

第II編 技術調査

A. 現在の汚染問題

A-I. ボタ山調査

1. データベース

01. サンタカタリーナ州の鉱害状況の理解のために殆どのボタ山を調査し、その全てをデータベースに取めた。それらは FATMA と DNPM の事務所で利用可能である。ボタ山の集計に用いたパラメーターは以下の通りである。

02. **Rank : Rank** (地図、航空写真、その他) は精度及び調査資料を表す。

- map : JICA 作成地図 (1:20,000) 範囲内のボタ山
- acrophotography : JICA 作成地図の範囲外で、JICA 作成航空写真(1:30,000)の範囲内のボタ山
- others : JICA 作成の航空写真範囲外で、DNPM の古い航空写真、FUCRI からの情報、現地調査などによるボタ山。

03. **Waste Type : Waste Type** (黒ボタ、白ボタ、水) はボタの種類を表す。

- black shale : 黒ボタは選炭後の廃棄物で、再選炭可能なボタ、再選炭不可能なボタ、粉炭。
- white waste : 露天掘削土
- water : 酸性汚染水

04. **Topo Type : Topo Type** (平坦、斜面、山状堆積、鋸状、池、道路及び河岸) は、ボタ山の形状及び堆積状況を表す。

- flat : 平坦地に撒き散らされたもの
- slope : 斜面に撒き散らされたもの
- heap : 積み重ねられたボタ
- saw : ドラグラインによる採掘後の剥土
- pond : 残壁際の酸性水池
- road : 選炭ボタで表面カバーされた道路

・ river bank : 河岸に放棄された黒ボタ

05. Area Type: Area Type (山頂、山岳地帯、平坦地、川沿)は、堆積ボタの周辺の地形的状況を表す。

06. 地域名、市、川、主要河川などのその他のパラメーターはボタ山の地域、鉱害発生者、現土地所有者、操業種類(採掘、選炭、コークス製造)、操業形態(操業、休止、廃棄)、ボタ山面積(ha)及びボタ体積(1,000m³)を表す。

07. 面積(ha)の推定及び体積(m³)の推定: JICA 地図又は航空写真上に囲まれたボタ山はプランニメーターで面積計測した。計測された実質上の荒廃された面積は、許可範囲を超えてボタが捨てられて、荒廃されたものと思われ、DNPM より許可された露天採掘の面積より大きい。

⇒ Black reject : Fiorita 及び Rio Rocinha の FS サイトのボタの総量は FS サイトの詳細地図 (1:1,000)を使用し、断面積算法で推定した。その他の地域のボタは、表 A-1 に示す 1925 年から 1994 年における原炭生産量と平均歩留まりから推定した選炭ボタを面積で比例配分した。

⇒ Overburden Waste: 露天掘削土の総量は、鉱山会社から DNPM に報告された掘削土量を採用した。

2. ボタの概要

08. 地下水源図¹、ボタ山位置図とともに、ボタ山調査の概要は表 A-2~A-5 及び図 A-1~A-2 にまとめた。

¹ 出典 : Projeto Gerenciamento Costeiro do Estado de Santa Catarina

表 A-1
ブラジルの原炭生産

(UNIT: 1,000 metric tons)

Year	Santa Catarina	Rio Grande do Sul	Parana	San Paulo	Total	Yield (%)
1925 *	85	307	-	-	392	(60.0)
1930 *	46	336	3	-	385	(60.0)
1935 *	151	689	-	-	840	(60.0)
1940 *	266	1,065	3	2	1,336	(60.0)
1945 *	816	1,140	98	19	2,073	(60.0)
1950 *	1,005	855	99	-	1,959	(60.0)
1955 *	1,326	948	75	-	2,349	(60.0)
1960 *	1,439	646	75	-	2,160	(60.0)
1965	2,240	904	227	-	3,371	(60.0)
1966	2,462	731	187	-	3,380	58.2
1967	3,097	926	316	-	4,339	52.9
1968	3,490	996	343	-	4,829	49.0
1969	3,707	1,006	415	-	5,128	47.5
1970	3,845	965	362	-	5,172	45.6
1971	4,364	956	346	-	5,666	44.1
1972	4,536	978	345	-	5,859	42.6
1973	4,314	931	321	-	5,566	40.4
1974 **	4,257	919	317	-	5,492	57.3
1975	5,132	909	268	-	6,309	43.1
1976	6,635	956	285	-	7,876	42.3
1977	8,430	1,329	286	-	10,045	38.9
1978	9,591	1,907	318	-	11,816	37.6
1979	11,638	1,978	327	-	13,943	35.1
1980	13,212	2,529	309	-	16,051	30.6
1981	14,734	2,871	297	-	17,901	32.4
1982	15,504	3,287	312	-	19,104	34.3
1983	16,209	4,724	350	-	21,283	31.8
1984	17,951	4,700	431	-	23,082	32.3
1985	19,164	4,677	466	-	24,307	31.5
1986	17,212	4,833	470	-	22,515	32.9
1987	13,911	4,377	405	-	18,693	35.5
1988	16,437	4,193	354	-	20,984	41.8
1989	13,925	3,998	273	-	18,196	42.7
1990	7,484	3,809	220	-	11,513	41.9
1991	6,684	3,463	269	-	10,416	47.1
1992	5,531	3,484	256	-	9,271	49.9
1993	6,045	3,306	273	-	9,624	47.6
1994	5,700	3,748	305	-	9,753	52.5
Total	293,111	104,321	11,417	105	408,954	41.9

Note: * Between 1925 and 1965, ROM coal production data are not available for all the years. Therefore, to amount of the total, it is assumed that productions for the years for which data are missing stayed at the same level of the previous years. For example, production for 1926, 1927, 1928 and 1929 is estimated at 392. Yields are also assumed at 60 %.

** Estimated.

表 A-2

ボタの概要

Municipality	Road (Black Reject)			Black Reject			Pond			Overburden Waste			Total		
	Length (m)	Area (ha)	Volume (1000m ³)	Area (ha)	Volume (1000m ³)	Area (ha)	Volume (1000m ³)	Area (ha)	Volume (1000m ³)	Area (ha)	Volume (1000m ³)	Area (ha)	Volume (1000m ³)	Area (ha)	Volume (1000m ³)
Capivari de Baixo				80.0	3,680	80.0						160.0	3,680		
Criciúma				996.1	45,821							1,064.6	55,959		
Forquilha				356.7	16,408	28.0						384.7	16,408		
Icara				44.8	2,061							44.8	2,061		
Lauro Muller	29,000	20.0	65	203.7	9,774	4.8						419.6	41,694		
Siderópolis	7,500	4.4	18	217.5	10,005	103.0						751.4	104,876		
Treviso	17,300	9.3	35	149.6	6,882	22.0						309.8	33,405		
Urussanga	28,500	21.2	59	246.2	11,349	10.0						633.1	75,589		
Total	82,300	54.8	177	2,294.6	105,978	247.8						2,182.4	265,702	4,779.6	371,857

表 A-3

水系別ボタ山分布

River Basin	River	Black Reject		Pond		Overburden Waste		Total	
		Area (ha)	Volume (1000m3)	Area (ha)	Volume (1000m3)	Area (ha)	Volume (1000m3)	Area (ha)	Volume (1000m3)
Rio Ararangua	Rio Albino					61.0	5,673	61.0	5,673
	Rio Criciuma	80.0	3,680					80.0	3,680
	Rio dos Porcos	44.8	2,061					44.8	2,061
	Rio Fiorita			67.0		492.6	67,604	559.6	67,604
	Rio Kutzt	151.0	6,946	16.0		103.0	16,830	270.0	23,776
	Rio Mae Luzia	149.6	6,882	22.0		231.8	19,666	403.4	26,548
	Rio Maina	208.5	9,591			43.5	6,438	252.0	16,029
	Rio Morosini			19.0		181.8	29,270	200.8	29,270
	Rio Sangao	1,026.8	47,233	28.0		10.0	1,480	1,064.8	48,713
	Sub-total	1,660.7	76,392	152.0		1,123.7	146,961	2,936.4	223,353
Rio Tubarao	Rio Amaral					18.0	2,124	18.0	2,124
	Rio Bonito	40.2	1,849					40.2	1,849
	Rio Capivaras					5.0	590	5.0	590
	Rio Carrapatos					87.0	10,266	87.0	10,266
	Rio Lageado	54.1	2,489	6.5		380.3	39,147	440.9	41,636
	Rio Malha					56.6	2,321	56.6	2,321
	Rio oratorio					54.0	6,372	54.0	6,372
	Rio Palmeiras	42.7	1,964	0.5		41.6	3,507	84.8	5,471
	Rio Rochinha	81.0	4,129	1.3		10.0	1,180	92.3	5,309
	Rio Salame			80.0		132.2	10,690	132.2	10,690
Sub-total	306.0	14,479	88.3		784.7	76,197	1,179.0	96,676	
Rio Urussanga	Rio America					7.0	1,092	7.0	1,092
	Rio Anta	50.0	2,300					50.0	2,300
	Rio Carvao	187.2	8,611	5.0		242.0	37,752	434.2	46,363
	Rio Deserto	36.7	1,688	1.5				38.2	1,688
	Rio RancoDagu	38.0	1,748			25.0	3,700	63.0	5,448
	Rio Urussanga	16.0	736					16.0	736
Sub-total	327.9	15,083	6.5		274.0	42,544	608.4	57,627	
Grand Total	2,294.6	105,955	246.8		2,182.4	265,702	4,723.8	371,657	

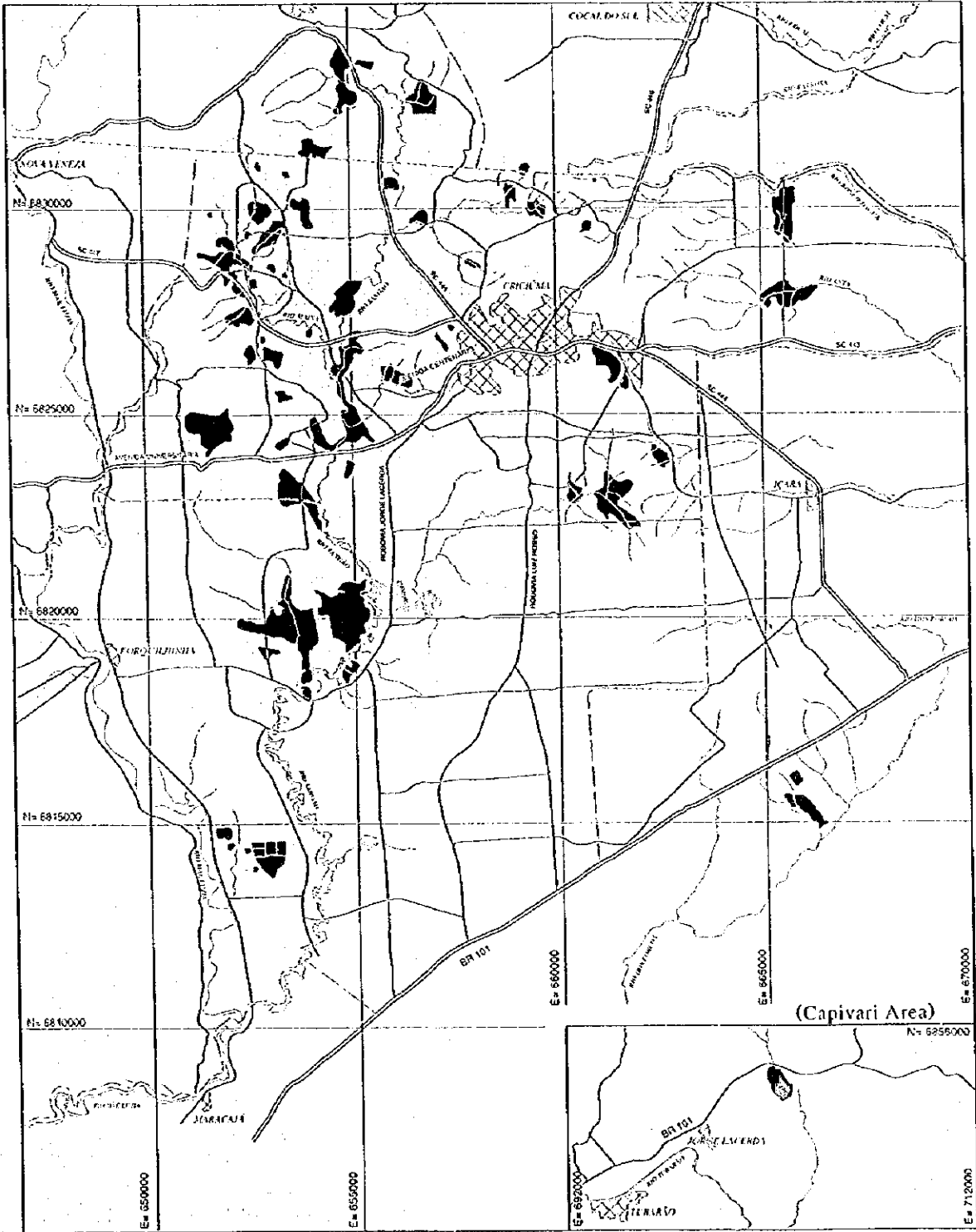
表 A-4
土地所有者及び土地状況

Unit:ha						
Municipality	Land Ownership	Numbers of Owners	Abandoned	Active	Inactive	Total
Capivari de Baixo	Private Individual	-	-	-	-	-
	Private Company	2	160.0	-	-	160.0
	CSN	-	-	-	-	-
	Public	-	-	-	-	-
	Sub-total	2	160.0	-	-	160.0
Criciama	Private Individual	12	130.2	-	-	130.2
	Private Company	13	588.5	163.0	87.0	838.5
	CSN	1	-	-	6.9	6.9
	Public	1	89.0	-	-	89.0
	Sub-total	27	807.7	163.0	93.9	1,064.6
Forquilha	Private Individual	1	17.5	-	-	17.5
	Private Company	3	8.0	219.2	-	227.2
	CSN	-	-	-	-	-
	Public	1	140.0	-	-	140.0
	Sub-total	5	165.5	219.2	-	384.7
Icara	Private Individual	-	-	-	-	-
	Private Company	1	36.0	8.8	-	44.8
	CSN	-	-	-	-	-
	Public	-	-	-	-	-
	Sub-total	1	36.0	8.8	-	44.8
Lauro Muller	Private Individual	10	178.2	8.0	-	186.2
	Private Company	8	245.0	161.3	35.6	441.9
	CSN	-	-	-	-	-
	Public	-	-	-	-	-
	Sub-total	18	423.2	169.3	35.6	628.1
Sideropolis	Private Individual	4	122.0	-	-	122.0
	Private Company	5	286.1	192.0	-	478.1
	CSN	1	359.8	-	-	359.8
	Public	1	111.0	-	-	111.0
	Sub-total	11	878.9	192	-	1,070.9
Treviso	Private Individual	1	-	110.2	-	110.2
	Private Company	4	62.8	128.8	110.6	302.2
	CSN	1	69.0	-	-	69.0
	Public	-	-	-	-	-
	Sub-total	6	131.8	239.0	110.6	481.4
Urussanga	Private Individual	-	-	-	-	-
	Private Company	5	688.9	162.2	38.2	889.3
	CSN	-	-	-	-	-
	Public	-	-	-	-	-
	Sub-total	5	688.9	162.2	38.2	889.3
Total	Private Individual	28	447.9	118.2	-	566.1
	Private Company	24	2,075.3	1,035.3	271.4	3,382.0
	CSN	1	428.8	-	6.9	435.7
	Public	3	340.0	-	-	340.0
	Total	56	3,292.0	1,153.5	278.3	4,723.8

表 A-5
污染当事者

Company	Municipality	Abandoned	Active	Inactive	Total	Unit:ha
Carbonifera Barro Branco S.A.	Lauro Muller	217.6	61.3	35.6	314.5	
Companhia Carbonifera Catarinense S.A.	Criciuna	35.3	40		75.3	
Massa Falida da Companhia Brasileira	Criciuna	104.3	7		111.5	
Carbonifera de Ararangua - CBCA	Forquilha	17.5	33		50.5	
	Sub-total	122	40		162	
Companhia Carbonifera de Urussanga-CCU	Criciuna	188			188	
	Sideropolis		40		40	
	Urussanga	7	25		32	
	Sub-total	193	65		260	
Coque Catarinense LTDA - COCALIT	Sideropolis	20.5	152		172.3	
Comin	Treviso		16		16	
Industria e Comercio de Coque Criciuna LTDA	Forquilha	8	16.2		24.2	
Coque Sul Brasileiro Industria e Comercio LTDA - Coquesul	Criciuna		10		10	
Carbonifera Criciuna S.A.	Criciuna	98	14		112	
	Forquilha		170		170	
	Lauro Muller	125.8			125.8	
	Treviso	34.8			34.8	
	Urussanga	19			19	
	Sub-total	277.6	184		461.6	
Companhia Siderurgica Nacional - CSN	Capivari de Br	160			160	
	Criciuna	290.2		93.9	384.1	
	Icara	36	8.8		44.8	
	Sideropolis	775.4			775.4	
	Treviso	97			97	
	Sub-total	1358.6	8.8	93.9	1461.3	
Ibracoque Mineracao LTDA - IBRAMIL	Urussanga	1.5			1.5	
ICC	Forquilha	140			140	
Industria e Coqueria de Coque LTDA - INCOL	Criciuna		14		14	
Carbonifera Metropolitana S.A.	Criciuna	84.5	78		162.3	
	Sideropolis	6			6	
	Treviso		6		6	
	Sub-total	90.5	84		174.3	
Palermo	Lauro Muller	8			8	
Industria Carbonifera Rio Deserto LTDA	Urussanga			38.2	38.2	
Carbonifera Treviso S.A.	Lauro Muller	71.8	108		179.8	
	Sideropolis	77			77	
	Treviso		217	110.6	327.6	
	Urussanga	661.4	137.2		798.6	
	Sub-total	810.2	462.2	110.6	1383	
Unknown	Criciuna	7			7	
Grand Total	Lauro Muller	3292	1153.5	278.3	4723.8	

