊急(短期)に実施すべき事項	.....	19
9-1-2 中期的に実施すべき事項	.....	19
9-1-3 長期的に実施すべき事項	.....	19
9-1-4 環境・保安研究センターの設立	.....	20
9-2 提言諸施策実施による改善効果	.....	20
謝辞	.....	21

1. 背景

ボリヴィア国では、長年鋳業資源が輸出産業の主力であった。鋳業の全盛期には、全国で大小合わせ千以上の鋳山が首都ラパス市からオルロ市、ポトシ市を経てトゥピサ市に至るアンデス山系に集中していた。しかし、1980年代半ばに起こった世界的な錫価格の大暴落と鋳山労働者のストライキによって大半の鋳山が閉山した。

一方、環境への配慮が不十分なため、400年以上に亘る鋳業活動による環境汚染は深刻である。特に、ポトシ市周辺の鋳山、インヘニオでは、廃石は野積みにされ、廃滓は垂れ流しされている。また、各所の休・廃止鋳山坑内から湧き出る酸性廃水も加わり、市内を流れるリベラ川、ワイナマユ川等が汚濁され、下流のピルコマヨ川を経て隣国パラグアイ、アルゼンチンを通してラプラタ川に至るまでの河川水質汚濁の原因として、公害輸出・国際問題を引き起こしている。

かかる現状を深刻に受け止め、ボリヴィア政府は持続開発環境省（当時）を通してポトシ県鋳山セクター環境汚染評価調査を日本に要請した。

国際協力事業団はこれを受け、持続開発環境局をカウンターパートとして本調査が実施されることとなった（調査位置全体を図-1に示す）。

2. 調査目的、調査対象範囲及び調査概要

2-1 調査目的、調査対象範囲

2-1-1 調査目的

本調査の目的は、下記内容に基づく。

- ① ポトシ県における鉱業による環境影響の調査を行う。
- ② 環境モニタリングと環境管理計画を策定する。
- ③ 当該地域の鉱害を管理し削減するための政策的、技術的提言を行う。
リベラ川及びピルコマヨ川の主要ポイントにおける重金属等による汚染状況を明らかにし、汚染発生源の汚染防止策を作成する。また、リベラ川の環境モニタリングシステムを構築し、C/P が独自に類似調査の実施、鉱害防止対策の作成、環境管理計画（環境基準）の改正等を行えるように技術移転を行う。

調査の概念を図-2 調査概念図に示す。

2-1-2 調査対象範囲

本調査の調査対象範囲は、ポトシ市近郊及びポトシ市に源を発するリベラ川が流下するに伴い、アルハマユ川、モリノ川、タラバヤ川となり、ピルコマヨ川に合流してメンデス橋に至るまでの約 180km の区間である（図-3 参照）。

2-2 調査分野及び調査概要

2-2-1 調査分野と担当者

団長	大木 久光
水質/水文	森 俊夫
鉱山地質	中村 廉
選鉱	伊東 賢治
廃水処理（化学分析）	田中 良弘
データ整理/統計	Ricardo ORTIZ
施設設計（機械）/積算	木村 聡一郎
経済/財務	小杉 芳雄
環境管理計画/組織・体制	山内 兼

の8分野である。

2.2.2 調査概要

・水質/水文

調査対象地域の河川に、25 箇所のサンプリングポイント、2 箇所の定置観測点及び6カ所の断面測定点を設け、水質、底質、水量について、雨期と乾期とを含む年間のモニタリングデータを収集し、解析を行い汚染メカニズムの解明を行った。

・鉱山地質

ポトシ鉱山周辺の地質鉱床に関する既存資料、ポリヴィア鉱山公社をはじめとする関係機関から新たに入手した資料及び現地踏査結果を解析し、ポトシ鉱床の鉱種別寿命（埋蔵鉱量）を推定した。

・選鉱

インヘニオと呼ばれる小規模選鉱場の現状を調査し、問題点を抽出した上で、選鉱試験を実施し、生産と環境を両立させるための改善案を策定、モデルプラント、インテグレイト選鉱場の設計諸元を決定の上、提言した。

・廃水処理（化学分析）

汚染源と考えられる測定点を30カ所設定し、雨期と乾期とを含む年間のモニタリングデータを収集し、汚染源メカニズムの解明を行った。

平行して、廃水処理試験を実施し、解析を行い、汚染原の適正処理方法及び処理条件を提言した。

・データ整理/統計

水質/水文調査結果、汚染源調査結果、選鉱試験結果及び廃水処理試験結果を蓄積するデータベースを構築し、この結果を利用した統計解析・シミュレーションソフト、将来予測モデル例を試作した。

・施設設計（機械）/積算

現地におけるプラント設計/積算のための資料調査を行うとともに、選鉱試験及び廃水処理試験結果にインヘニオ踏査結果を含めて、モデルプラント及びインテグレイト選鉱場の概念設計、積算を行った。

・経済/財務

モデルプラント及びインテグレイト選鉱場建設に関する財務計算を実施するとともに、対策案実施による経済計算を可能な範囲で試算した。

・環境管理計画/組織・体制

汚染の現状、影響の範囲と程度、環境関連法・基準等を現地再委託を含めて調査を行い、解析結果、環境指標、環境関連組織案、環境モニタリングシステム構築等環境管理に関する提言を行った。

3. ポトシ特別事情

3-1 世界遺産

地理学的見地、並びに歴史的見地から、ポトシ山とポトシ市が、ユネスコにより、1987年12月8日に自然と文化の両面での世界遺産に指定された。

栄華を極めた歴史のため、鉱山町であるポトシ市は、新たに会社がポトシ山を鉱山として開発する事に大変敏感になっている。

3-2 ポトシ地域の鉱業

ポトシ地域の鉱業活動は、400年以上に亘る長い歴史を持ち、ポトシ鉱山で産出した銀は、15～17世紀にかけて、スペイン王国の銀貨の9割以上を賄ったと言われる。

本調査範囲にあるポトシ地域の鉱業の主体は、次のとおりである。

- ① 鉱山：ポリヴィア鉱山公社の系統である中規模のパイラビリ（Pailaviri R.C.）社並びに30の家内工業的小規模会社の集合体である鉱業協同組合（Cooperativa Minera）
- ② インヘニオ：合計42に及ぶ中小規模の選鉱場及び零細規模の選鉱所

4. 汚染の現状

4-1 タラパヤ川水系水質汚濁の範囲と程度

4-1-1 汚染源

30 カ所の汚染源調査の結果、坑内酸性湧水、廃石・スーク浸透酸性水、旧尾鉍堆積場浸透酸性水およびインヘニオ尾鉍によるアルカリ性汚染が確認された。

酸性水は、pH2 弱から 4 弱まで試料採取地点別に種々あるが、さらに集中豪雨的な降雨による瞬間的な変動も大きい。(図-4 参照)

4-1-2 汚染状況

25 カ所の試料採取地点、2 カ所の定置式モニタリング装置設置箇所及び 6 カ所の河川横断測量調査地点における雨期及び乾期を通しての調査結果、以下のことが判明した。(図-5 参照)

タラパヤ川水系の最上流に当たるリベラ川水系ではリベラ川の支流のワイナマユ川等に鉍山坑内排水や廃石、スークから酸性の浸透水が流れ込む。

流下するに伴いインヘニオからアルカリ性の尾鉍が流入している。これらが河川の水質汚濁を招く。最も影響が大きいものは尾鉍であり、尾鉍中に含まれる砒素や重金属である。次いで、重金属イオンを含有する坑内排水とスークや堆積場の浸透水である。

ワイナマユ川に合流するまでのリベラ川は、酸性水とアルカリ性水との中和反応が起こっている化学反応ゾーンであり、タラパヤ川水系からピルコマヨ川水系メンデス橋の水質汚濁の主因は砒素と重金属を含んだ SS の沈降と掃流 (ウォッシュ アウェイ) による物理的ゾーンである。

リベラ川源流では、pH2.2~2.3 の強酸性で、カドミウム (Cd) を 16~24ppm、亜鉛 (Zn) を 1,000ppm 強、銅 (Cu) を 200ppm 弱、硫酸根 (SO_4) を 31,000ppm 含む坑内湧水が流入し、リベラ川を酸性化している。ポトシ市内を流下する間に、インヘニオと呼ばれる小規模選鉍場から放出される、直径 25~200 μm の微細な鉍物粒子を 10~15 重量% 含み、しかも、pH10~12 の強アルカリ性の選鉍尾鉍が流れ込み、中和反応を起こしながらリベラ川の水質を汚濁している。酸性湧水と尾鉍の流入量比は約 1/30~100 である。

ポトシ市の出口付近で、旧堆積場内を浸透して酸性化した湧水 (pH2

以下、Cd4.6ppm、Zn710ppm、Cu112ppm、SO₄19,600ppm) が 40～50m³/d 流入している。

このほか、スークと呼ばれる昔の比重選鉱尾鉱がポトシ山の麓を覆うように大量に存在し、降雨時には、このスークを浸透して酸性化した湧水が流入し、水質汚濁を加速する。

SS は、サン・アントニオで 1,700t/d 強、ポトシ市内で 1,200t/、モリノ部落付近で 950t/d、モンドラゴン部落付近で 400t/d 弱であった。尾鉱流入量が 1,300～1,500t/d であるから、SS の大半が尾鉱に由来すると考えられる。

上記数値は、サン・アントニオから下流で大量の SS の沈降、底質への蓄積が生じている事を示している。サン・アントニオとモリノの間で約 750t/d、モリノとモンドラゴンの間で約 550t/d の SS の沈降、底質への蓄積が生じている。雨期には間欠的な豪雨と出水とで、蓄積した底質が洗い去られ移動する。乾期と雨期とで 100 倍近い SS 濃度の差がある。乾期には流れに沿って多量の底質蓄積が目立つ。

タラパヤ川水系に排出されている汚濁重金属量を概算すると、砒素が約 300kg/d、カドミウムが 80-100kg/d、鉛が 2t/d、亜鉛が 20-30t/d、そして錫も 2-4t/d になる。

4-2 被害の範囲と程度

場 所	鉛 (ppm)	亜鉛(ppm)	記事
ヴィジャモンテ	2.11	13.31	アルゼンチンに近い
ブレルトマルガリタ	7.76	35.64	ヴィジャモンテとユキムビアの間
ユキムビア	6.82	33.48	ポトシに近い