(Southern Area)








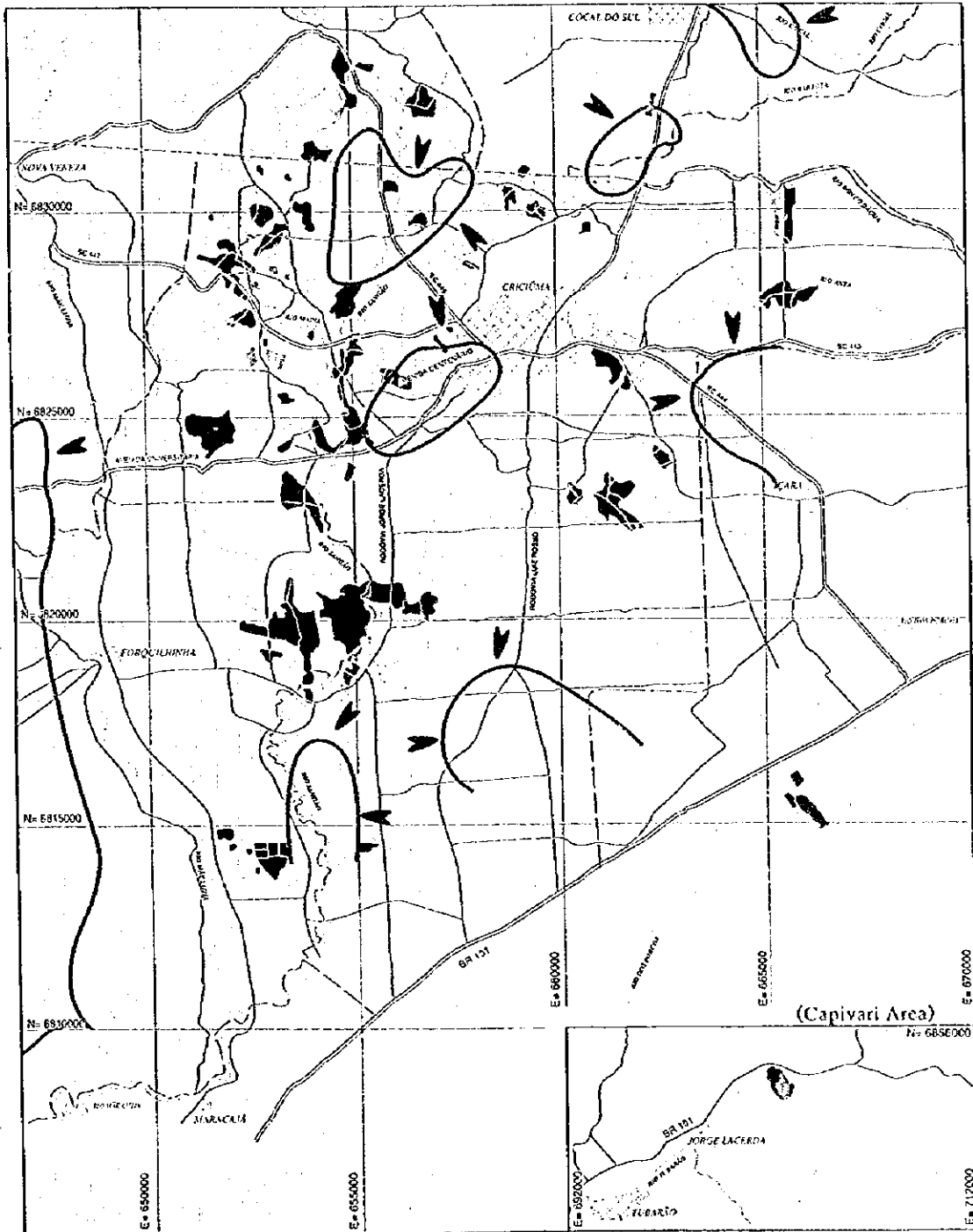
	Active Area		Pond
	Inactive Area		Waste Paved Road
	Abandoned Area		

図 A-1(2/2) 土地利用

THE FEASIBILITY STUDY ON RECOVERY OF MINED OUT AREAS
IN
SOUTH REGION OF SANTA CATARINA-REPUBLIC OF BRAZIL.

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY - JICA

(Southern Area)



Black Reject	Waste Paved Road
Overburden Waste	Area of Main Aquifer
Pond	Flux Direction of Subterranean Water

図 A-2(2/2) 地下水源

THE FEASIBILITY STUDY ON RECOVERY OF MINED OUT AREAS
IN
SOUTH REGION OF SANTA CATARINA, REPUBLIC OF BRAZIL

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY - JICA

A-II. 環境保護管理に係わる石炭鉱業の諸活動

01. 調査チームは1996年5月に12の稼働炭鉱のうち9カ所を訪問、1996年11月には操業中の21のROM（原炭）選炭場及びボタの再選炭場のうち12カ所を、現状の活動状況の調査、特に汚染管理の方策に関する環境保護管理活動を評価するために訪問した。操業実地調査を行なう前に、FATMAに提出された申請書による資料調査を行った。目的は実際の操業状況と照合する為である。更にZETA/IESAレポートの妥当性を評価するために調査チームは1997年10月に3炭鉱を訪問した。同レポートは、サンタカタリーナ州内の炭鉱会社と契約を交わしたZETA及びIESAの2社のコンサルタント会社が、酸性水排水の防止・管理システムに関するガイドライン（指針）を制定したものである（以下、このガイドラインをZETA/IESAガイドラインと言う）。調査結果を以下にまとめた。

1. 資料調査

02. 選炭業者がFATMAに提出すべき書類は、年次報告書、操業に関する環境保護対策の認可申請書、及び定期的な排水分析報告書である。認可申請書は、選炭工場とボタ捨て場のそれぞれについて提出しなければならない。炭鉱の場合は、更に採掘に関する申請書が追加される。いずれの申請書も同一の書式で、氏名・住所・市町村名・納税者番号・操業の種類・事業所所在地・制限事項・添付書類・認可条件の記載事項がある。年次報告書には、環境に関する事項は一切触れられておらず、生産に関する事項のみが記載されている。環境に関する事項は、申請書の中の制限事項及び認可条件に記載されている。制限事項の内容は、「本認可の範囲には、植生の伐採は含まれていない。」で、全ての申請書に共通している。認可条件は、一般条件と特別条件が含まれている。これを要約すれば以下の通りである。

03. 選炭工場認可の一般条件

- ・ 操業：操業内容の記載で、生産物・生産能力・設備等
- ・ 環境管理：どの申請書にも共通して、「クローズドサーキットの確立、或いは、規則 No. 14.250/81 の第 19 の排水基準を遵守する」となっている。

04. 選炭工場認可の特別条件:

- ・ FATMA から、違反事項を指摘された場合のみ記載している。内容は、復旧計画の提出・沈殿池の清掃・排水管理の強化等で、実施期限を明示している。

・ 排水化学分析の報告（共通）

・ 報告頻度：通常2ヶ月に一回、特殊ケースとして月一回、状況に応じて決定

・ 分析項目：pH、酸性度、硫化物、浮遊物、沈殿物、マンガン、全鉄分、銅、亜鉛

05. ボタ捨場認可の一般条件

・ 操業：操業内容記載・・廃棄物の種類・廃棄量

・ 環境管理：（全ての申請書で、略共通）

- 投棄方法及びリクラメーションは、ZETTAMESの報告書に従う。
- 排水は地下への浸透を防ぎ、排水路を設け沈殿池に誘導
- 規則 No. 14.250/81 の第19の排水基準を遵守する。

06. ボタ捨場認可の特別条件: (一例のみ)

- 環境復旧計画の提出：地形図に設備配置表示、復旧方法、実施工程

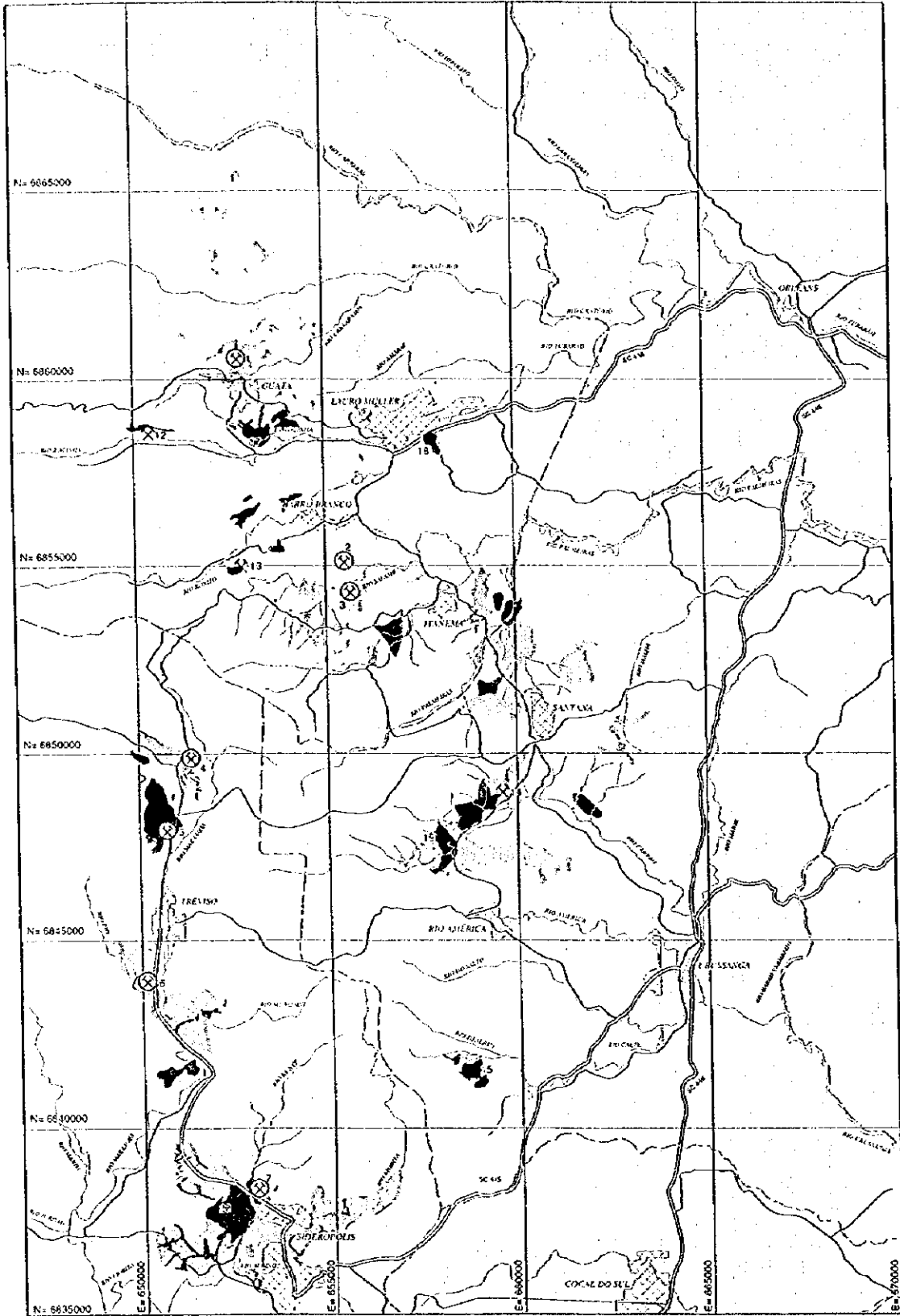
2. 選炭工場実地調査

07. 炭鉱位置、選炭工場・コークス工場位置を図A-3 (1/2)、(2/2)、図A-4 (1/2)、(2/2)に示す。

08. 再選炭ボタ：炭鉱を除いた再選炭工場の原料ボタは、購入している業者もあるが、野積みされた一次選炭ボタを、フロントエンドローダーやバックホータイプの重機でトラックに積み込み工場に運んでいる。選炭機近くに野積みボタがあるところでは、降水は沈殿池に集められている。離れた所では、何らの処置もされず、全くの野積み状態のままの所もある。

09. 選炭工場：選炭廃水処理に関しては、すべての稼働中の工場は沈殿地を有し、石灰石投入による酸性水中和を行っていた所は、Santa Librakuiki 区域の1カ所のみで、他は行っていない。いずれも沈殿池の水を循環使用をしているが、クローズドサーキット方式を採用していないので、事業所の別の所から流れ込んだ水と混じった沈殿池の排出口でのpH(水素イオン濃度)は3~4.5と低く、排水基準の6~9を満たしていない。沈殿地の構造が、ただ単に土やボタで造られており、地下に廃水が浸透している所が多い状況であった。貯鉱場底面においても同様である。

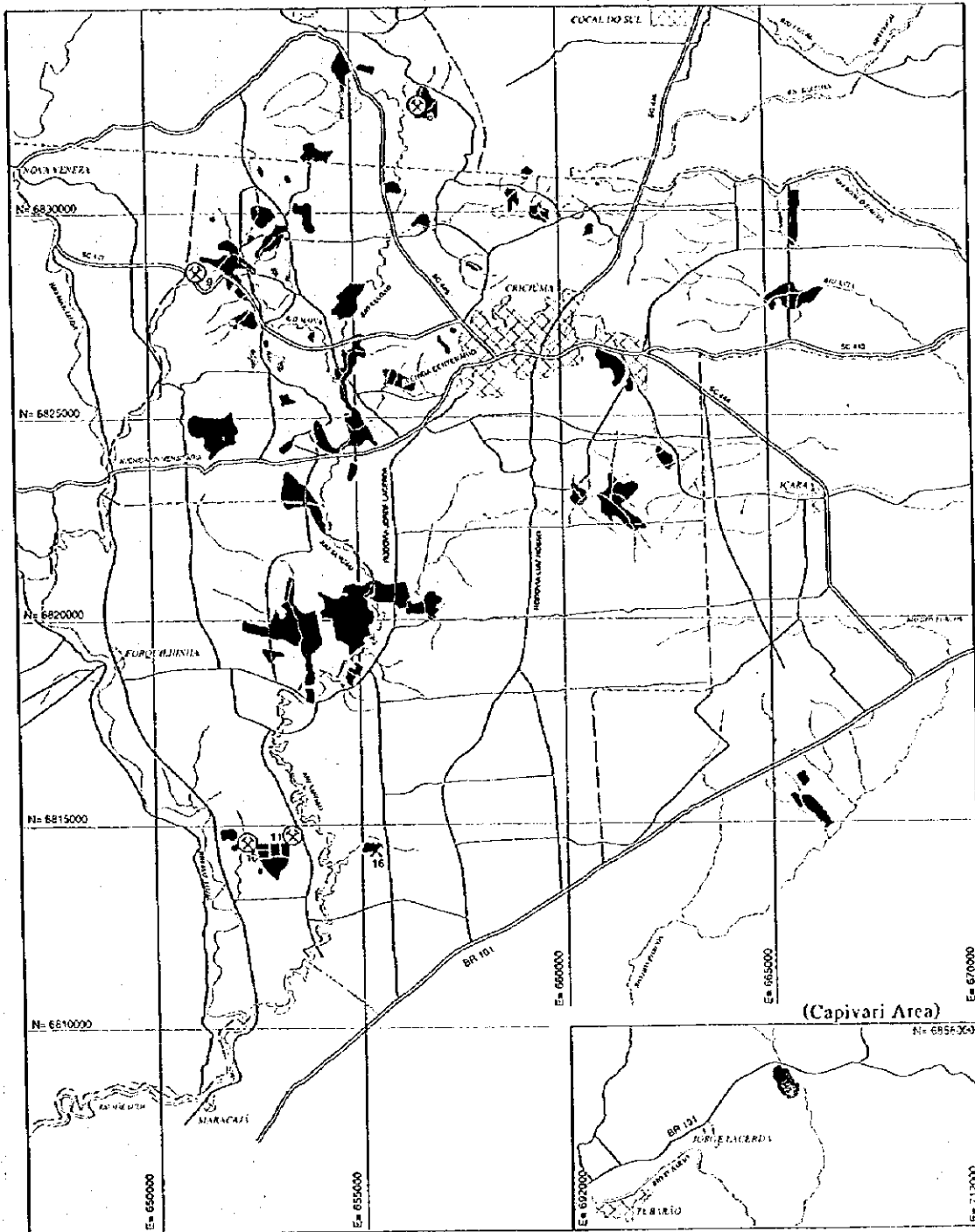
(Northern Area)