4-3 汚染の影響まとめ

以上の汚染影響の事実を考慮に入れて、水質汚染がピルコマヨ川流域の調査対象地区へ与えている影響を次のように分類することが出来る。

4-3-1 社会的影響

- ① 伝統的生産活動を継続する事の困難性と不可能性からくる貧困
- ② 貧困から来る移住、特に水が不足する冬季と春季、更に栄養不足から来る病気の多発と、とくにひどい消化器系の病の増加
- ③ 貧困と移住による伝統的社会組織の崩壊

4.3.2 経済的影響

- ① 漁業、農業、牧畜業の生産能力の低下と不安定性
- ② 人的資源の減少による経済活動の低下
- ③ ビルコマヨ川流域経済における農業分野の政治的、経済的重要性の低下

4.3.3 環境的影響

- ① 重金属、毒性物質、化学薬品等の河川内、川床への蓄積と食物連鎖への影響
- ② ビルコマヨ川内の浮遊固形物の増加
- ③ 外部攪乱要因に対する生態系の不安定性の増加（人と自然）

5. 汚染源と鉱害発生メカニズム

5-1 汚染源

調査の結果、ポトシ県の鉱山セクターにおける河川水質汚濁の汚染源としては下記が判明した。汚染源調査（サンプリング）位置を図-6 に示す。

5-1-1 鉱山坑内水

代表的な廃水はNa12 である。雨期と乾期の水質を比較すると、pH は 2.28 と 2.22 とでいずれも低く、Cu が 182mg/L と 198mg/L、Zn が 1,050mg/L と 1,110mg/L、Cd が 16.4mg/L と 24.0mg/L を示し、重金属濃度が他の採取地点と比べて高い。また、SO₄ 濃度も 31,000mg/L と最も高く、T-Fe に占める Fe³⁺ の割合も高いことから、廃水が坑内で酸化されていることが推測される。なお、乾期に高濃度の砒素が検出された。この水はワイナマユ川へ入る。

5-1-2 低品位の採掘鉱の堆積場から流出する浸透水

代表的な廃水はNa13 である。鉱山坑内水と同様の傾向の水質を示し、pH は 1.86 と最も低く、Cu 112mg/L、Zn 710mg/L、Cd 4.6mg/L と重金属濃度も高い。

SO₄ 濃度は 19,600mg/L と No.12 に次いで高く、廃水の酸化が同様に認められる。降雨時、この水はワイナマユ川へ流れ込む。

5-1-3 スークから流出する浸透水

代表的な廃水はNa 1 及びNa18 である。汚染の程度はNa12 及びNa13 までには至らないが、pH は順に 2.58、3.09 と低く、他の項目は順に Cu 60.0mg/L、4.40mg/L、Zn 144mg/L、916mg/L、Cd 14.0mg/L、45.0mg/L となり、No.12 及び No.13 と同様の傾向が見られる。また、Sn が順に 43.3mg/L、21.9mg/L 検出されている。これらの水はケブラダ・ハジャホマユ川へ入る。

5-1-4 比重選鉱（錫）尾鉱の堆積場から流出する浸透水

サン・ミゲル堆積場が体系的な発生源である。代表的な廃水はNa26 で、湧き水の流出が常時観測される。この水は直接リベラ川へ入る。

雨期と乾期との水質を比較すると、pH は 3.14、2.99、重金属は Cu 5.20mg/L、6.20mg/L、Zn 60.0mg/L、75.0mg/L である。雨期の SO₄

濃度は 1,290mg/L である。

5-1-5 鉛、亜鉛の浮遊選鉱尾鉱の堆積場から流出する浸透水

サン・ミゲル堆積場が代表的な発生源である。代表的な廃水はNo.16で、乾期は廃水の流出がない。

pH は 2.38、重金属は Cu 96.0mg/L、Zn 529mg/L、Cd 1.50mg/L である。また SO₄ 濃度は 9,690mg/L である。

5-1-6 銀のヒーリーチング場からの浸透水

ポトシ地区に立地する銀のリーチング・プラントはブラヒボである。試料採取地点はNo.27 であるが、調査期間中は操業が停止され、また、試料採取も不可能であった。なお、ポトシ地区の南側にコムコが位置しているが、調査地域であるポトシ地区と水系が異なるため調査の対象外とした。

5-1-7 インヘニオ尾鉱 (SS、アルカリ性水)

ポトシ市周辺に散財するすべてのインヘニオ (計 42) が、リベラ川を始めとするポトシ市に係る 4 系統の全河川に、選鉱尾鉱を未処理のまま全量投棄し、深刻な河川の汚染を生じさせている。インヘニオによる河川の水質汚濁の原因は、選鉱尾鉱による SS (固形分) とアルカリ性水 (水部分) とからなる。これらの選鉱系汚濁は、鉱山系汚染と共に河川の水質汚濁の主要原因となっている。

400 年間以上に亘る鉱業活動の中で続いてきた鉱害も、近年は特に深刻化している。その理由は以下のとおりである。

1985 年の ITC 崩壊による錫 (Sn) 建値大暴落が発生し、ポトシ市のインヘニオは、それまで実施してきた比重選鉱法にて酸化錫鉱 (錫石 Cassiterite : SnO₂) を採取する方式から浮遊選鉱法により硫化鉛鉱物 (方鉛鉱 Galena : PbS) 及び硫化亜鉛鉱物 (閃亜鉛鉱 Sphalerite : ZnS) を採取する方式に切り替えた。この方式の変更に伴い、次の①～④に示す変化が生じた。

- ① 細粒化：鉱石粒度が、比重選鉱用の数～0.5 mm 程度の粗～中粒から、浮遊選鉱用の約 0.3～0.05 mm の中～細粒に細くなるに伴い尾鉱粒度も細粒化した。
- ② 薬剤の使用開始：浮遊選鉱法の採用により、浮選剤が使用され、過剰に添加された気泡剤、捕集剤 (有機)、抑制剤 (シアン系等) 等が、

尾鉱に残留薬品として含まれたまま放流されるようになった。

- ③ 高 pH 化：硫化鉛鉱、硫化亜鉛鉱の採取に適した浮選条件とするために、pH を高くするようになり、これに伴って尾鉱の pH も高くなった。
- ④ 技術不十分：各インヘニオは、経験に基づいた操業を行っているところが多く、現在のポトシ鉱山の鉱石に最適なフローと条件とを適用しているとは言えない。その結果、未採取の重金属を多量に含んだ尾鉱を排出するようになった。

以上の結果を下表に示す。(図-7 参照)

区分	汚染の原因及びメカニズム		汚染物質
発生源	鉱山系排水	坑内水	酸性水、水中に重金属溶解
		採掘廃石浸透水	酸性水、水中に重金属溶解
尾鉱堆積場浸透水		酸性水、水中に重金属溶解	
	選鉱系廃水廃水	浮選排水	アルカリ性水、水中に濁物質(SS)
		選鉱尾鉱	砒素、重金属含固形物
河川での現象	化学的現象	中和反応 (酸性低下、中性ないし擬アルカリ性)	重金属類の溶解度低下、析出 水中に重金属に富む SS
	物理的現象	固形分の沈降 下流部への底質移動 (出水時の底質巻き込み、再沈殿)	砒素、重金属に富む底質結成 砒素、重金属に富む底質の移動

5-2 鉱害発生のメカニズム

5-2-1 発生源のメカニズム

ポトシ地区にある河川は通常、鉱山坑内水、インヘニオからの廃水及び生活排水によって汚染されている。降雨時には、廃石堆積場や廃滓堆積場からの流水、浸透水が河川を汚染する。

金属鉱山では主として硫化鉱物を採掘するため、閉山後においても採掘跡には黄鉄鉱、黄銅鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱などの硫化鉱物残り、これらが地下水や空気中の酸素と反応して酸性で重金属を含んだ坑廃水を発生する。鉱業活動によって発生する採掘廃石の堆積場についても、雨水などにより金属が溶出するため、鉱害の発生源となる。また、廃石自体の流出や風による飛散なども問題となる。これらが酸性の鉱

山系汚染水である。

ポトシ山には、東側、北東側及び南西側のそれぞれの山腹にスークが堆積している。その規模は順に 32,000m²、400,000m²、90,000m² である。さらに、鉱山の斜面には廃石捨場や廃滓堆積場が多く密集しており、ポトシ山の標高 4,400m 以上の斜面には酸化鉱が、それ以下の斜面には主に硫化鉱が堆積されている。ソカボン・レアル（西語で基準坑道の意）の外側の地点では、典型的な鉱山坑内水が常時流出している。ポトシ山東側の麓には休止中のブラヒボの銀リーチング・プラントがある。市街地を西に下った地点にサン・ミゲル廃滓堆積場があり、そのすぐ北側には、酸性水が潤れることなく湧出し、リベラ川に注いでいる。降雨時になると、雨水はそれらの堆積場の表面を流れ、一部は浸透して伏流し、湧水や浸透水となって河川に注いでいる。

5-2-2 河川水質汚濁のメカニズム

河川の水質汚濁に最も影響しているのが、前述の、酸性湧水や浸透水で酸性化されたインヘニオからリベラ川などへ、未処理のまま排出される選鉱尾鉱の強アルカリ性水及び SS である。さらに言えば SS 中に含まれる重金属類と砒素である。

なお、As、Cu、Pb、Cd 等は pH 上昇につれ溶解度が低下するが、その後再上昇の傾向を示した。これらの金属は両生のため、pH8 から 9 程度で錯イオンを形成して再溶解が始まったものとする。

SS 中の重金属の含有割合に比べ、底質中の重金属含有の割合の方が高い値を示している。尾鉱中の鉱物分の沈積に中和反応で生成した酸化物が加わったためと考えられる。(図-8 参照)

6. 対策のための検討

6-1 鉱害防止計画

6-1-1 対策項目

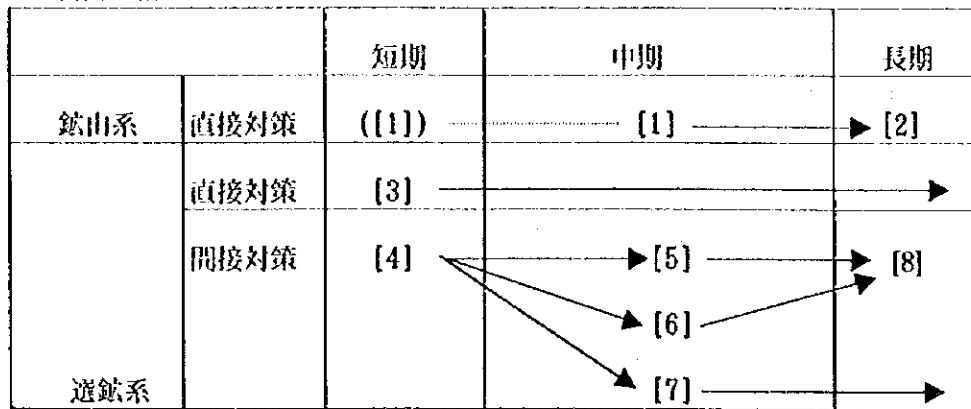
鉱害防止計画のために取るべき対策としては、下記項目があげられる。

- 選鉱尾鉱の河川放流防止
- インヘニオの工程改善検討、
- 坑内湧水、廃石堆積場浸透水の坑廃水処理、
- 教育・啓蒙・人材育成計画
- 選鉱尾鉱の廃滓堆積場での処理及び排水処理、
- 技術協力支援の受け入れ、
- インヘニオ尾鉱からの錫回収選鉱場の導入、
- モデル選鉱場の導入、
- 廃石、スークからの有価金属の回収、
- モニタリングシステムの完備
- インテグレイト選鉱場の建設
- 環境・保安研究センターの設立、

6-1-2 鉱害防止計画基本フロー

6-1 項で示した各対策項目の内、鉱害防止計画の実行に関する基本フローを下図に示す。

鉛害防止計画基本フロー



凡例：

- [1]：坑内湧水、廃石堆積場浸透水の坑廃水処理、
- [2]：廃石堆積場、旧尾鉛堆積場の緑化、
- [3]：選鉛尾鉛の廃滓堆積場での処理及び排水処理、
- [4]：インヘニオの工程改善検討、
- [5]：インヘニオ尾鉛からの鉛回収選鉛場の導入、
- [6]：モデル選鉛場の導入、
- [7]：廃石、スークからの有価金属の回収、
- [8]：インテグレイト選鉛場の建設

以上、汚染のメカニズム及び鉛害防止対策を図-9 に示す。

6-2 環境管理計画

環境管理計画で今後実施しなければならない施策を下記に示す。

- ① 汚染状況の把握を継続的に行う為のモニタリングシステムの構築。
- ② 汚染対策を強力に推し進めるための汚染物排出を管理するための合理的な行政上の法、規則の整備。
- ③ 行政、産業及び住民の個別及び全員による環境保護のための組織作り。
- ④ 住民全員が汚染対策管理に参加できる分かり易い環境指標の制定。
- ⑤ 啓蒙・教育・人材の育成。

7. 啓蒙・教育・人材育成計画

7-1 問題点

ポトシ県鉱山セクターの環境汚染に関する問題点として、下記の点が上げられる。

- ① 住民の認識に鉱害が深刻に受け止められていない。
- ② 鉱山及びインヘニオのオーナーに鉱害防止に関する認識が薄い。
- ③ 鉱山及びインヘニオのオーナーは生産を優先せざるを得ず、鉱害防止に配慮するゆとりがない。
- ④ 行政機関に、環境管理組織・体制の整備が不十分なため、環境管理及びモニタリングが系統的に行えない。
- ⑤ 環境行政の力が不十分である。
- ⑥ 環境管理の技術及び経験がない。
- ⑦ モニタリング技術（ハードを含む）が不十分である。

7-2 啓蒙・教育・人材育成計画

7-1 節で示した問題点を克服するためには、下記に示す関係機関の担当者たちに鉱害、鉱害防止ならびに環境保全の重要性に関して十分なる認識を持ってもらうことから始める必要がある。

さらに、これらの計画を地道に長期にわたって、対象の裾野を広げる方向で継続実施する必要がある。

- ① 持続開発計画省 (MDSP)・持続開発環境準省 (VMDSMA) 環境行政担当者
- ② ポトシ県持続開発環境局 (DDSMA) 環境行政担当者
- ③ ポトシ市環境課 環境行政担当者
- ④ トーマスフリアス自治大学 (UATF) 鉱山学部、化学部 教授、講師陣
- ⑤ 鉱山会社のオーナー、技師、組合の幹部
- ⑥ インヘニオのオーナー、技師、組合の幹部
- ⑦ NGO 組織代表者
- ⑧ その他、他県の環境関係機関の代表者

8. 財務・経済分析

8-1 財務分析

既存インヘニオにおける工程改善 (A)、尾鉱再選鉱プラントの建設 (B) 及びインテグレート選鉱場の建設 (C) の 3 ケースについて、“With” ケース及び“Without” ケースで比較した。

プロジェクトケースの内訳

ケース	プロジェクトケース	計画時期
A	既存インヘニオにおける工程改善	短期
B	尾鉱再選鉱プラントの建設	中期
C	インテグレート選鉱プラントの建設	長期

財務内部収益率の結果

(単位：%)

FIRR	ケース A	ケース B	ケース C
税引前	46.72	0.22	14.26
税引後	36.66	0.22	12.59

8-2 経済分析

8-2-1 農業部門の機会損失の算出

農業部門の機会損失額算出のための関連データ及び、計算結果を下表に示す。

	ポトシ県	チエキサカ県
(1) ビルコマヨ川広域		
-耕作地 (10 ³ ha)	116	149
-全国との農業生産差額 (Bs/ha)	370	431
-ビルコマヨ川広域耕作地 (10 ³ ha)	42.2	89.1
-機会損失額 (10 ³ Bs, 1993)	15,623	38,669
-機会損失額 (10 ³ \$, 1993)	3,659	9,056
-機会損失額 (10 ³ \$, 1998)	4,240	10,496
-正味機会損失額 (10 ³ \$, 1998) (寄与率)	1,060 (25%)	1,312 (12.5%)
(2) ビルコマヨ川限定流域		
-既存農耕地 (ha)	1,537 (81%)	3,246 (81%)
-農業化可能地 (ha)	361 (19%)	761 (19%)
流域合計	1,898 (100%)	4,007 (100%)
-機会損失額 (1993)		
-既存分 (10 ³ Bs)	569	1,409
-新規分 (10 ³ Bs)	622	1,311
-損失合計 (10 ³ Bs)	1,191	2,720
-機会損失額 (10 ³ \$, 1993)	279	637
-機会損失額 (10 ³ \$, 1998)	323	738
-正味機会損失額 (10 ³ \$, 1998) (寄与率)	162 (50%)	185 (25%)

8.2.2 牧畜業部門の機会損失の算出

牧畜業部門の機会損失額算出のための関連データ及び、計算結果を下表に示す。

(1) ビルコマヨ川広域	ポトシ県	チュキサカ県	タリファ県
-年間牧畜生産額 (10 ³ Bs, 1993)	33,807	95,901	59,526
-流域面積 (10 ³ km ²)	13.0 (36.4%)	30.8 (59.8%)	21.6 (65.4%)
非汚染流域	21.5 (18.2%)	15.1 (29.9%)	12.3 (32.7%)
汚染流域 (生産性 1/2 とする)	21.5 (18.2%)	15.1 (29.9%)	12.3 (32.7%)
-流域外面積 (10 ³ km ²)	75.2 (63.6%)	20.7 (40.2%)	13.0 (31.6%)
-想定牧畜可能面積 (10 ³ km ²)	96.7 (81.8%)	36.1 (70.1%)	25.3 (67.3%)
-平均牧畜生産額 (Bs/km ²)	350	2,657	2,353
-機会損失額 (10 ³ Bs, 1993)	7,525	40,918	28,912
-機会損失額 (10 ³ \$, 1993)	1,762	9,583	6,778
-機会損失額 (10 ³ \$, 1998)	2,042	11,107	7,856
-正味機会損失額 (10 ³ \$, 1998)	511 (25%)	1,388 (12.5%)	982 (12.5%)
(寄与率)			
(2) ビルコマヨ川限定流域			
-汚染流域 (10 ³ km ²)	4.30	3.08	2.46
1)の20%とする			
-平均牧畜生産額 (Bs/km ²)	350	2,657	2,353
-機会損失額 (10 ³ Bs, 1993)	1,505	8,181	5,788
-機会損失額 (10 ³ \$, 1993)	352	1,917	1,356
-機会損失額 (10 ³ \$, 1998)	408	2,221	1,571
-正味機会損失額 (10 ³ \$, 1998)	201 (50%)	555 (25%)	393 (25%)
(寄与率)			

8-2-3 基本ケース：水質改善が完全に達成された場合の結果

基本ケース（水質改善が完全に達成された場合の結果）に関して、インテグレイト選鉱場（C）、ポトシ県広域（D-1）、ポトシ県限定流域（D-2）、全県広域（E-1）及び全県限定流域（E-2）の5ケースに解析した結果を下表に示す。

経済的内部収益率（EIRR）の内訳

（単位：％）

プロジェクトケース	総合ケース (EIRR 1)	単独ケース (EIRR 2)
C インテグレートプラント	14.26	—
D-1 ポトシ県広域	13.83	11.42
D-2 ポトシ県限定流域	11.79	Negative
E-1 全県広域	19.29	18.77
E-2 全県限定流域	13.69	9.12

C ケースは財務分析で使用したインテグレイト選鉱場であることの注意願う。

総合ケースとは、各プロジェクトがインテグレイト選鉱場を含む場合で、単独ケースとは、

いずれのプロジェクトともインテグレート選鉱場を含まない場合である。

単独ケースの場合は、D-2 ケースでは、フィージブルではなく、D-1 ケースでは 11%以上の結果を得ている。E-1 の結果は、ポトシ県全域で効果があることを示している。

総合ケースでは、もっとも低い D-2 ケースでも、11%以上を示し、県広域 (D-1) の場合でも C ケースを僅かに下回る程度である。

9. 今後の施策に向けての提言とその効果

9-1 今後の施策に向けての提言

調査・解析の結果、本調査団は、ポトシ県鉱山セクターの環境汚染を改善するために実施すべき項目として、下記に示す 12 の施策を提言した。これらの提言は、緊急性、実現性、効果の持続性等を配慮して、短期間で実施すべき項目、中期に実施すべき項目並びに長期間に亘って実施すべき項目に分類した。(表-1 及び表-2 参照)