Legend:	
Black Reject	Active Mine
Overburden Waste	Abandoned Mine / Inactive Mine
Pond	Area of Reject Excavation

図 A-3(1/2) 炭鉱位置図
 THE FEASIBILITY STUDY ON RECOVERY OF MINED OUT AREAS
 IN
 SOUTH REGION OF SANTA CATARINA-REPUBLIC OF BRAZIL
 JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY - JICA

(Southern Area)



Legend:







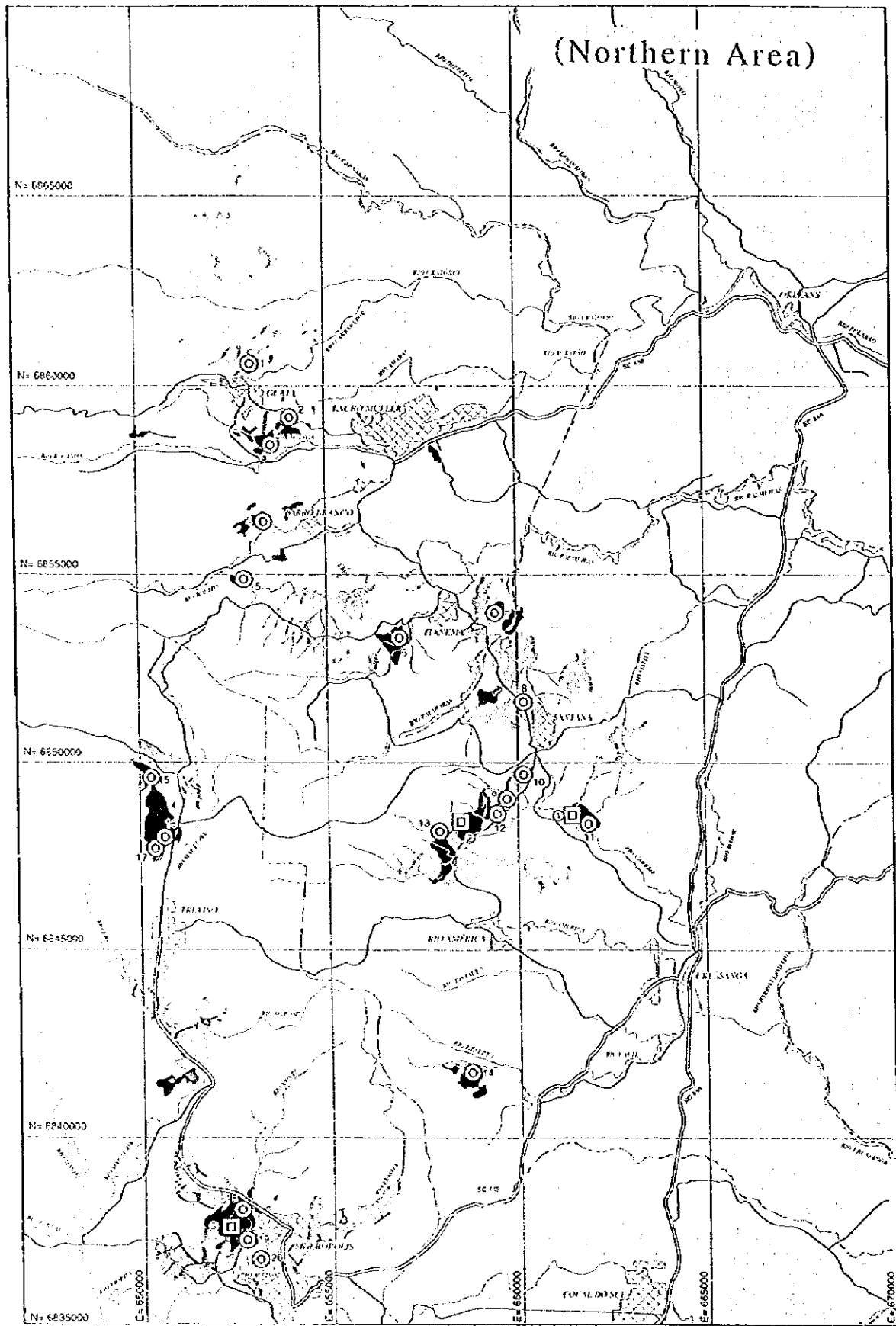
	Black Reject		Active Mine
	Overburden Waste		Abandoned Mine / Inactive Mine
	Pond		Area of Reject Excavation

図 A-3(2/2) 炭鉱位置図

THE FEASIBILITY STUDY ON RECUPERATION OF MINED OUT AREAS
IN
SOUTH REGION OF SANTA CATARINA REPUBLIC OF BRAZIL

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY - JICA



Legend:






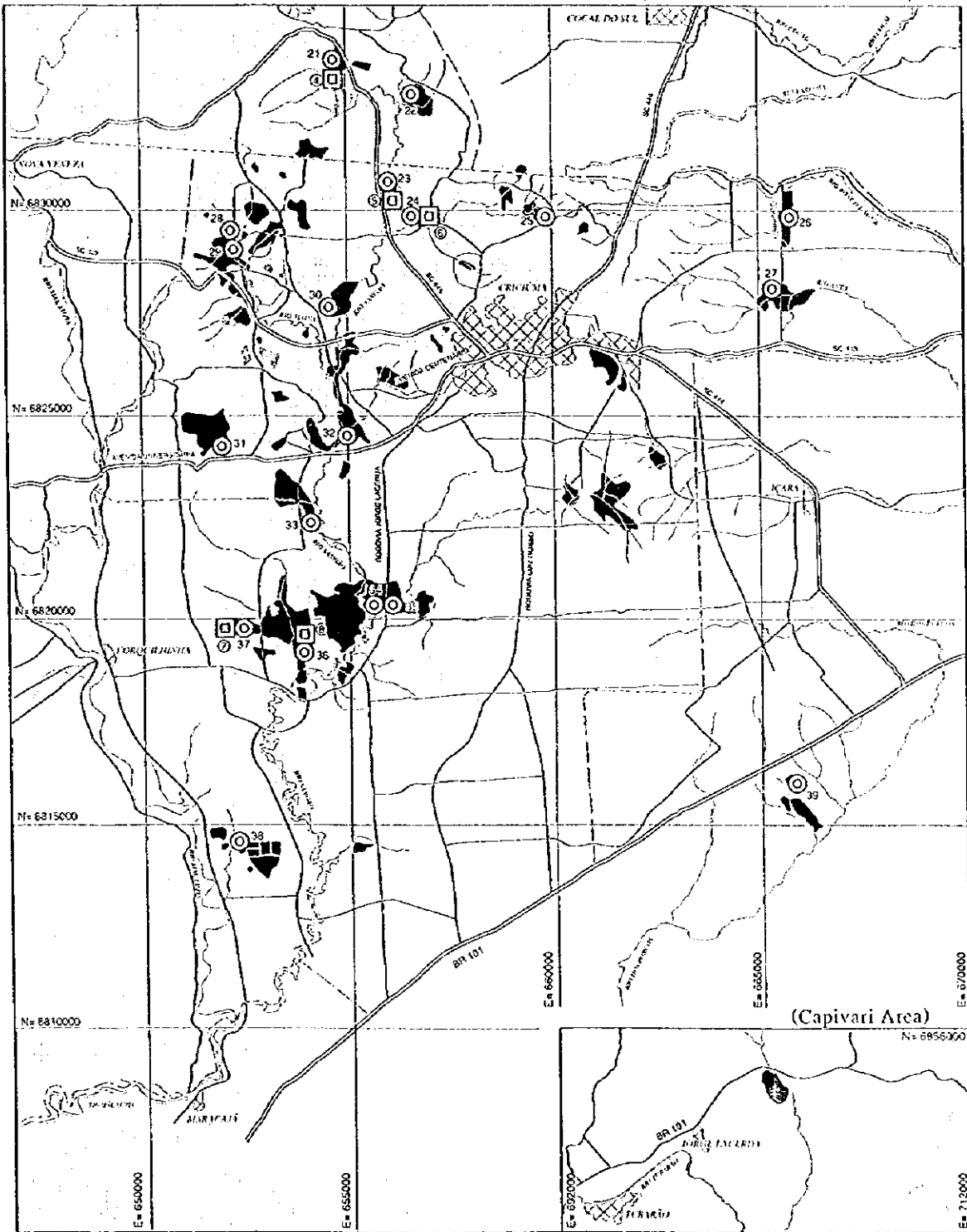
	Black Reject		Washing Plant
	Overburden Waste		Coke Plant
	Pond		

図 A-4 (1/2) 選炭施設およびコークス製造施設位置

THE FEASIBILITY STUDY ON RECUPERATION OF MINED OUT AREAS
IN
SOUTH REGION OF SANTA CATARINA-REPUBLIC OF BRAZIL.

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY - JICA

(Southern Area)








	Black Reject		Washing Plant
	Overburden Waste		Coke Plant
	Pond		

図 A-4 (2/2) 選炭施設およびコークス製造
施設位置

THE FEASIBILITY STUDY ON RECOVERY OF MINED OUT AREAS
IN
SOUTH REGION OF SANTA CATARINA-REPUBLIC OF BRAZIL.

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY - JICA

10. 最終ボタ処理：再選炭業者は、複数の沈殿池を持つ所が多く、再選炭ボタを沈殿池に誘導し、一杯になったら再度回収して選炭しているケースもある。選炭後の最終ボタは、露天採掘跡に出来た池に投棄したり、野積みそのまま放置している所が多く、ZETA/IESA ガイドライン通りに、計画的に粘土で覆う等のリクレーションを実施している所は皆無であった。

11. pHに関する事項：FATMAの指摘事項の実施状況は、現地調査の時点では殆どが実施しておらず、今から実施する予定であるとの回答が多かった。排水の酸性問題は、排水する河川のpHそのものが選炭排水と同程度のため、河川の水よりもきれいな水にして排水することを強制するのは困難で、FATMAも改善命令を出せないのが実状である。

12. 推奨事項：次の事項を改善計画の進展度に応じ、復旧計画に組み入れることを推奨する。

- (i) ボタの再選業は、炭鉱の生産活動と多くの共通点を有している。しかしながら、現行のブラジルの鉱業法では、ボタは地下資源の範疇に含まれていないために、炭鉱に関して最も知識を有するDNPMの監督下に入っていない。少なくとも、DNPMが定期的に、再選炭業者の操業状況検査を出来る体制とすべきである。
- (ii) 技術的には、原料ボタ山、選炭工場及び最終ボタ捨て場について、独立した排水管理対策及びリクレーション促進対策が必要となる。
- (iii) 原料ボタ堆積場：i) 原料ボタ堆積場に周辺からのクリーンな水の流入を防止すること。ii) 堆積場内の水は不透水の沈殿池に集めて外部に流出させないこと。
- (iv) 選炭工場：選炭工場廃水専用の不透水の沈殿池を設け、完全なクローズドサーキットによる水の循環利用を確立し、貯炭ヤード等のその他施設からの水は、別の不透水沈殿池に誘導すること。
- (v) 最終ボタ捨て場：i) 操業と平行して、計画的にリクレーションの実施を義務付けること。ii) リクレーションの終わった所の水と、終わっていない所からの水は合流しない様に処置すること。

3. ZETA/IESA ガイドラインの評価

13. ZETA/IESA ガイドラインは、1987年 Volume 1の報告書『Projeto Preservação do Meio Ambiente, Deposito de Rejeitos Solidos』に記載されている。ZETA/IESA ガイドラインにおいて示されている設計上の指針は、新規廃棄物処分施設における粘土層による処分場底部の被覆、底部からの排水、粘土および土壌による被覆、表流水排水システム等がある。これらのガイドラインは本報告書章Cに述べられた技術を補完するものである。

14. JICA チームはZETA/IESA ガイドラインの妥当性を評価するとともに、現在稼働中の鉱山会社3社において行われているボタの処分方法を視察した。また、実際に実施されている方法をZETA/IESA が推奨している方法と比較した。

15. JICA チームは新規開発鉱山および既存鉱山からの酸性水による影響を緩和する上でのZETA/IESA の設計ガイドラインの有効性を評価するため、レビューした。この結果、ZETA/IESA の設計ガイドラインはサンタカタリーナ州南部における信頼性のある鉱山廃棄物管理の先例であると判断された。同ガイドラインは現状の鉱山廃棄物処分方法と比べると、環境保護に向けて大きく踏み出した内容となっている。従って、JICA チームは酸性水生成緩和対策の検討に際してZETA/IESA ガイドラインの使用を支持するものである。本報告書において示されるJICAの酸性水生成緩和対策は、ZETA/IESA ガイドラインを補うためのものであり、同ガイドラインの改訂や交換を意図するものではない。

3.1 ZETA/IESA ガイドライン

16. ZETA/IESA ガイドラインは新規および稼働中の鉱山廃棄物堆積における酸性水への対策として下記のような行動を推奨している。

- (i) 廃棄物処分場底部の粘土層の敷設、およびボタ山からの浸出水を集水するための砂利排水路の設置。
- (ii) 浸透を抑制するため、ボタを拵げ、締め固める。
- (iii) 締め固めたボタを厚さ10 m程度のボタ山とする。

- (iv) 廃棄物捨て場の末端部の傾斜を勾配 50%に緩和する。
- (v) 各々の 10 mのボタ山の表面全体に、厚さ 30cm の締め固めた粘土層を設ける。
- (vi) ボタ 10 m積み上げる毎に雨水排水を集水するために段を設ける。
- (vii) 浸食を防ぎ、廃棄物堆積物からの雨水を安全に排水するために、表流水排水システムを設ける。
- (viii) 適切な植物生育するための培地として、厚さ 10cm の植栽土壌をおく。
- (ix) 適切な芝および豆科植物の苗を 30cm 間隔で覆土の表面全体に植栽する。
- (x) 浸食を防ぐため、土壌の斜面には等高線状に溝を設ける。

3.2 現行の鉱山廃棄物処分方法の評価

17. 石炭生産量の多い 3 炭鉱の鉱山廃棄物処分現況を視察した結果では、ボタ山を土壌または粘土によって覆っているにも拘わらず、酸性排水緩和には余り役立っていない。さらに、JICA チームの訪れた 3 社のうち 2 社は、将来の土地利用のための鉱山廃棄物の埋設処分を行っているが、その試みは失敗していた。JICA チームの視察結果から、現在行われている酸性水緩和対策は、実施費用が、効果の薄い覆土や植栽のために、出費に値する効果が上がらずに浪費されているとの結論に至った。

18. 規模の大きな鉱山業者による現行の覆土方法の有効性は、以下のような理由によって薄められている。

- ・ボタ山の勾配が急であるため、有効な覆土が行われていない。
- ・科学的な覆土材料の選択が試みられておらず、無作為におこなわれている。
- ・利用されている土壌は浸透を抑制したり、植生被覆を形成する上で不適切である。
- ・大半のケースにおいて、土壌の浸食防止策がとられておらず、覆土が大幅に浸食されている。
- ・浸食や土壌状態が悪いことから、播種がほとんど失敗している。

- ・ボタ山の末端傾斜だけが覆土されており、表面平坦部の大部分は被覆されていない状態になっている。
- ・浸透水の防止層が締め固められていないか、または締め固めが弱い。
- ・覆土工事の品質保証がほとんどなされていないか、あるいはまったくない状況にあるようである。
- ・多くの場合、ボタ山からの酸性排水を回収・処理するための浸出水の回収システムが設けられていない。

3.3 提案

19. これらの観察結果より、JICA チームは現行の酸性水対策の投資効果を改善するために以下のような方策を提案する。

- i) 表層土壌の浸食を減少させ、土壌被覆システムの施工性を改善するために、ボタ山の傾斜を 30%以下 (約 17 度) とする。
- ii) 最低 50cm の良く締め固められた粘土層による、30cm の植栽土壌を被覆する覆土とし、更に、設計規準を改善し標準化する。透水性の低い粘土層は、透水係数が 10^{-7} cm/sec 以下であることが必要である。
- iii) 透水性の低い土壌は、タンピングローラーあるいはホイールローラー等の適切な機器を使用して、均質に締め固める必要がある。現行の締め固め方法は、不規則、不均一であり、土層の厚さも不均一である。
- iv) 客土は設計目的に合致しているかどうかを試す必要がある。客土の選定は資格を有するソイル・エンジニアが被覆システムの完全性を維持するように管理を行うべきである。
- v) 植栽土壌層は植物に必須栄養素が供給され、適切な植物の成長が得られるよう、土壌の改良を行うべきである。土壌改良材は有機物、窒素、リン、カルシウム、マグネシウム等を含むことが望ましい。土壌 pH の調整も必要である。
- vi) 鉱山会社は表土を植物の生育に適した状態に改善するため、EPAGRI (サンタカタリ