9-1-1 緊急(短期)に実施すべき事項

- インヘニオ(選鉱)尾鉱の河川放流停止：①
- インヘニオ(選鉱)の工程改善：②
- モニタリング体制の整備：③
- 啓蒙・教育・人材育成：④

9-1-2 中期的に実施すべき事項

(1) 中期の前半で実施すべき事項

- 酸性水処理対策：⑤
- 環境管理体制の整備、排出基準・罰則の整備：⑥
- 旧廃滓堆積場の覆土植栽：⑧
- 啓蒙・教育・人材育成：④

(2) 中期の後半で実施されるべき事項

- 尾鉱再処理プラントの導入並びに排水リサイクル設備導入：⑨

9-1-3 長期的に実施すべき事項

- 廃滓の坑内充填：⑨
- インテグレート選鉱場の設置、廃石(デスマンテ)、スークからの銀回収プラントの設置：⑩

- ・ ビルコマヨ川水系モニタリングシステムの構築
- ・ 啓蒙・教育・人材育成：⑫

9-1-4 環境・保安研究センターの設立

上記①から⑫の施策を、相互に関連づけて効率良く、不足の調査を追加実施しながら、しかも、教育・啓蒙を含めシステマティックに実施するために必要不可欠な施策が「環境・保安研究センター」の設立である。

9-2 提言諸施策実施による改善効果

上記施策の実施が完了した時点での改善効果をカドミウム (Cd) を例に説明する。

(図-10 参照)

現在、タラバヤ川水系には年間 36 トンの Cd 負荷量が存在する。本調査結果に基づく提言の全施策が実現した場合、この Cd 負荷量を年間 4 トンにまで減少させることができる (89%削減)。

他の重金属に関しても同様の効果が期待できる。また、pH は中性域に、SS はほとんど 0 (環境基準値以下) に改善されることが予測される。

謝辞

1997年9月に開始した本調査も1999年10月に終了する。その間、25ヶ月間に亘る調査結果、下記項目を調査解析し、短期、中期及び長期に実施すべき環境保全策を提案した。

中でも、環境・保安研究センターの設立を要に、最終的にはインテグレイト選鉱場をDCSA上部に設置し、42のインヘニオを統合移設する形にする提案を策定した。

この2点の内、前者について、その構想および目的を表-1、表-2に示した。後者は日本を含む諸外国の技術並びに資金援助が必要であることを提言した。

さらに、その間、短期、中期、長期に亘って実施すべき12項目の環境保全・鉱害防止策を提言した。それらの項目の過半はポリヴィア側で実施できるし、また、実施すべき事項としている。

最後に、25ヶ月に亘って本調査に非常に協力的で、暖かい援助を行ってくれたC/P、持続開発計画省並びに持続開発環境準省、ポトシ県環境局の関係者、UATFの関係者、鉱山組合のスタッフ並びに鉱山のオーナー、インヘニオ協会並びにオーナー、技術協力を実施中の諸外国の専門家、NGOのメンバー及びポトシ市の住民の方々に調査団員一同心から感謝するものである。

なお、本報告書の作成に当たり、調査団は、JICAの本プロジェクトの担当である永田課長、千葉課長代理、小早川担当ならびに、廃水処理の専門家である水口技術専門職から数度に亘り御指導を頂いた。本報告書が現在の形に仕上がったのはひとえにこれら担当者御一同の御指導のたまものであることを付け加える。

表 - 1 今後の施策に向けての提言

	提 言	短期(~2年未満)	中期(2年以上~5年未満)	長期(5年以上~)
1. 鉱害防止計画	①インヘニオ選鉱尾鉱の河川放流防止			→
	②インヘニオ工程改善			→
	③酸性水処理対策			→
	④旧堆積場覆土・緑化			→
	⑤尾鉱再処理プラント導入			→
	⑥インテグレイト選鉱場設置			→
2. 環境管理計画	⑦廃石・スークより有価金属回収			→
	⑧モニタリング組織・体制、モニタリングシステム整備			→
	⑨法・基準整備、環境管理体制(システム)整備、環境法整備			→
3. 環境・保安研究センター	⑩ビルコマヨ川水系モニタリングシステム構築			→
	⑪啓蒙、教育環境整備、人材育成(指導者育成)			→
	⑫環境・保安研究センター設置: 上記⑪を実施			→
	⑬実施事項			
	⑭鉱害防止計画	①鉱害防止1(選鉱尾鉱処理)及び水リサイクル技術検討、財務検討	①同左及びフォローアップ	①同左
		②選鉱1(鉱石処理: 摩砕、浮選)技術検討、財務検討	②同左及びフォローアップ	②同左
		③鉱害防止2(廃水処理)技術検討、財務検討	③同左及びフォローアップ	③同左
		④鉱害防止3(堆積場の緑化)技術検討、財務検討	④同左及びフォローアップ	④同左
			⑤選鉱2(錳石回収)技術検討、財務検討	⑤同左及びフォローアップ
			⑥選鉱3(トータルシステム)技術検討、財務検討、インヘニオ統合・整備	⑥同左及びフォローアップ
			⑦選鉱4(廃石等処理)技術検討、財務検討	⑦同左及びフォローアップ
	⑮環境管理計画	⑧必要最小限調査項目のモニタリング・分析・シミュレーション技術導入	⑧必須項目のモニタリング・分析・汚染被害シミュレーション技術、モニタリング体制整備関連人材育成技術蓄積	⑧全規制項目のモニタリング・分析・モニタリング・分析・シミュレーション技術蓄積改善
		⑨[法・規則]法・規制間の内容の整合性と、現地事情と法・規制の整合性検討; 地域特有事情データ蓄積 [環境保護組織]国と県、市の行政組織 整備: 関係行政官庁・国県レベルでの連携強化、行政による環境白書作成、審議会活動への知識人・教育者等の参加 [環境指標]行政準備: 最低指標の研究と提言 [啓蒙・教育・人材]環境指導者確保: 環境保護の意義と必要性の普及	⑨[法・規則]法・規制内容の実行性確保、法・規制・条例等の基礎情報蓄積; 地域特有事情考慮の始と鞭を含む条例提案 [環境保護組織]環境改善のための住民組織化: 住民の環境問題理解強化に学校・教会活用、環境白書作成への住民参加 [環境指標]住民参加による指標作り: 指標の使い方と、作り方の技術蓄積 [啓蒙・教育・人材]中心シンボリック指導者確保、指導者全員の教育: 住民への環境教育の技術・システムの整備	⑨[法・規則]法・規制・条例の変化する現状への再整合性確保; 広域モニタリング体制整備と地域人材確保 [環境保護組織]住民組織の定期的見直しと改善: 清潔で健康的な町作りへの住民活動の積極的活用 [環境指標]行政と住民による指標の定期的見直しと改善 [啓蒙・教育・人材]環境教育の指導的センターの継続的確保: 環境改善対策事業普及のための環境管理技術紹介
		⑩ビルコマヨ川水系汚染被害データ蓄積	⑩ビルコマヨ川水系汚染被害状況をシミュレーションモデル式により確認	⑩ビルコマヨ川水系汚染被害対策の効果をシミュレーションモデル式に反映評価

注)*: 啓蒙、教育環境整備、人材育成に係る必要人材(環境、鉱山、選鉱に係る調査、試験(バッチ及び連続)研究、分析等)整備を同時に行う。又、人材育成(指導者育成)は、人員の確保も併せ行う。

表 1-2 ポトシ市における汚染の美観と対策

発生源	発生原因	メカニズム	水質汚染物質	流量	Cd流出量	Cd流出形態	pH	対策表6-4-1参照
1 選鉱場	尾鉱、排水	未分離金属 選鉱試薬等	金属含有泥質 試薬類とアルカリ	6,000ton/day*1 69lit/sec	81kg/day*2 (29.6t/year)	SS	11~12	2. 工程改善 1. 尾鉱ダム(KfW事業) 3. 環境関連分析設備 3. モニタリング設備 6. 環境・保安センター 9. 尾鉱再処理 11. インテグレート選鉱場
2 鉱山坑口	降雨、浸透水	酸の生成 金属の抽出	溶解重金属 酸性水	777ton/day*3 9lit/sec	7.8kg/day*4 (含率10mg/lit) (2.8t/year)	イオン	1~2	5. 酸性排水対策 1. 尾鉱ダム(KfW事業) 3. 環境関連分析設備 3. モニタリング設備 6. 環境・保安センター
3-1 廃石、すり	降雨	酸の生成 金属の抽出	溶解重金属 酸性水	乾季: 4.320ton/day*5 50lit/sec	9.5kg/day*6 (含率2.2mg/lit)	イオン	2~3	5. 酸性排水対策 8. 覆土・緑化 10. 廃滓坑内充填 1. 尾鉱ダム(KfW事業) 3. 環境関連分析設備 3. モニタリング設備 6. 環境・保安センター 11. 廃石・金属回収
3-2 旧尾鉱堆積場 (錫の比重選鉱)	降雨	酸の生成 金属の抽出	溶解重金属 酸性水	雨季: 間欠大量	(3.5t/year)			
3-3 旧尾鉱堆積場 (鉛、亜鉛浮鉱)	降雨	アルカリの生成	重金属の残存 アルカリ性水					
4 住民	市民生活	生活排水 廃棄物	有機物、大腸菌 アンモニア、他	13,478ton/day 156lit/sec				x. 排水処理施設(KfW)
合計 (San Antonio付近)					98.3kg/day*7 (含率2.51mg/lit) (35.9t/year)	SS主体	6~12	
環境基準					(含率0.005mg/lit)			

- *1 6,000ton/day=1,200ton/day(選鉱処理量)x5 (係数)
- *2 81kg/day=1,200ton/dayx3/4(原鉱に対する尾鉱比率)
- *3 777ton/day=9lit/secx60(sec/min)x60(min/hour)x24hours
- *4 7.8kg/day=10mg/litx777,600lit/day
- *5 4.320ton/day=50lit/secx60x60x24
- *6 9.5kg/day=2.2mg/litx4,320,000lit/day
- *7 98.3kg/day=2.51mg/litx39,130,000lit/day

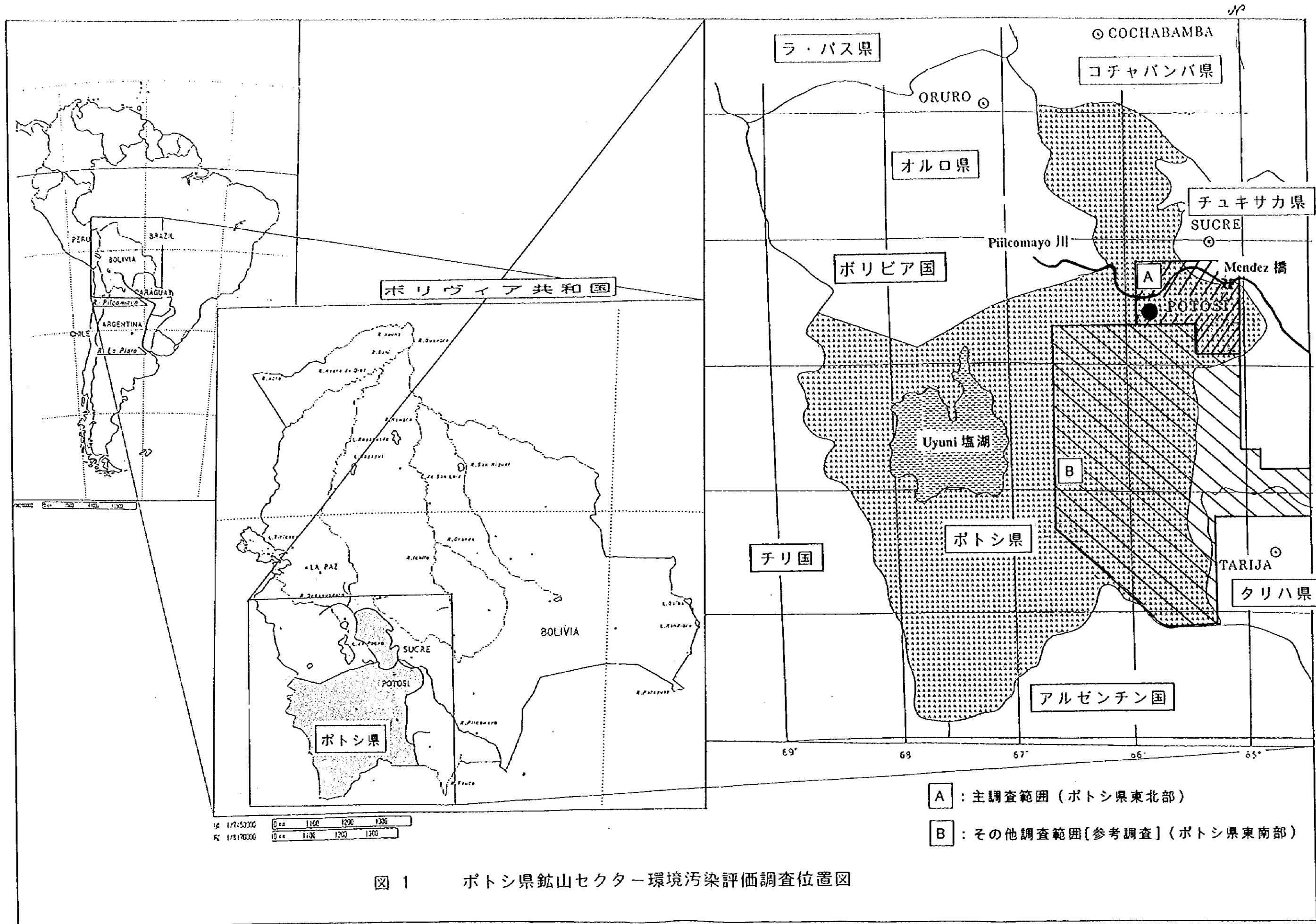


図 1 ポトシ県鉱山セクター環境汚染評価調査位置図

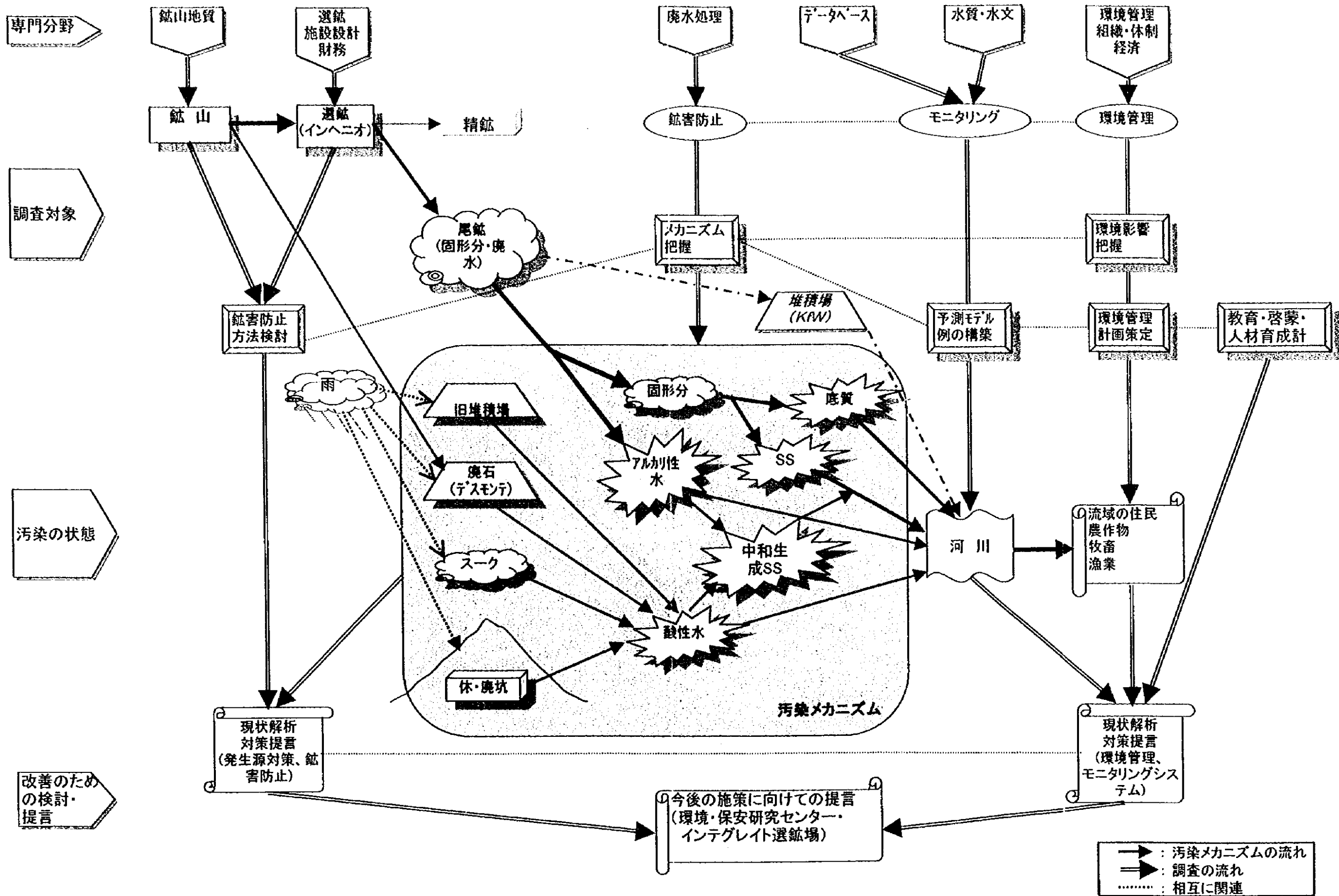


図-2 調査概念図
 (ポリヴィア国ポトシ県鉱山セクター環境汚染評価調査)