- 一州農業公社)に助言を求めることを強く勧める。
- vii) 表土の浸食を防ぎ、ボタ山からの流出水を集水・処理等の管理をするため、効果的な雨水排水システムの設計、設置を行う。
 - viii) 稼働中のボタ山底部からの酸性浸出水を集水、処理するための、浸出水集水システムを設計、設置する。
 - ix) 覆土システムが設計通りの機能を果たすように建設方法および品質管理方法を改善する。覆土システムの配置は資格を有するエンジニアによって管理される必要がある。
 - x) 稼働中のボタ山の規模を縮小する。これにより廃棄物が風化にさらされる時間を短縮する。
 - xi) 被覆システムはテラスベンチ部および平坦部を含む廃棄物全体を覆うように計画される必要がある。現状では、ボタ山の末端傾斜部のみがカバーされており、ベンチ部、プラットフォーム部は覆われないままになっている。
 - xii) 1ヶ月以上放置されている廃棄物堆積物には、殺菌剤、石灰、酸素消費材、一時的な被覆等の措置がとられる必要がある。これらの対策により、最終的な被覆システムが完成するまでの間、酸性水が発生するのを遅らせることができる。
 - xiii) 新しい廃棄物堆積場には地下水への影響を防ぎ、雨水排水を減少させるために、底部遮水工および浸出水回収システムを施す必要がある。浸出水回収システムは酸性水をパッシブ（薬品や機械設備を用いない）ウェットランドシステムに導くように設計される必要がある。
 - xiv) 稼働中のボタ山からの酸性排水を受け入れ、処理するためのパッシブウェットランド処理システムを設ける。
 - xv) 覆土システムの長期にわたる有効性の確認とシステムからの漏洩監視のために、覆土されたボタ山内にピエゾメーター、水温センサー、土壌水分計等のモニタリング装置を設置するべきである。

xvi) 谷間埋立型の廃棄物処分場の建設は、堆積物に地下水が透過することへの対策を講じることが困難であることから避けるべきである。谷間埋立による廃棄物処分が必要な場合には、ボタと谷の傾斜部との間に遮水壁または排水溝を施し、地下水が廃棄物を透過することを妨げるか、もしくは遮断する必要がある。

Λ-III 稼動鉱山排水中性化の投資コスト積算

01. 現状の汚染状態を理解するために、調査域全体における稼動炭鉱から出る酸性排水処理費用の額を概算することが本節の目的である。概算は、推定鉱山排水流量と平均水質に基づく大雑把なものである。表A-6に、稼動6坑内掘り炭鉱の、2つの処理方法、すなわち活性・化学的中和とパッシブウェットランドによる処理を比較している。表-7に稼動6坑内掘り炭鉱のパッシブウェットランド建設費用を、表-8にその内訳を示す。

表 A-6
予備的鉱山排水処理費用の推定

	Active, Chemical Neutralization	Passive Wetland
Estimated Flow Rate (m ³ /hr)	828	823
Acidity (mg/l)	2,750	2,750
Average Iron (mg/l)	537	537
Average Manganese (mg/l)	15	15
Initial Capital Costs (R\$×1000)	9,230	21,991
Annual Operating Costs (R\$×1000/yr)	3,877	53
Sludge Disposal Costs (R\$×1000/yr)	115	---
<u>30Years Total Costs^a (R\$×1000)</u>	<u>50,620</u>	<u>22,539</u>

^a 30年想定は、活性処理システムの予想ライフ・サイクルが通常30年であることに基づく。割引率10%での純現在価値として表示。

02. 活性・化学的中性化処理の資本費はパッシブウェットランド処理のそれよりも低い。活性処理に伴う操業コストはパッシブウェットランド処理システムのそれと比べて非常に高い。この理由から、活性・化学的中性化処理はパッシブウェットランド処理よりも非常に費用がかかる処理方法となる。

03. パッシブウェットランド処理のための初期投資コストおよびフォースアカウント（州、市の現体制での費用で行えるものはプロジェクトの費用としない）に於ける投資コストの内訳は、以下の通りである。

表 A-7
パッシブウェットランド建設費用

Parameter	Quantity	Unit Cost (\$US)	Total Cost (1000\$US)
Anaerobic Treatment Cells			
Number of Cells (Approx. 1ha/cell)	35		
Area of Anaerobic Cells (ha)	455,000		
Concrete Control Structure (each)	35	36,250.00	1,269
Excavation for Wetland Cells (m3)	910,000	1.19	1,083
Backfilling of Anaerobic Cells Furnish and Install Limestone (m3)	301,600	33.54	10,116
Furnish and Install Organic Matter (m3)	910,100	3.22	2,931
Furnish and Install Clay Liner (m3)	136,600	4.89	668
Furnish and Install Rip Rap (m3)	3,520	61.16	215
- Furnish and Install Underdrains (m)	20,400	12.96	264.38
Subtotal of Anaerobic Treatment Cells			16545.4772
Aerobic Treatment Cells			
Number of Cells	53		
Excavation for Aerobic Cells (m3)	533,000	1.19	634
Furnish and Install Clay Liner (m3)	160,000	4.89	782
Furnish and Install Cobbles (m3)	13,400	6.77	91
Establish Wetland Vegetation (m2)	250,000	0.32	80
Subtotal of Aerobic Treatment Cells			1,587
Mobilization, Demobilization and Site Preparation			907
Engineering and Construction Inspection			952
Contingencies			1,999
Total			21,991

表 A-8

パッシブウェットランド建設費用内訳

(UNIT: R\$X1000)

	Cost ^{a/}	FA ^{b/}	Indexes ^{c/}
Labor	1,218	0	0
Parts	375	375	1
Tire	51	51	1
Fuel/Lub	411	411	1
Depreciation	279	0	0
Overhead	879	0	0
Cement	164	140	0.85
Sand	21	18	0.85
Gravel	31	26	0.85
Board	229	195	0.85
Timber	25	21	0.85
Nail	7	6	0.85
Stone	289	246	0.85
Mortar	53	45	0.85
Lime stone	11,120	9,452	0.85
Clay	919	782	0.85
Chemical fertilizer	36	30	0.85
Seeds "AZEDEM"	9	8	0.85
Celulose	25	21	0.85
Emulsion	9	7	0.85
Bar	357	303	0.85
Organic matter	933	793	0.85
Pipes	416	354	0.85
Royalty for Clay	277	0	0
Mobilization etc.	907	0	0
Engineering	952	664	
Contingency	1,999	1,395	
Total	21,991	15,344	

a/ Costs based on contract-out with retail prices for materials

b/ Costs based on Force Account

c/ Multiplier: FA = Cost x Multiplier

B. 水質モニタリング

1. 調査範囲

01. 調査範囲は以下の通り。

- ・ 1年間の現地調査による水質及び底質データの収集
- ・ 水質目標値の検討
- ・ 対象河川の現状調査
- ・ 水質汚染機構の検討
- ・ FSサイトの水質シミュレーションモデルの構築
- ・ 対象河川のモニタリング計画の立案

2. 調査方法

02. 調査対象域内の主要河川は、Rio Tubarão、Rio Urussanga、Rio Araranguáの3河川である。Rio Araranguáは、さらにRio Mãe LuziaおよびRio Sangãoの2つの大きな支流に区分される。調査方法は以下の通りである。

2.1 既存資料の収集

03. 既存資料の収集・整理: 主要な収集資料は以下の通り。

- ・ FATMAによるTubarão、Urussanga、Araranguáの3河川の水質モニタリングデータ
- ・ ブラジル国の連邦およびサンタカタリーナ州水質基準
- ・ 国立鉱山公害防止センター設置のUrussanga川モニタリングステーションの情報
- ・ DNPMによる稼働炭鉱出炭量データ
- ・ DNPMによる稼働炭鉱排水モニタリングデータ

2.2 現地調査

04. 対象3河川、FSサイト4ヶ所（Fiorita, Rocinha, Carvão, Capivari）、現在稼働中の炭鉱排水、地下水について現地調査を実施した。ポータブルメーターによる現地測定、分析のためのサンプリングはFATMAが実施した。分析作業はFUCRI（クリシウマ大学）/UNESC（南サンタカタリーナ大学）に委託して実施した。全体調査計画および調査工程を表B-1および表B-2に示す。各調査の内容は以下の通りである。

表 B-1

水質モニタリング計画

Location	Water Treatment of sample	Total points	Frequency Samples/day	days/month	months	Total samples	Analysis items in laboratory		Total items number	Parameters measured on site	
							Frequency	months		Frequency	months
FATMAN Pond including Control Ponds	Unfiltered	27	1	1	12	324	SS	SO4 Acidity Fe Pb Mg Cr Cu Zn Mn COD BOD	1,296	pH Water temp Color	TDS EC Turbidity
	Filtered (0.45um)	27	1	1	12	324	As Cd Ni K IL COD Acidity Fe Sulfide pH	1,944	6	ORP Color	Color Air temp Velocity
Mixed/Coal Preparation	Unfiltered	10	1	1	4	40	As Cd Pb Mg Cr Cu Zn Mn	480	12	pH Water temp Color	TDS EC Turbidity
	Filtered (0.45um)	10	1	1	4	40	Fe Cu Mg Al Ni K	240	6	ORP Color	Color Air temp Velocity
JICA's Pond including Control Ponds	Unfiltered	25	1	1	12	300	SS SO4 Acidity Fe Pb Mg Cr Cu Zn Mn COD BOD	1,200	4	pH Water temp Color	TDS EC Turbidity
	Filtered (0.45um)	25	1	1	12	300	As Cd Pb Mg Al Ni K IL COD Acidity Fe Sulfide pH	1,800	6	ORP Color	Color Air temp Velocity
F/S pit	Unfiltered	30	1	1	3	90	As Cd Pb Mg Cr Cu Zn Mn	1,080	12	pH Water temp Color	TDS EC Turbidity
	Filtered (0.45um)	30	1	1	3	90	Fe Cu Mg Al Ni K	540	6	ORP Color	Color Air temp Velocity
Boring well	Unfiltered	3	2	1	1	6	As Cd Pb Mg Cr Cu Zn Mn	72	12	pH Water temp Color	TDS EC Turbidity
	Filtered (0.45um)	4	1	1	1	4	SO4 Acidity Fe Ca Mg Al Ni K	8	8	pH Water temp Color	TDS EC Turbidity
Dynamic well	Unfiltered	2	1	1	12	24	SS SO4 Acidity Fe Pb Mg Cr Cu Zn Mn	110	14	pH Water temp Color	TDS EC Turbidity
	Filtered (0.45um)	2	1	1	12	24	As Cd Pb Mg Al Ni K	140	14	ORP Color	Color Air temp Velocity
Sum							2,322			110	15,620

TDS: Total dissolved solids, EC: Electric conductivity, ORP: Oxidation reduction potential, IL: Ispatone test, DO: Dissolved oxygen
 ---Unfiltered: Analyzed after decantation
 ---Filtered: Analyzed after 0.45um filtration

表 B-2
水質モニタリングタイムスケジュール

ITEM	1997												
	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	
WATER QUALITY ANALYSIS													
1 FATMA POINT													
2 MINE/COAL PREPARATION													
3 JICA POINT													
4 F/S SITE													
5 BORING WELL													
6 EROSION													
SEDIMENT ANALYSIS													
7 FATMA POINT													
8 JICA POINT													
WATER QUALITY MEASUREMENT ON SITE													
9 BORING WELL													
10 DOMESTIC WELL													

05. 対象3河川調査: FATMAの既存のモニタリング地点、汚染源の分布、各水系の構造などを考慮して、調査地点を合計で52地点選定した。対象3河川の調査地点を図B-1および図B-2に示す。各調査地点では、1996年12月から1997年5月までほぼ1カ月1回の頻度で水質、流量を測定した。底質調査は1997年3月に1回実施した。

06. FSサイト調査: 水質モニタリング地点として4カ所のFSサイトに30地点(図B-3~B-6)を設け1997年1月、2月、3月および5月の計4回実施した。

07. 稼働炭鉱排水調査: 7カ所の稼働炭鉱に排水モニタリング地点を10地点を設け、1997年2月、3月、6月の計3回水質調査を実施した。

08. 地下水調査: 地下水測定用に掘削した観測井17カ所、および既存の井戸2カ所について、1996年12月、1997年1月、2月および5月の計4回地下水位および水質調査を行った。

2.3 水質自動モニタリング機器

09. Pedras Grandes、Morro da Fumaça、Maracajaの3ヶ所に米国シグマ社製SIGMA 950 FLOW METERを設置した。モニタリング項目は水温、pH、電気伝導率、水位の4項目とした。

2.4 分析精度

10. 水質および底質の分析を委託したFUCRI/UNESCの分析値の信頼性をチェックするため、再現性試験、添加回収試験、クロスチェックを実施させた。その結果、本モニタリング調査で分析を委託したUNESCの分析技術に関しては、特に問題はみられなかった。

3. 調査結果

3.1 水質目標値の検討

11. 復旧対策実施による河川等の水質改善効果を評価する上で基準となる水

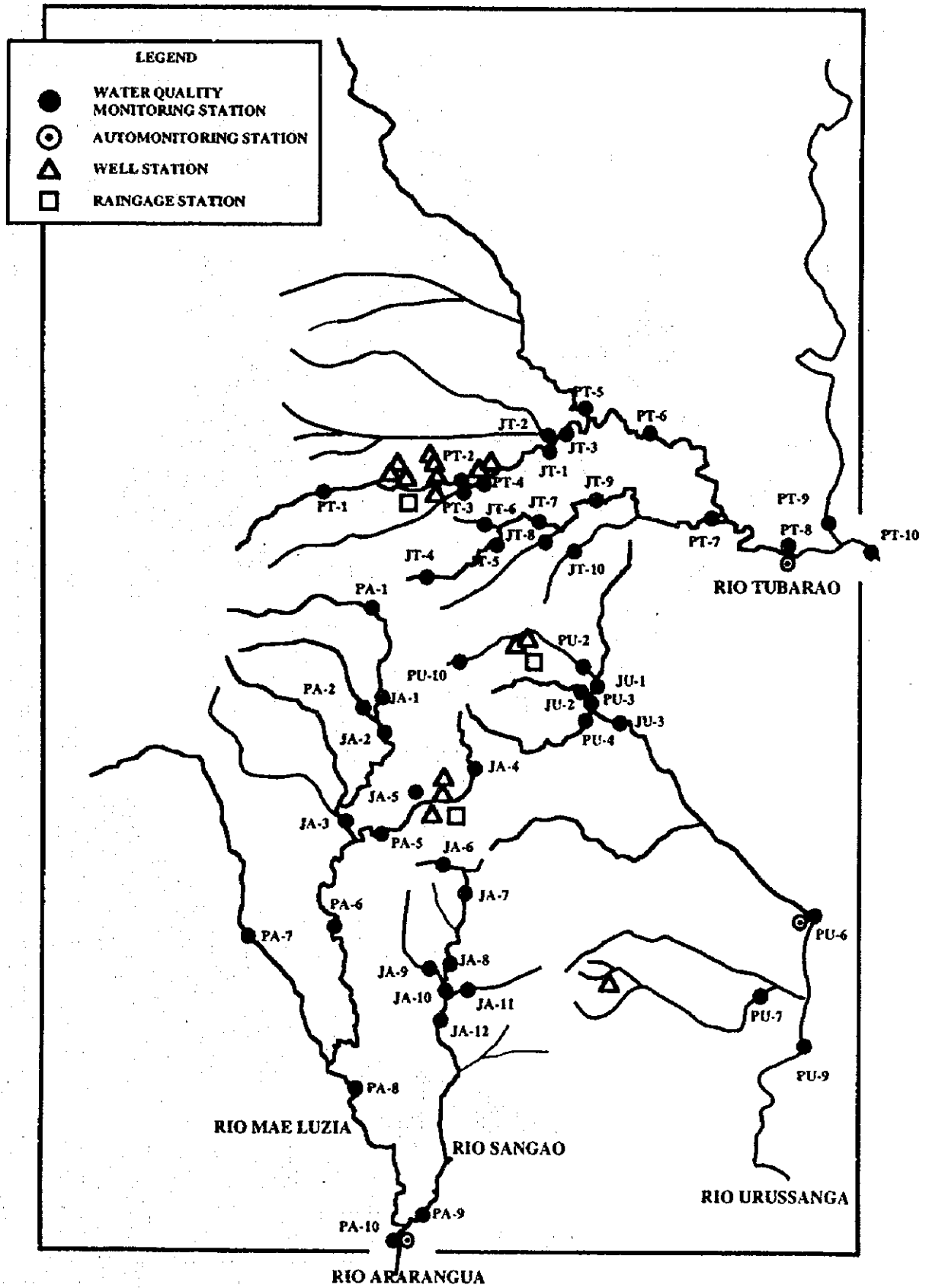


図 B-1 水質モニタリング地点

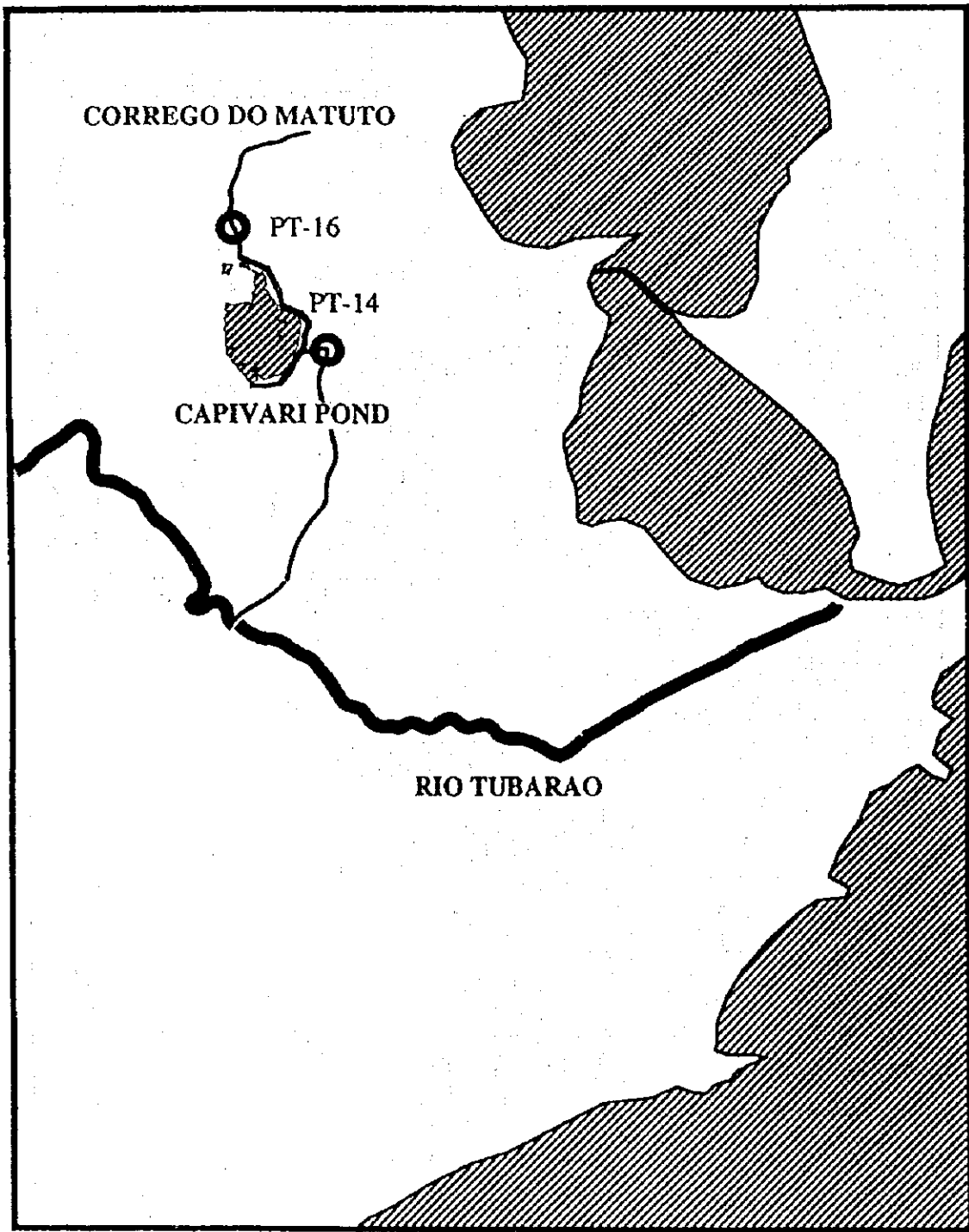


図 B-2

Capivari サイトのモニタリング地点

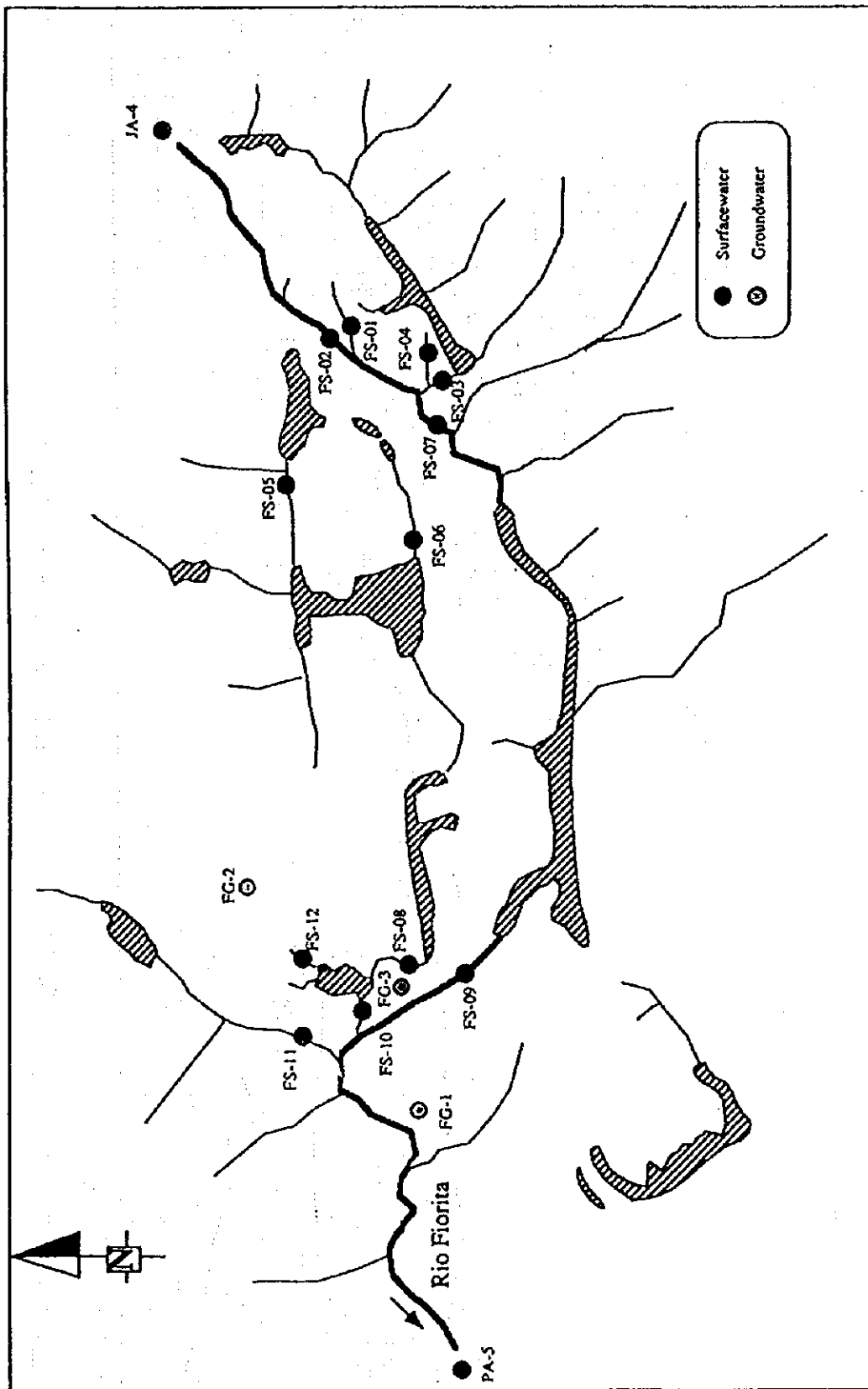


図 B-3 Fiorita サイトのモニタリング地点

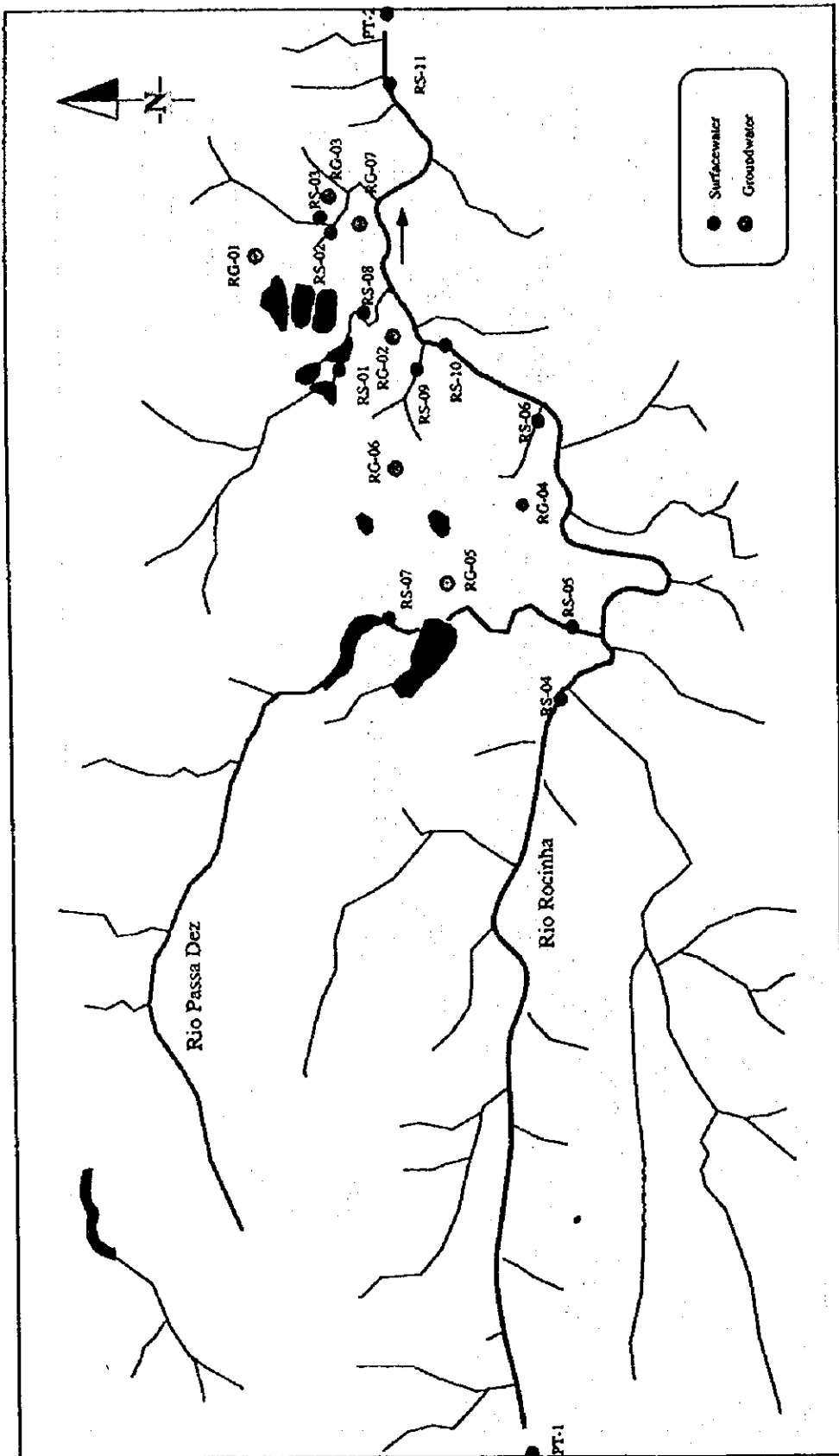


図 B-4 Rocinha サイトのモニタリング地点

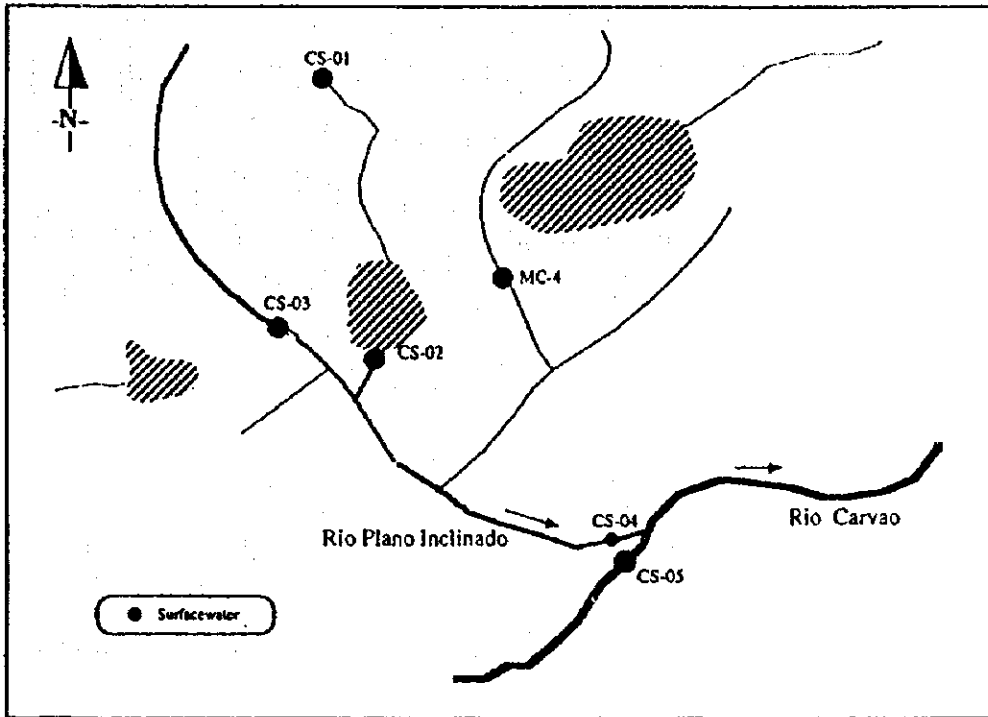


図 B-5 Carvão サイトのモニタリング地点

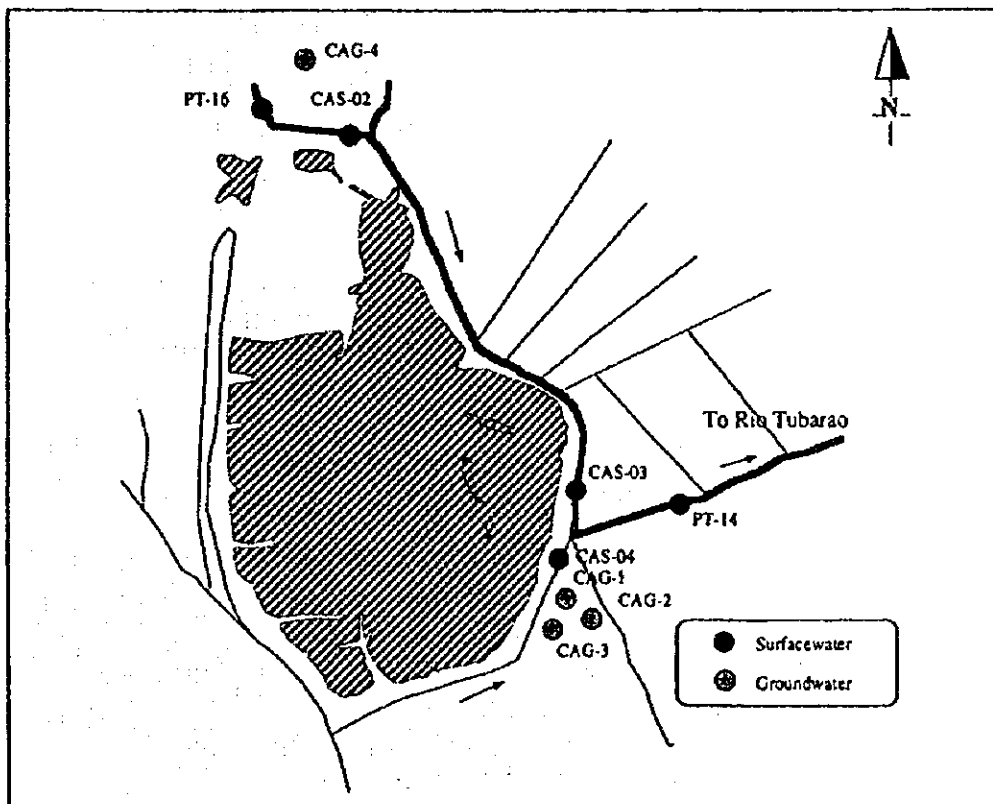


図 B-6 Capivari サイトのモニタリング地点

質目標値を検討した。目標値の設定に際してはブラジルにおける水質環境基準を基本とし、わが国および米国をはじめとする先進諸国の環境基準および世界銀行、米国輸出入銀行等の国際的融資機関の環境ガイドライン等を考慮した。ブラジルの基準については、連邦法と州法のうち厳しい方の値を採用した。また、米国については健康項目を参考とした。3カ国の基準値を比較すると、ブラジルの基準値は米国と同様な数値を示す項目が多く、Class 1 および 2 では米国よりも厳しい項目も多い。したがって、復旧計画における表流水の目標水質としてブラジルの環境基準が適切であるといえる。