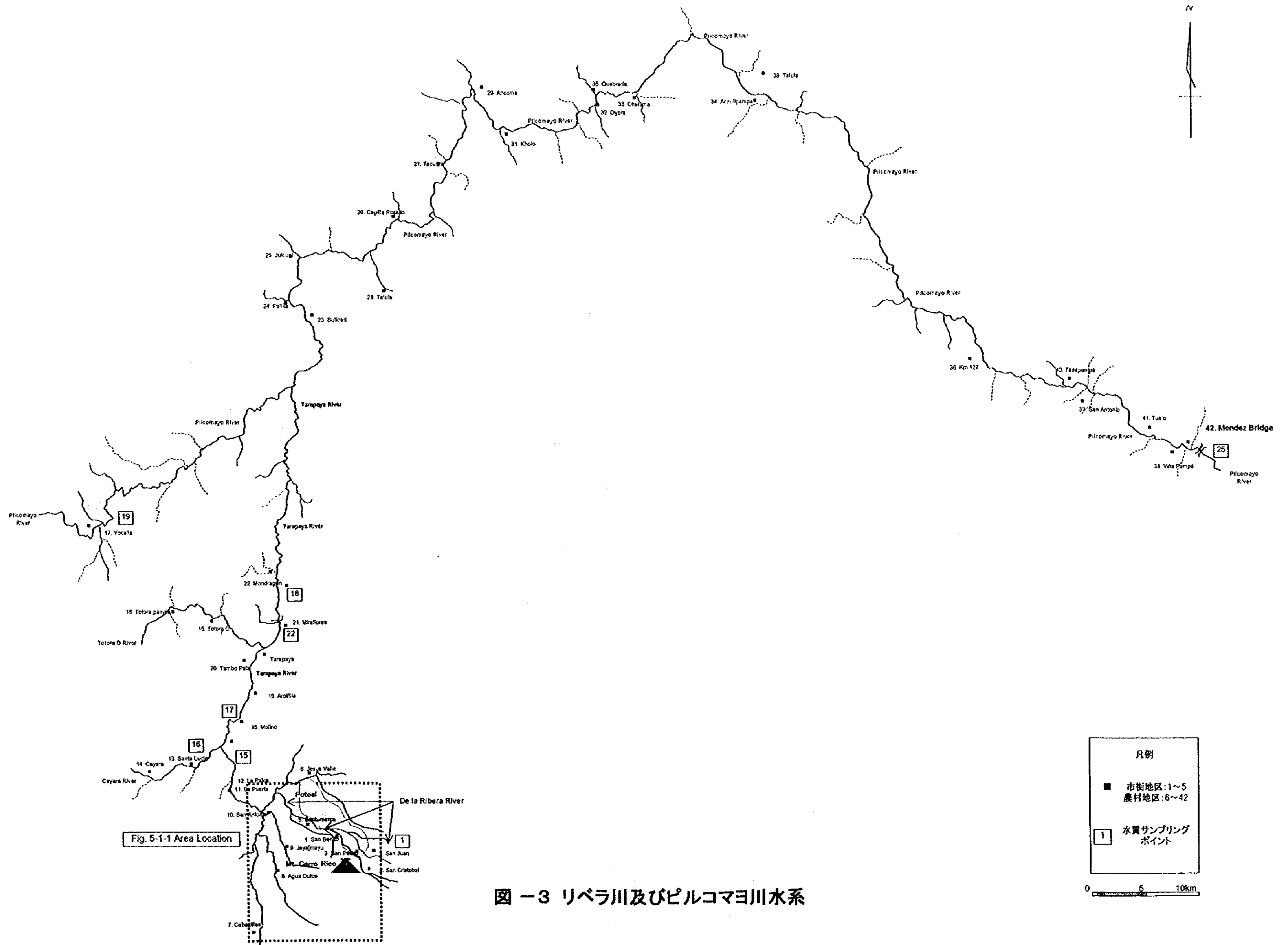


Fig. 5-1-1 Area Location

図 - 3 リベラ川及びピルコマヨ川水系

凡例

- 市街地区: 1~5
- 農村地区: 6~42
- 1 水質サンプリングポイント

0 5 10km

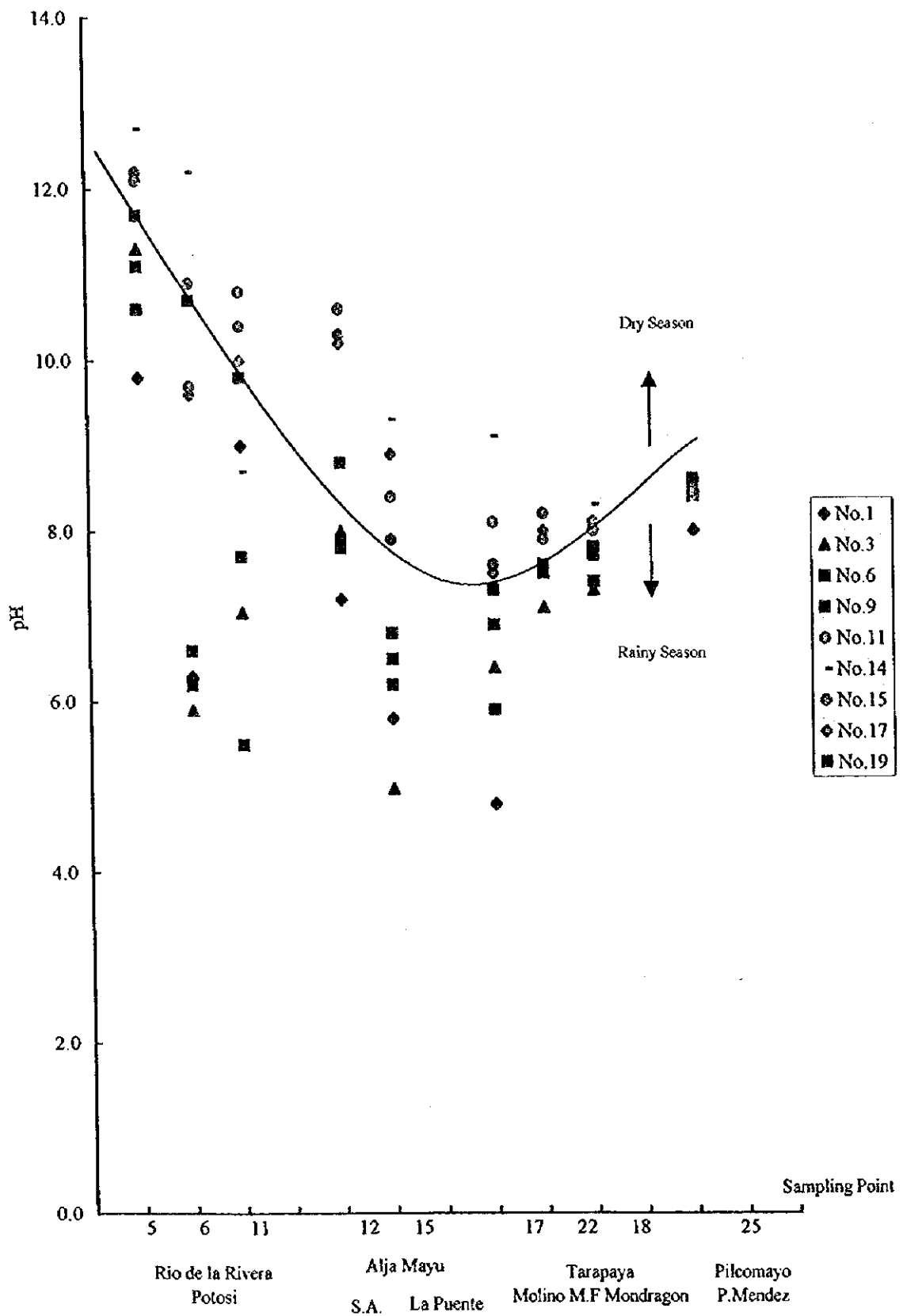


図-4 ラ・リベラ川ータラパヤ川ーピルコマヨ川のpH変化

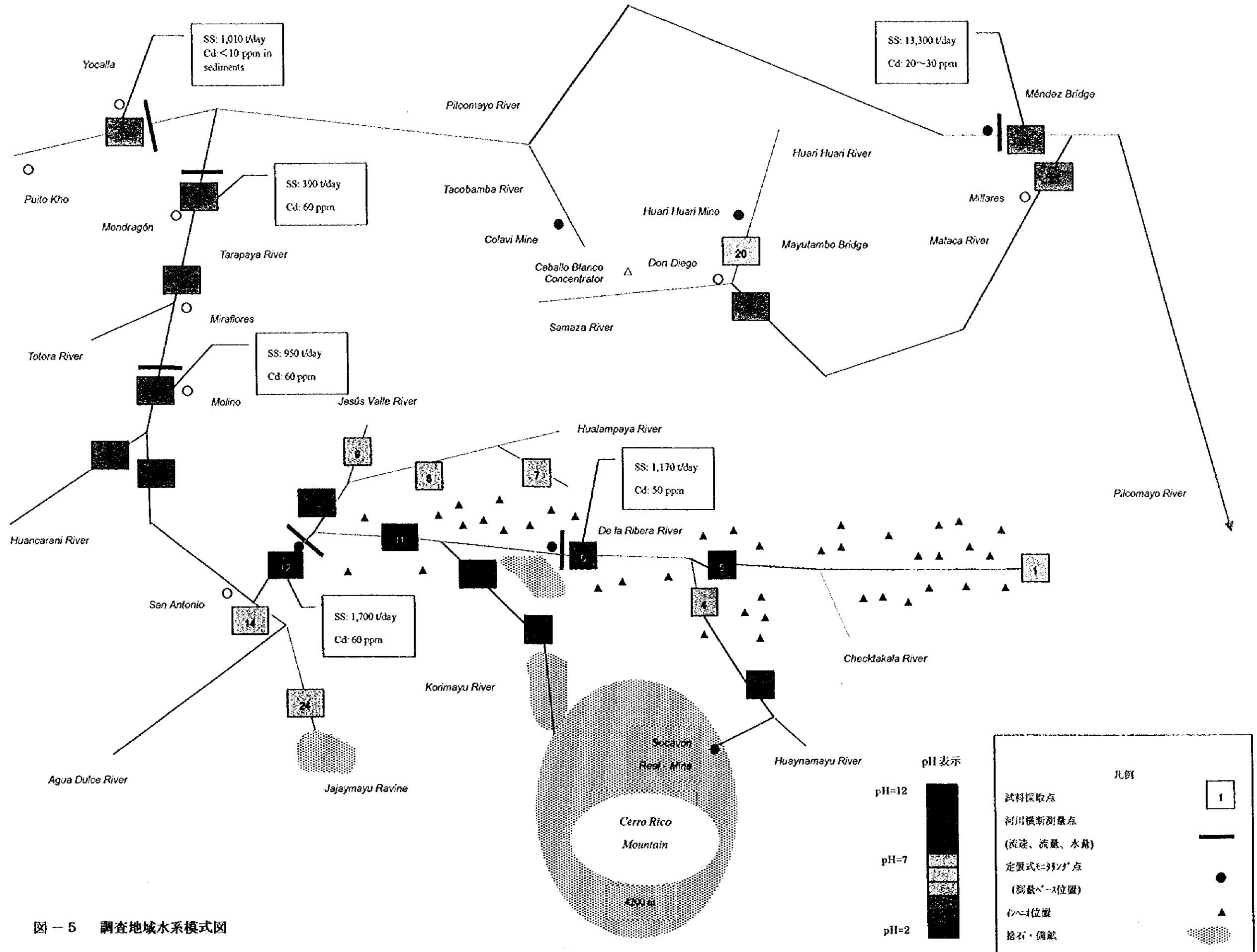


図 - 5 調査地域水系模式図