3.2 水質汚染機構の検討

12. 炭鉱地域における酸性水汚染は、石炭とともに賦存する黄鉄鉱の溶解反応に由来する。炭鉱地域における汚染機構は図 B-7 のようにまとめられる。3河川の全モニタリングデータによる、pH と各指標との相関について、単回帰及び重回帰分析相関分析を行った。結果は以下の通りである。

(a) pH と各指標との相関

13. pH と各指標との相関についてはほとんど線形相関がみられなかったが、指数相関については pH と電気伝導度、硫酸イオン、Acidity、鉄、溶存態鉄、亜鉛、マンガン、マグネシウム、アルミニウムとの間に相関がみられた。特に pH と Acidity、電気伝導率との相関にはほとんどの調査地域で強い相関がみられた。

14. pH と SO_4 および鉄との相関が強いことは、対象3河川の酸性水汚染が黄鉄鉱の溶解によって生じていることを示している。また、pH と全鉄および溶存態鉄との相関は、すべての河川で全鉄の方が pH との相関が強くなっており、種々の形態の鉄化合物が酸性水の発生に関与していることがうかがわれる (図 B-8 および図 B-9)。pH と重金属との相関については、各地域ごとにバラツキがあるが、亜鉛およびマンガンが pH と強い相関があり、クロムおよび銅については相関がみられなかった。これらのことは、前述の化学反応に従って黄鉄鉱の酸化過程から生じた $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ が亜鉛、マンガン等の硫化物を酸化溶解させていることを示している。pH と軽金属類との相関については、カルシウム、アルミニウムとの間に相関がみられ、特にアルミニウムについては3河川で pH との重相関係数が 0.703~0.877 とモニタリング対象物質の中で最も強い相関がみられた (図 B-10)。

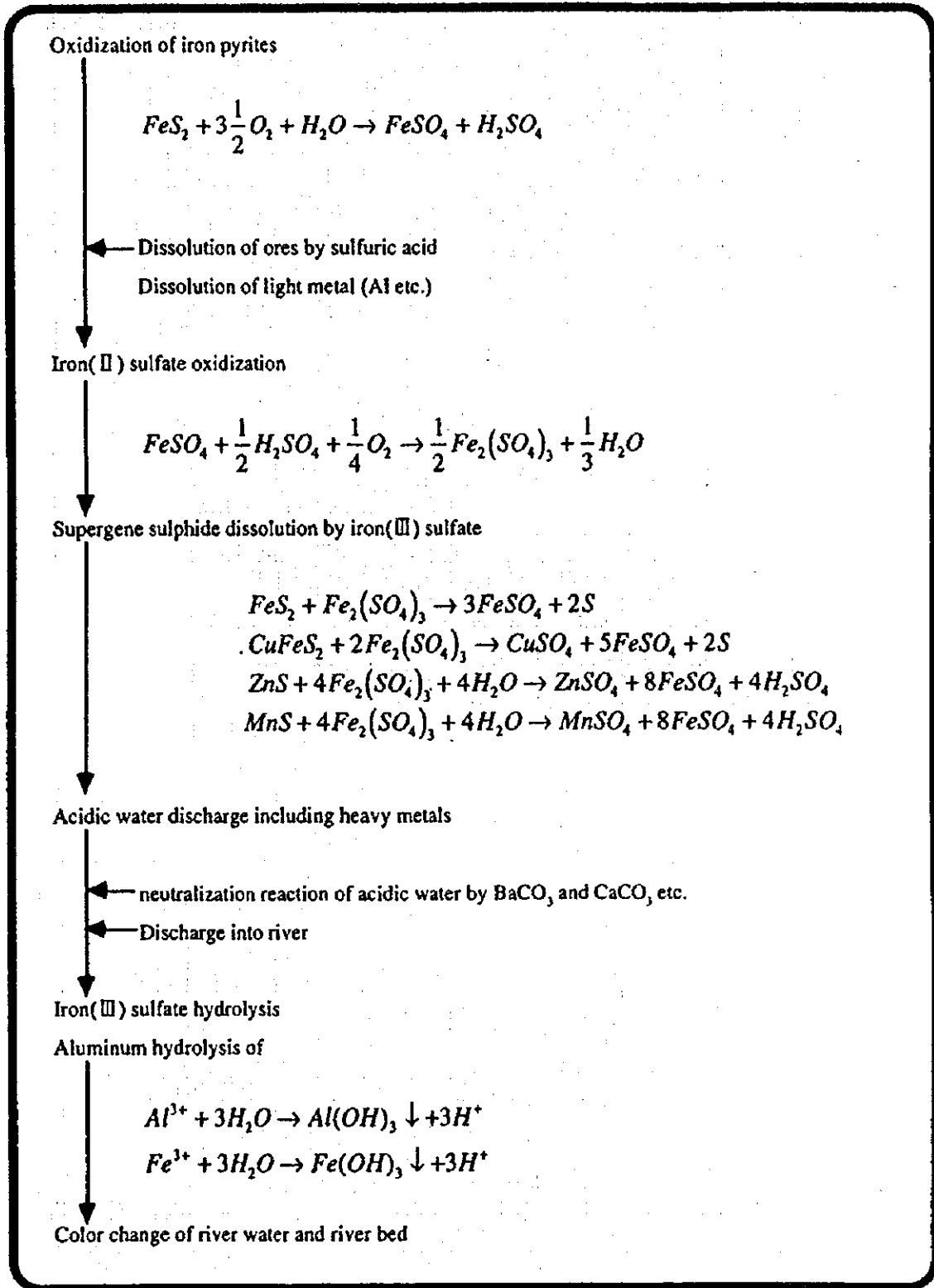


図 B-7

鉱山域における水質汚染機構

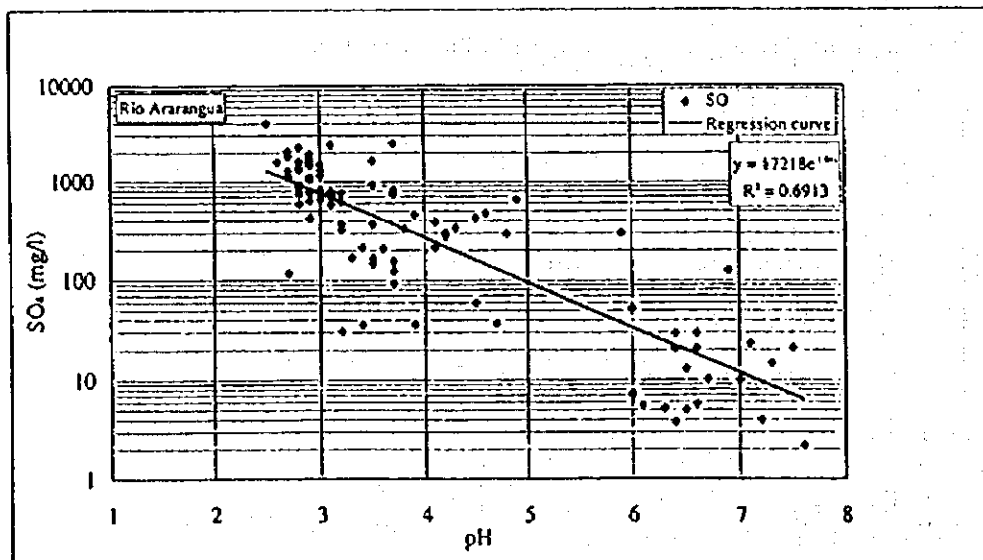
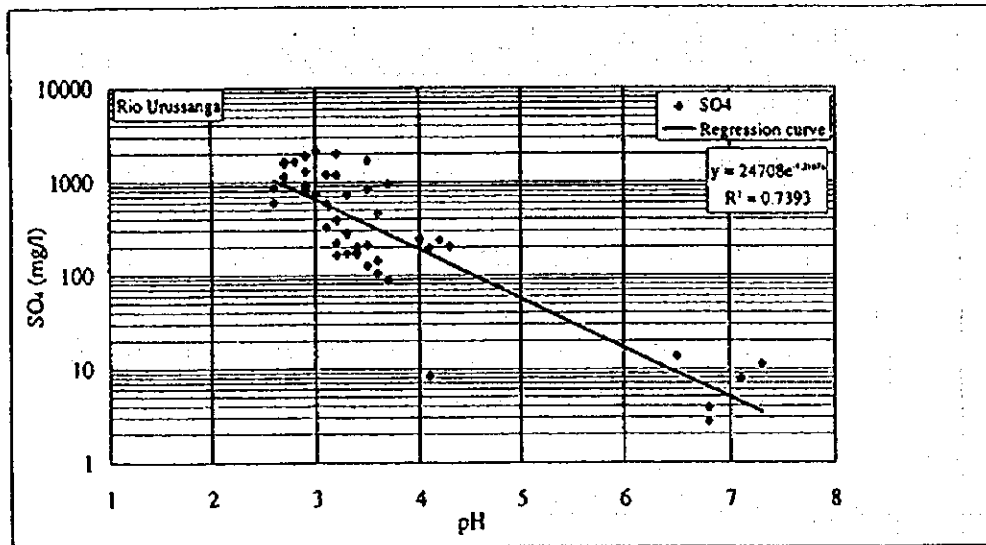
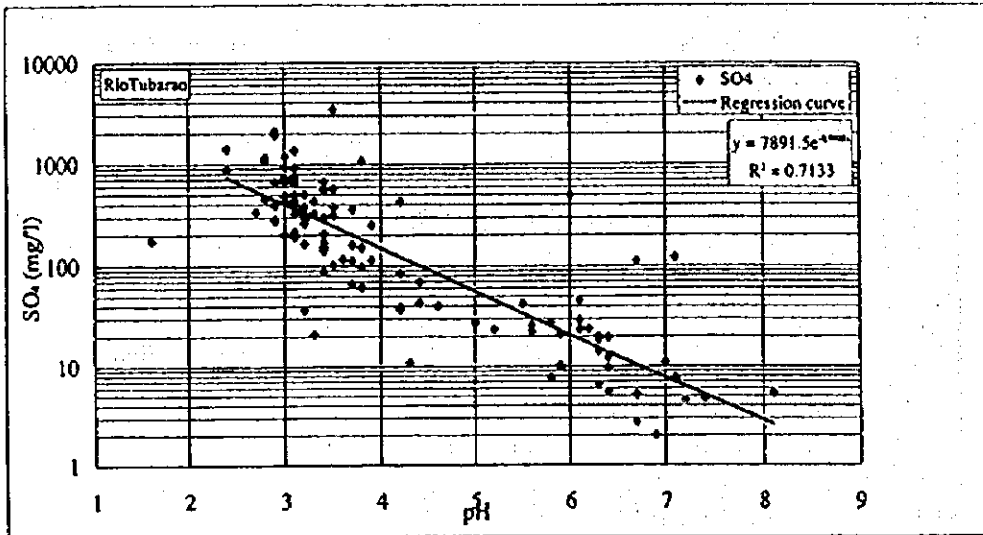


図 B-8 水質の pH と硫酸イオンとの相関

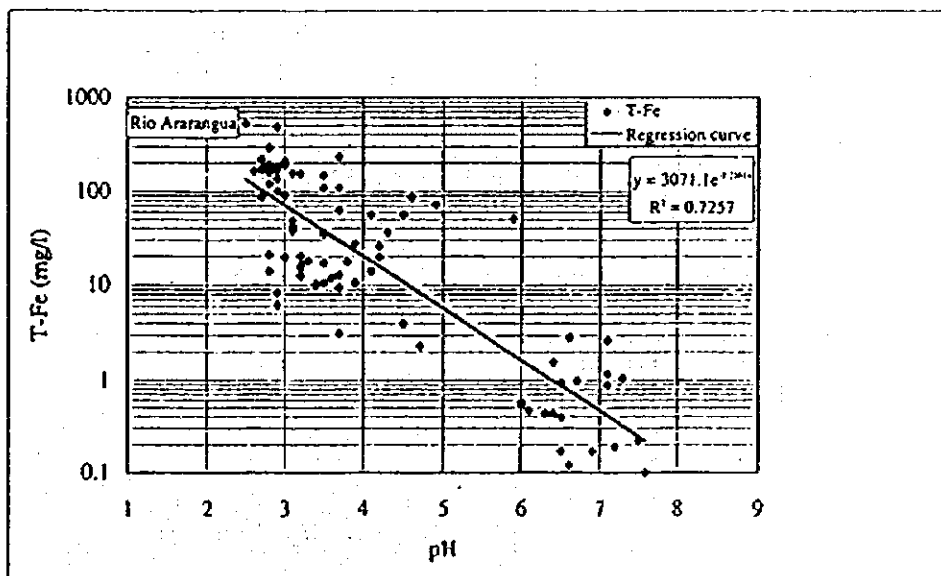
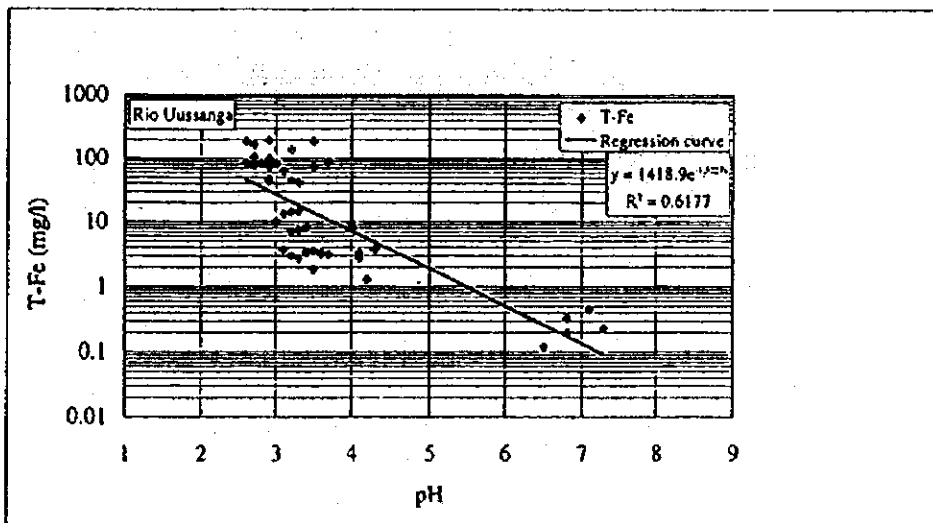
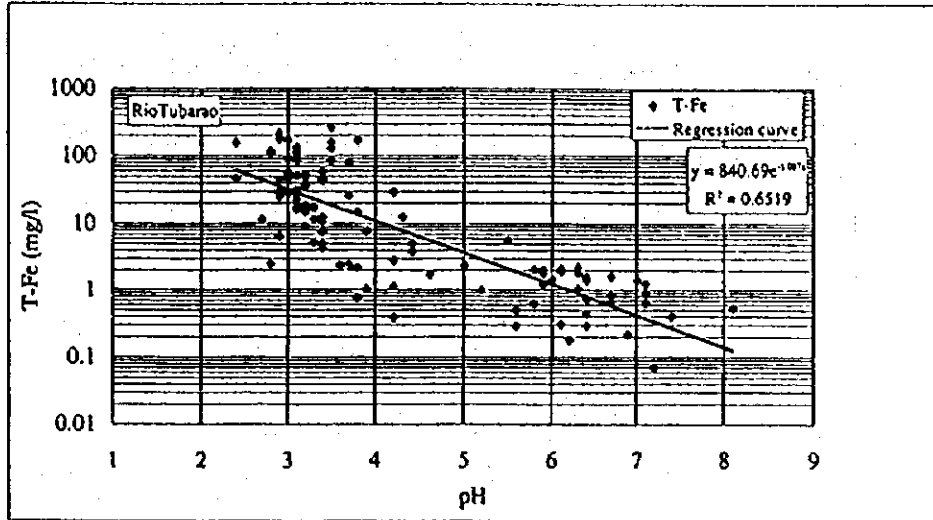


図 B-9 水質の pH と全鉄との相関

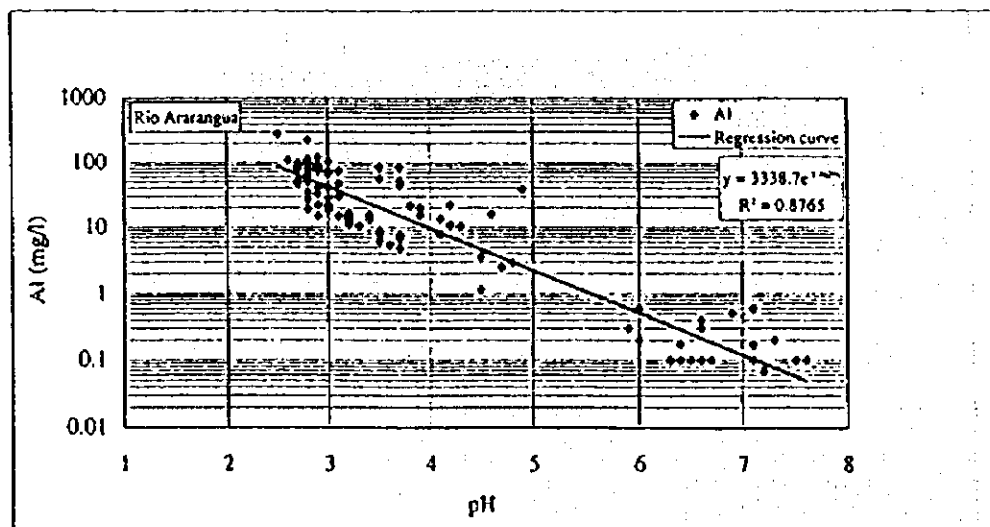
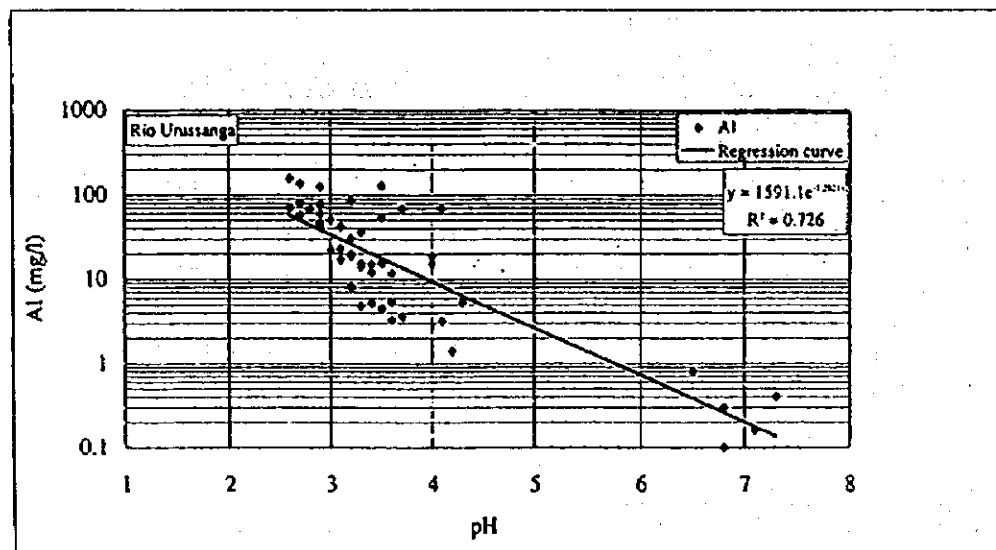
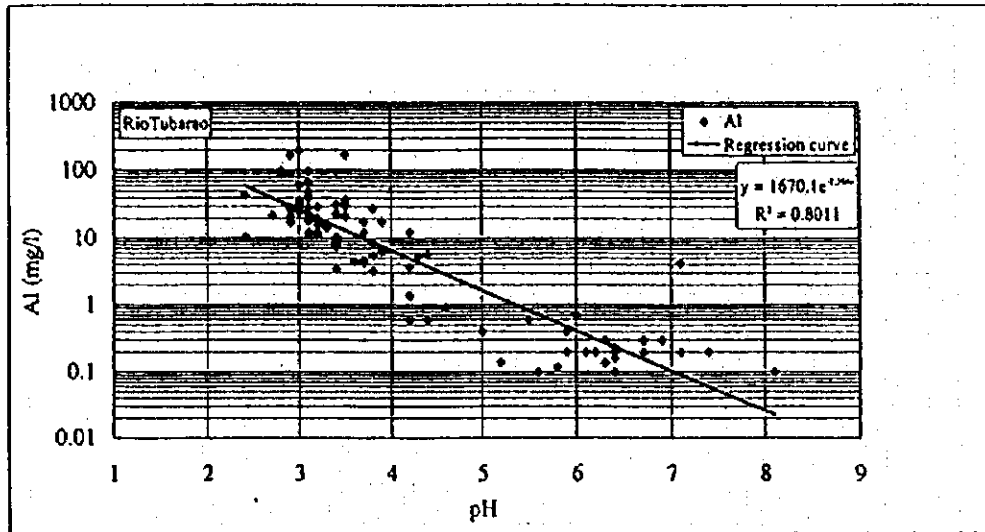


図 B-10 3河川における水質の pH とアルミニウムとの相関

(b) 重回帰分析

15. 単回帰分析の結果に基づいて、pH と強い相関を持つ硫酸イオン、全鉄、アルミニウムを対象として、pH を目的変数とした重回帰分析を河川および FS サイト (Fiorita および Rocinha) 別に実施した。重相関係数 R-2 値、pH の予測値に対する標準偏差、回帰曲線式を表 B-3 に示す。重回帰式はいずれも R-2 値が 0.770~0.915 の範囲にあり、3 説明変数の中でアルミニウムが最も大きな寄与率を示していた。アルミニウムは土壤中に水酸化物、硫化物、フッ素化合物、有機物、高分子ポリマー等の形で大量に含まれており、土壌の酸性化に敏感に反応して溶出するため酸性雨の指標物質として知られている。硫酸イオンおよび鉄は黄鉄鉱の酸化分解によって生じたものであり、酸性水の汚染指標物質としては硫酸イオン、全鉄、アルミニウムの 3 項目が適切であると考えられる。

表 B-3
重回帰分析結果

Location	R-2 valu	Regression curve
	deviation	
Tubarao	0.808	$pH = -0.267 \text{Log}[SO_4] + 0.114 \text{Log}[T - Fe] - 1.212 \text{Log}[Al] + 5.461$
	0.624	
Urussanga	0.807	$pH = +0.063 \text{Log}[SO_4] + 0.0095 \text{Log}[T - Fe] - 1.422 \text{Log}[Al] + 5.237$
	0.520	
Aranrangua	0.898	$pH = -0.937 \text{Log}[SO_4] + 0.527 \text{Log}[T - Fe] - 1.169 \text{Log}[Al] + 6.812$
	0.551	
Fiorita	0.770	$pH = -0.108 \text{Log}[SO_4] + 0.043 \text{Log}[T - Fe] - 1.014 \text{Log}[Al] + 4.769$
	0.722	
Rochinha	0.915	$pH = -0.246 \text{Log}[SO_4] + 0.530 \text{Log}[T - Fe] - 1.390 \text{Log}[Al] + 5.091$
	0.506	

3.3 酸性水汚染の実態

16. 河川、地下水、稼動鉱山及び廃止炭鉱の実態を以下に述べる。

(a) 対象3河川

17. 1996年12月から1997年5月までの半年間に渡る水質モニタリング結果に基づき、対象3河川毎に炭鉱排水による影響を検討した。本調査対象地域では概略4～8月が乾期、9～3月が雨期と、2つのシーズンに分かれているが、水質モニタリング結果は両期に亘っており、全体的な傾向をつかむことができる。水質の評価の目安として、ブラジルの水質環境基準値の中でも最も基準の緩やかな Class 4 を用いた。また、底質の評価値としては Bowen (1983) による天然賦存量を用いた。

18. pH : いずれの河川においても最上流部および流域に炭鉱の存在しない支流では pH6～7 で推移しているが、炭鉱の影響を受ける下流の地点では2～4の範囲まで低下し、ほぼ全面的に酸性化が進行している。ブラジルの水質環境基準値は6～9であり、最上流部および一部の支流を除きほぼ全域で基準を大幅に超過している (図 B-11)。

19. 全鉄 : いずれの河川においても最上流域および流域に炭鉱の存在しない支流では全鉄で 4mg/l 以下と低い値であるが、炭鉱の影響を受ける地点ではおおむね 10～100mg/l のオーダーとなり大きく濃度が増加している。中でも Sangão 川の汚染がひどくほぼ全域で 120～190mg/l となっている。ブラジルの水質環境基準値は Dis.Fe で 5mg/l であるが、最上流部を除きほぼ全域で 100 倍のオーダーで基準値を超過している。底質中の全鉄濃度は、最上流域および流域に炭鉱の存在しない支流の濃度と汚染域との間に大きな違いがみられない (図 B-12)。

20. 硫酸イオン: 鉄の場合と同様であり、いずれの河川においても最上流域および流域に炭鉱の存在しない支流では 8～25mg/l と低い値であるが、炭鉱の影響を受ける地点ではおおむね 100～1000mg/l のオーダーにまで増加している。中でも Sangão 川の汚染がひどくほぼ全域で 1000～2000mg/l となっている。ブラジルの水質環境基準値は 250mg/l であるが、最上流域および流域に炭鉱の存在しない支流を除きほぼ全域で数倍から数10倍のオーダーで基準を超過している。底質中では全地点で定量下限値以下であった (図 B-13)。

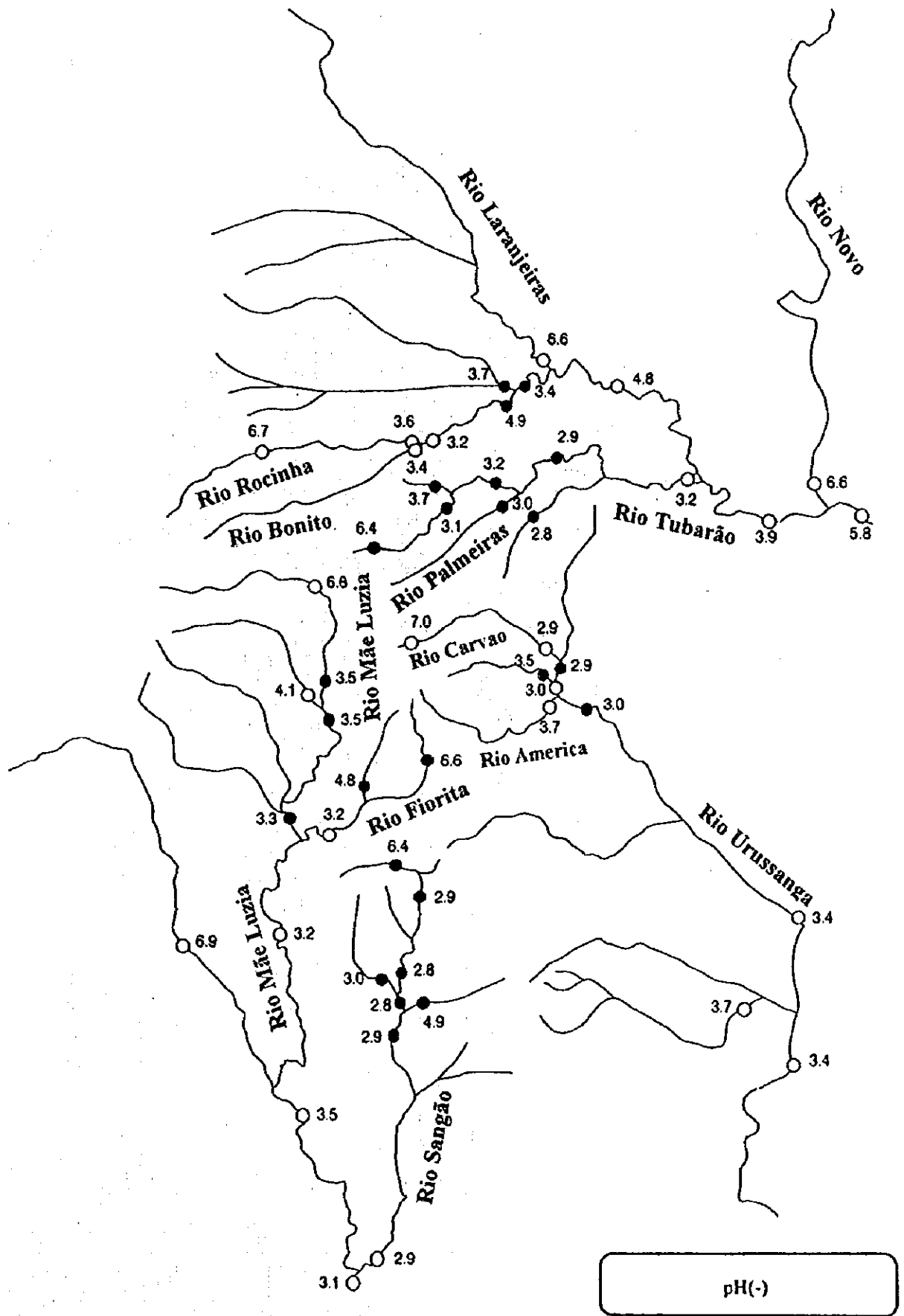


図 B-11 水質モニタリング結果 (pH) (1996年12月~1997年5月)

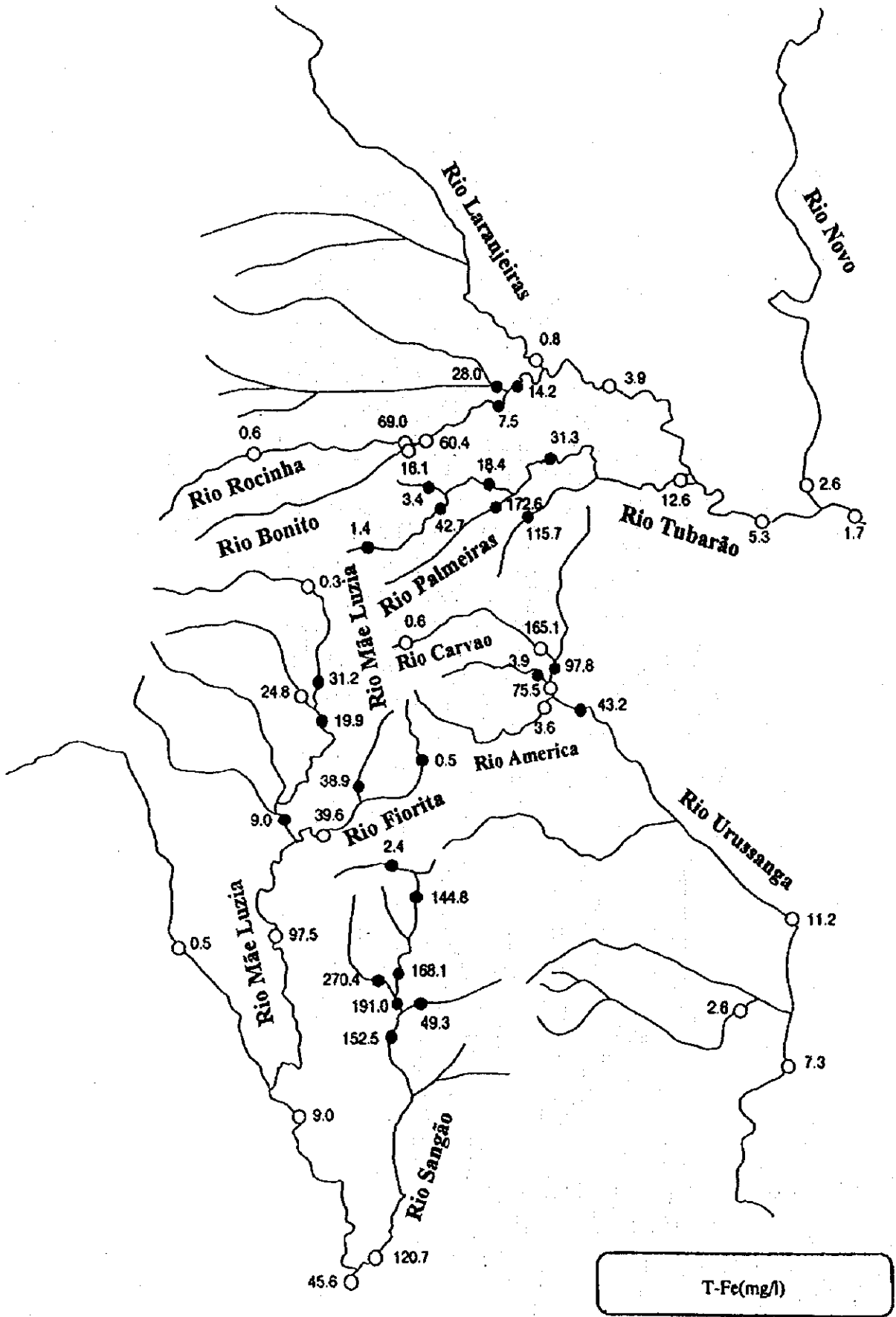


図 B-12 水質モニタリング結果 (全鉄) (1996年12月~1997年5月)