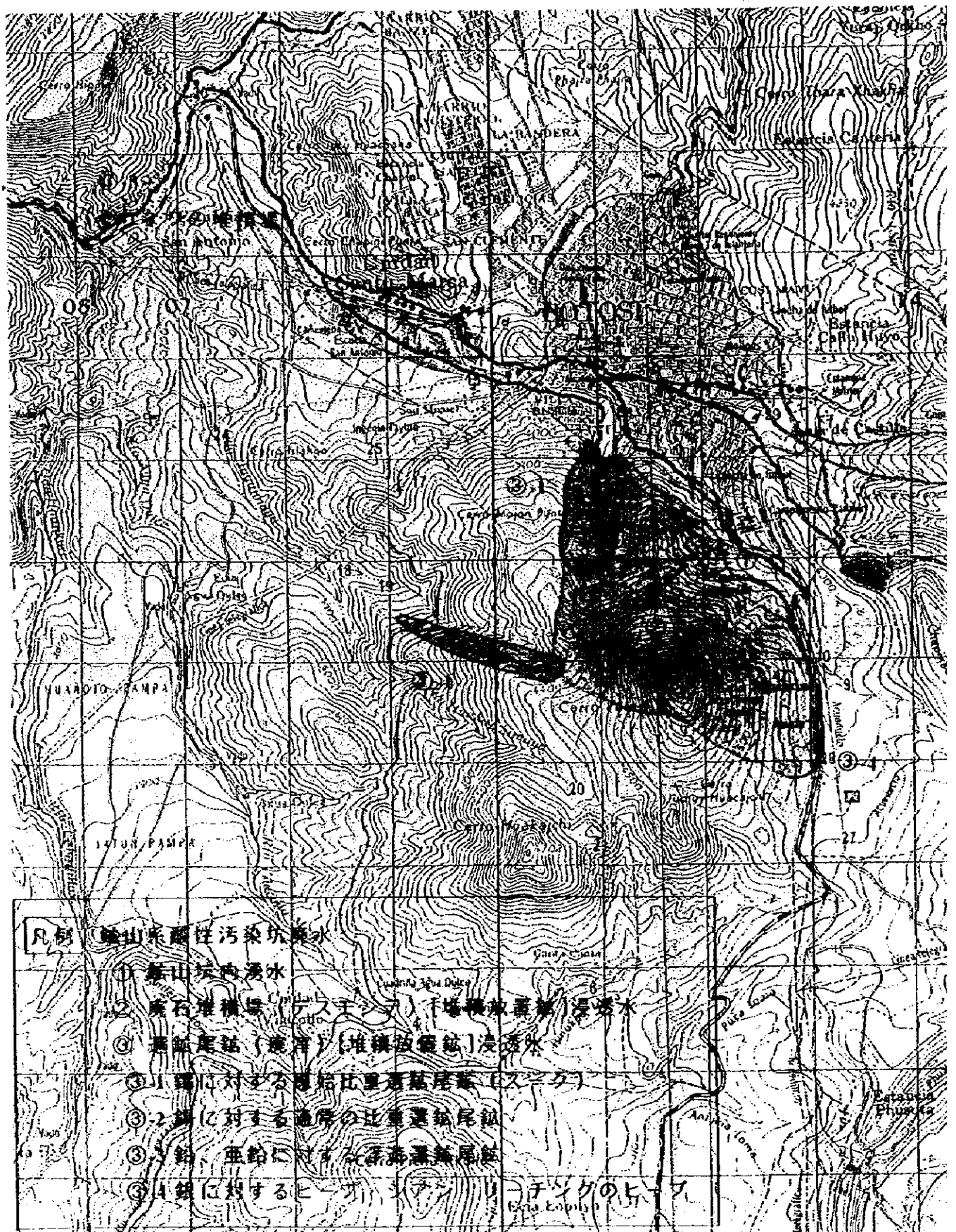
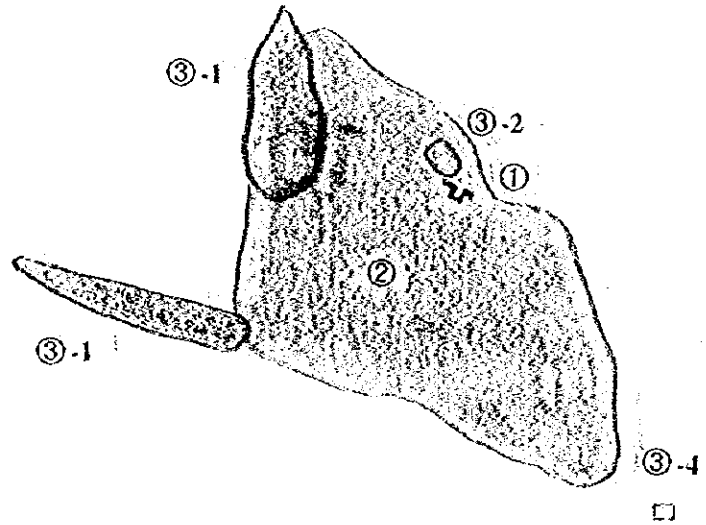


図 - 6 試料採取地点

③-3
 (それなりの堆積場)



③-2
 (一部③-3)



凡例

鉱山系酸性汚染坑廃水

- ① 鉱山坑内湧水
- ② 廃石堆積場(デスモンテ) [堆積放置鉱] 浸透水
- ③ 選鉱尾鉱(廃滓) [堆積放置鉱] 浸透水
 - ③-1 錫に対する原始比重選鉱尾鉱(スーク)
 - ③-2 錫に対する通常の比重選鉱尾鉱
 - ③-3 鉛、亜鉛に対する浮遊選鉱尾鉱
 - ③-4 銀に対するヒーブ・シアン・リーチングのヒーブ

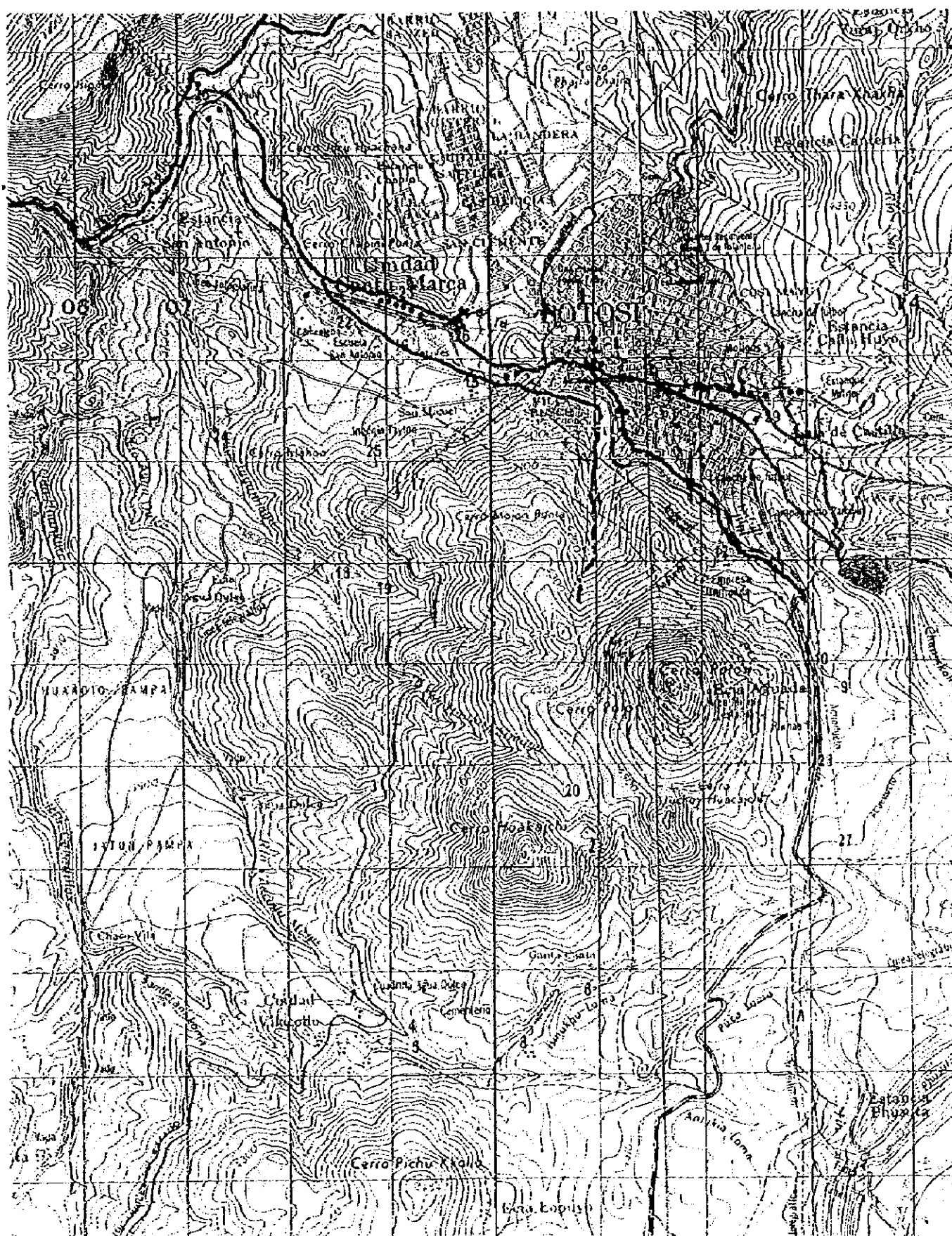


图 - 6 試料採取地点

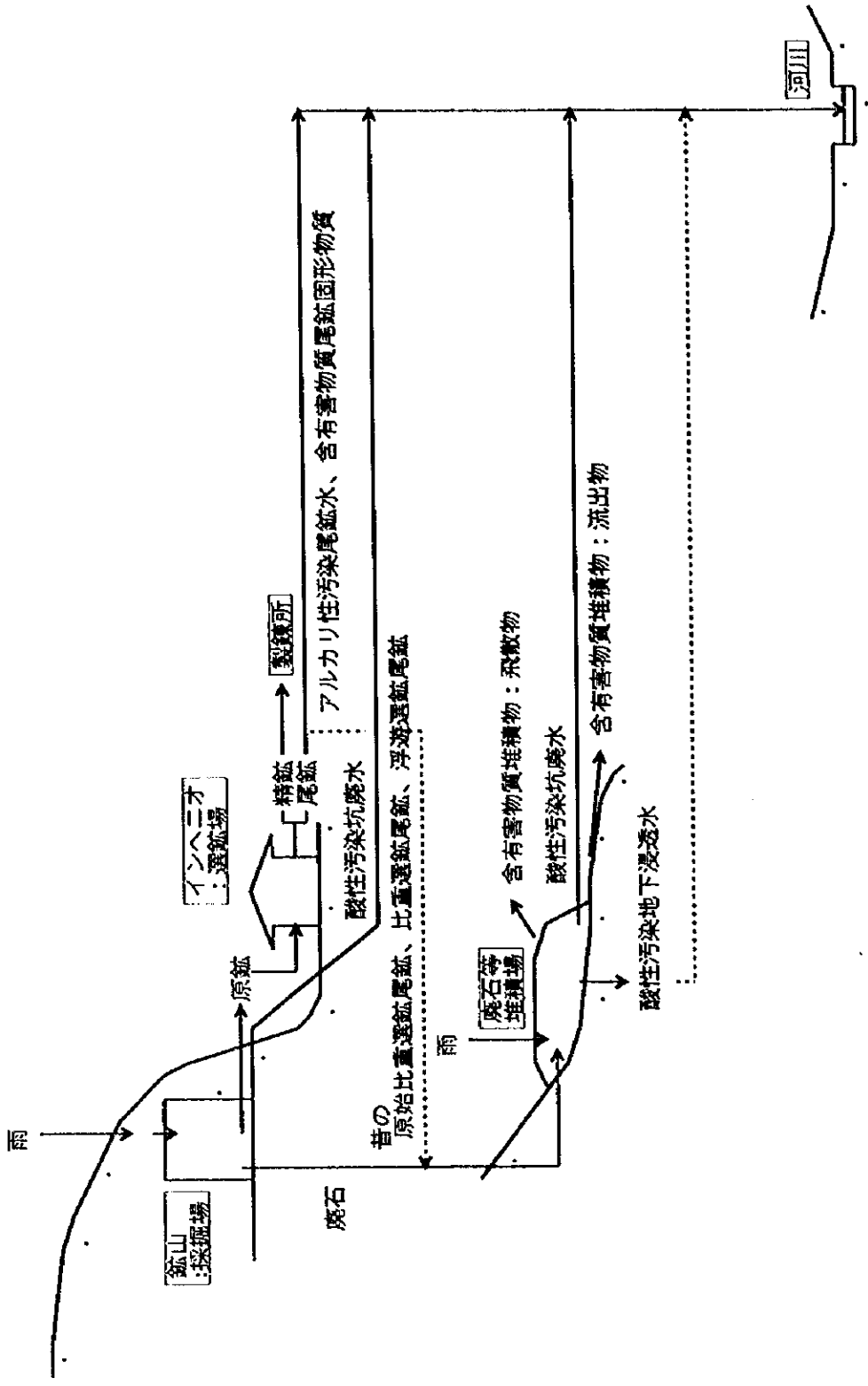


図-7 ポトシ地域における汚染メカニズム(概念) [現在]
 : 鉱山系及び選鉱系に係る有害物質による河川他汚染概念

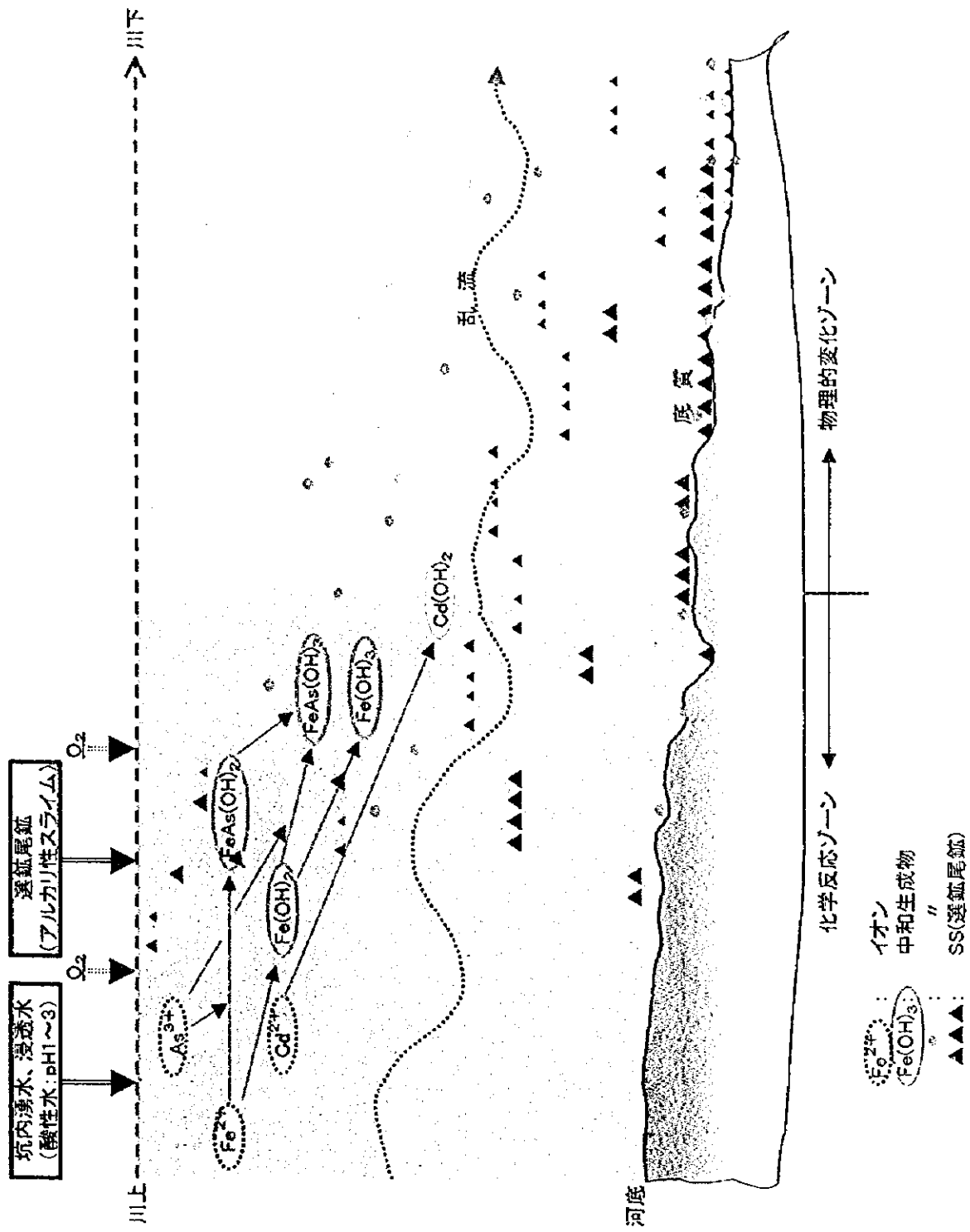
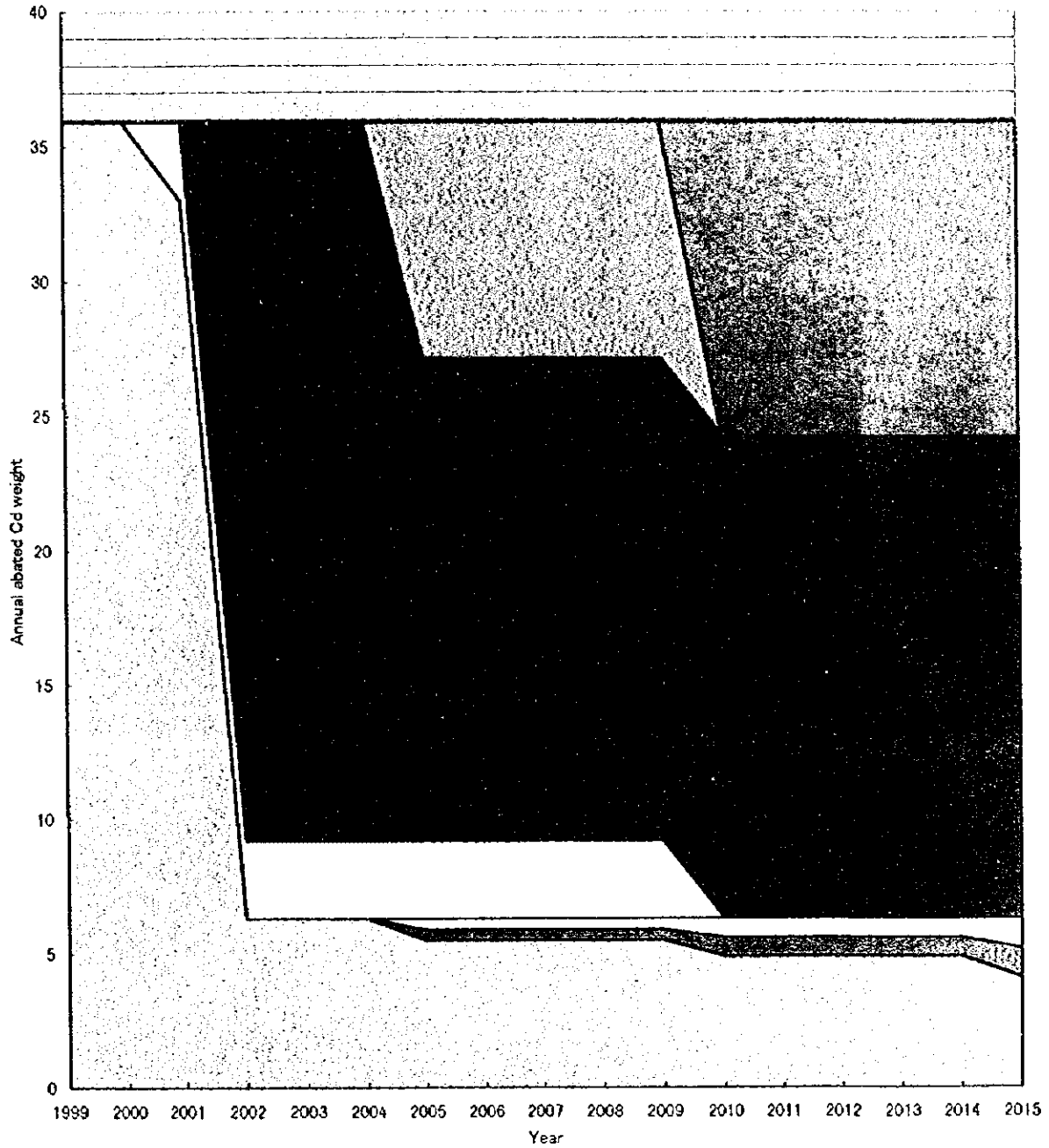


図 - 8 水質汚濁のメカニズム

図 -- 10 水質汚濁対策による効果予想
(Cd汚染負荷の変化)



- Annual abatement volume of Cd by Integrated Plan (M. of I. and T.T.P.)
- Annual abatement volume of Cd by Tailing Treatment Plant (2005year: 8.8t)
- Annual abatement volume of Cd by DCSA (2002year: 26.7t 2005year: 17.9t)
- Annual abatement volume of Cd by Modernization of Ingenio (2.9t)
- Annual abatement volume of Cd from Main Acid Water Drainage (2.8t)
- Annual abatement volume of Cd from Waste Rock & Tailing Drainage (3.5t)
- Cd annual abatement volume (t), (Total Cd annual production volume: 35.9t)

JICA