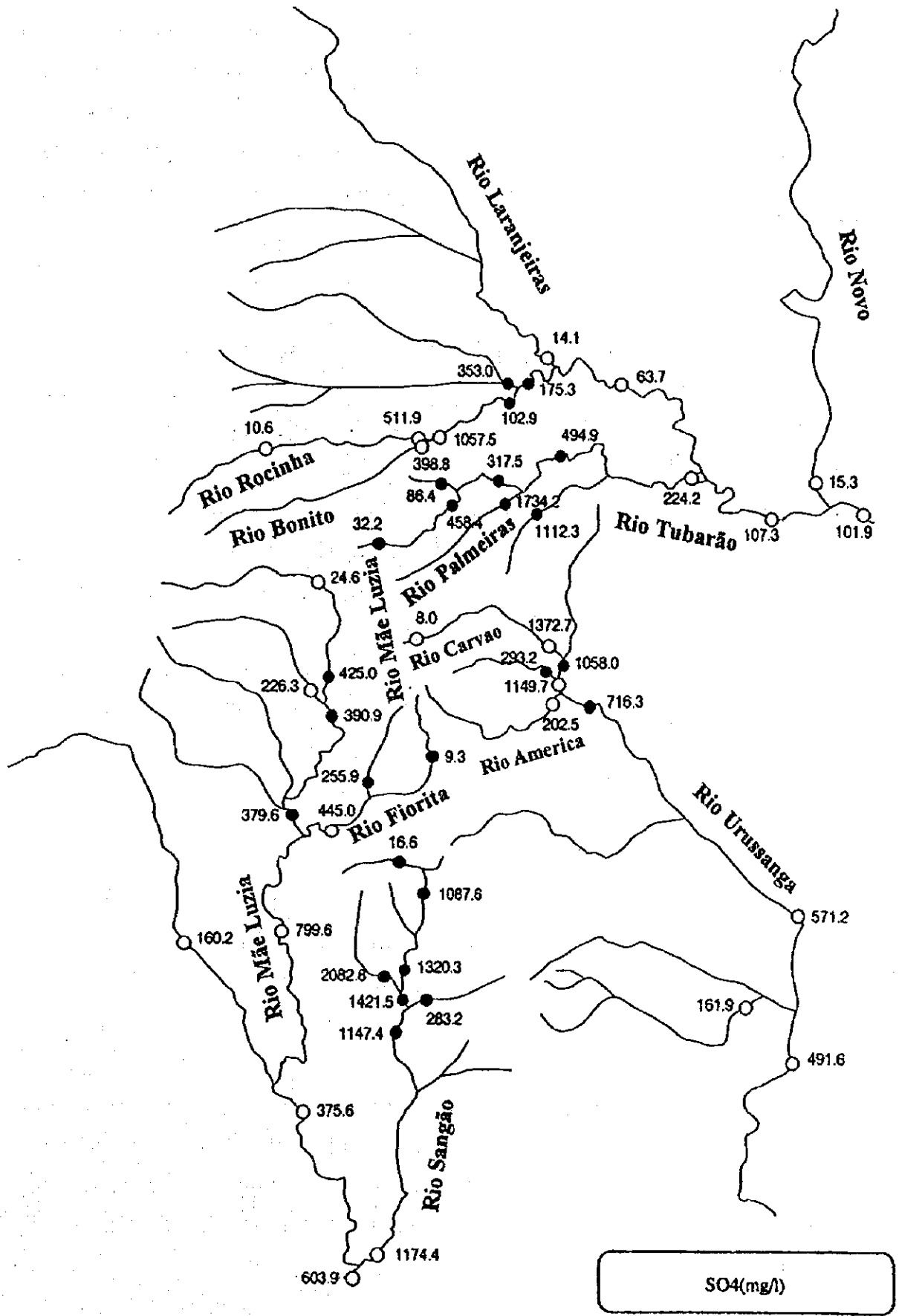


図 B-13

水質モニタリング結果 (硫酸イオン) (1996年12月~1997年5月)

21. アルミニウム: いずれの河川においても最上流域および流域に炭鉱の存在しない支流では $<0.2\sim 0.5\text{mg/l}$ であるが、炭鉱の影響を受ける地点ではおおむね $10\sim 100\text{mg/l}$ のオーダーにまで増加している。中でも Sangão 川の汚染がひどくほぼ全域で $60\sim 100\text{mg/l}$ となっている。ブラジルの水質環境基準では 0.1mg/l であり、最上流域および流域に炭鉱の存在しない支流においても基準を数倍超過するところが多いが、炭鉱地域では $10^2\sim 10^3$ 倍基準を超過している (図 B-14)。

22. 重金属類: 水質については、鉛 (Pb)、クロム (Cr) はいずれの河川においても鉱山域で濃度が増加している。鉛は最上流部を除いてほとんどの地点でブラジルの水質環境基準 (0.05mg/l) を超過している。クロムは Sangão 川流域では平均で $0.13\sim 0.64\text{mg/l}$ と高濃度で検出されており、ブラジルの水質環境基準 Cr^{3+} で 0.5mg/l を超過している。マンガン (Mn) は、いずれの河川においても炭鉱地域で濃度が増加し、ブラジルの水質環境基準値 0.5mg/l に対し約10倍のオーダーで基準を超過している。亜鉛 (Zn) および銅 (Cu) は、いずれの河川においても炭鉱地域で濃度が増加しているが、おおむねいずれの地点も基準値 (亜鉛 5mg/l 、銅 0.5mg/l) を超過していない。ヒ素 (As)、カドミウム (Cd)、水銀 (Hg) はいずれの河川においてもほとんど検出されていない。カドミウムについては、ブラジルの水質環境基準は 0.001mg/l であるが、定量下限値が 0.002mg/l であり、基準超過状況は不明な測点が多い。底質中の重金属濃度はいずれの河川においても炭鉱地域で濃度が急激に増加するが、天然賦存量と比較すると、どの重金属も通常の濃度範囲内かそれ以下である。

(b) 地下水の汚染実態

23. 降水量月平均値と地下水位については、いずれの測点も明瞭な関係はみられず、地下水位は大きな変動がなかった (図 B-15 (a))。pH は各測点ともに大きな時系列変動はない (図 B-15 (b))。Florita、Rocinha、Capivari の F S サイト内の測点は平均 pH で $2.5\sim 3.7$ であり、廃棄鉱山におけるボタが表層水だけでなく地下水にも大きな影響を与えている。LBG1 の pH は $5.7\sim 6.8$ とほぼ正常な値である。LBG1 はボタの上に表土を数 10cm 被覆し修復された場所であり、対象地域内で多くみられる修復方法である。この修復地の地下水が正常な pH であることは、単に表土を被覆しただけでも地下水の酸性化がある程度防げることを示している。図 B-15 (c) は導電率の変化であるが、いくつかの測点で1月および2月の降水期に値が低下する傾向がうかがわれる。これは降水による汚染地下水の希釈が起こっている可能性を示している。

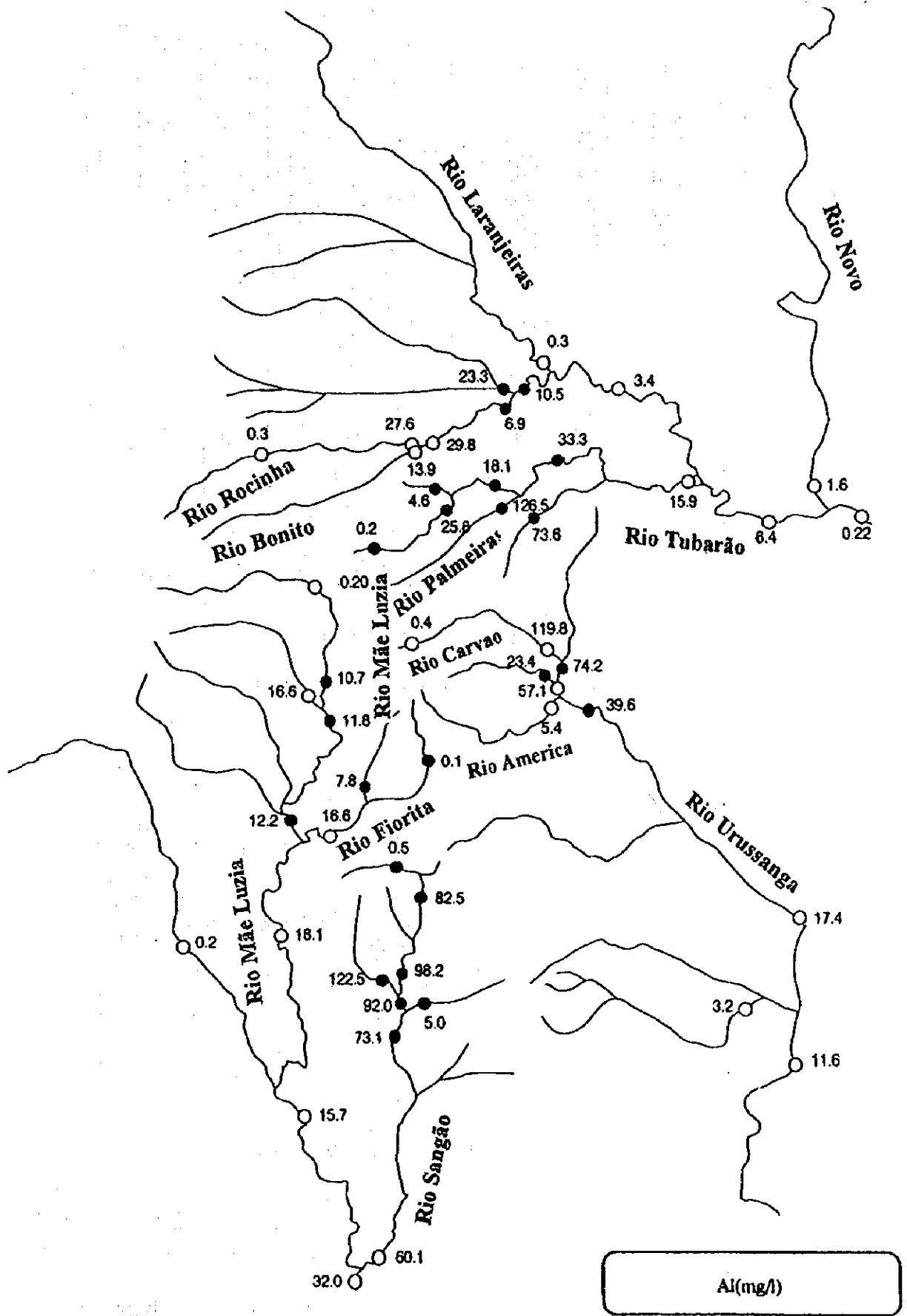


図 B-14

水質モニタリング結果 (アルミニウム) (1996年12月~1997年5月)

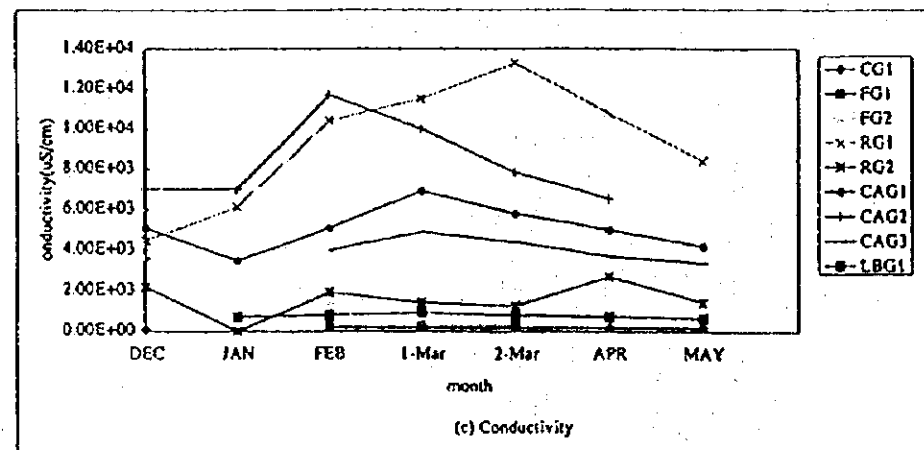
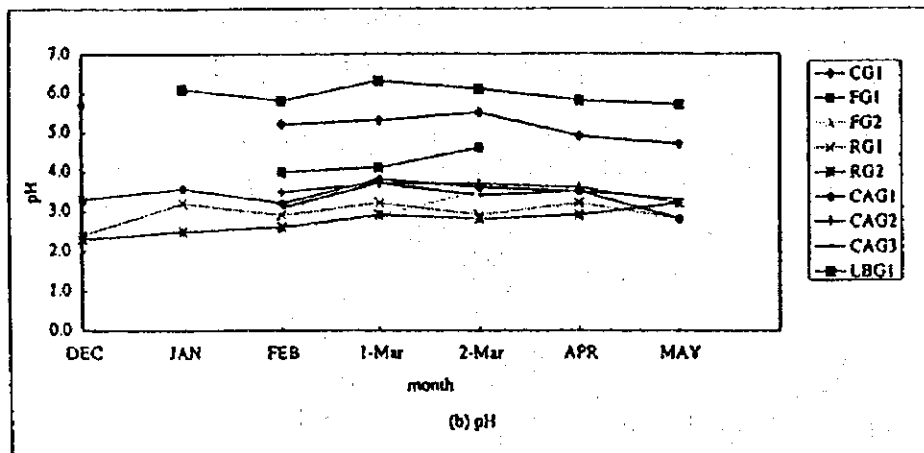
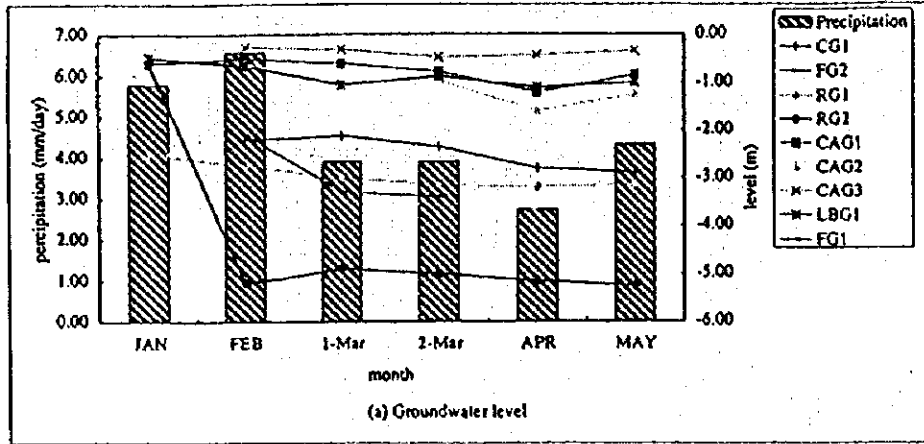


図 B-15 地下水の水位、水質の変化

(c) 稼働鉱山の水質汚濁特性

24. 2月、3月、6月に実施した稼働炭鉱7ヶ所の排水の平均値をブラジル、日本、米国、米国輸出入銀行、世界銀行の排水基準と比較した。pH、浮遊懸濁物質、全鉄、亜鉛、マンガン、硫酸イオン等の項目で各国の排水基準を超過しているが、特にpH、全鉄、硫酸イオンが著しく超過しており、全鉄および硫酸イオンについては10~103のオーダーで高い値となっている。浮遊懸濁物質に関しては、若干基準を超えているが、著しく高い値ではない。これは大部分の炭鉱が沈殿池を経由して排水していることから、沈殿池が排水の浮遊懸濁物質減少の機能を果たしていることによると考えられる。

(d) 廃棄鉱山の水質汚濁特性

25. 平均値に基づく4ヶ所のFSサイトにおける酸性水汚染状況は以下の通り。

26. **Fiorita:** Fiorita川本流 (JA4-FS9) の最上流地点JA4ではpH6.7と酸性水汚染はみられないが、流下するに伴ってpHが低下し最終地点FS9では3.3まで低下している。JA4からFS9までの区間内での支流ではFS1からの流入水の汚染度が高い。また沈殿池内での負荷もかなりあると推定される。pH以外の指標についても傾向はほぼ同様である。FS5からFS10までの水系では最上流部のFS5ではpH6.1と汚染はまだ進行していないが、それ以外の測点はすべてpH2~3のオーダーである。支流ではFS6およびFS12の汚染度が高い。

27. **Rocinha:** Rocinha川本流 (PT4-RS11) の最上流地点PT4ではpH6.9と酸性水汚染はみられないが、流下するに伴ってpHが低下し最終地点RS11では3.4まで低下している。区間別の負荷量をみると、RS11ではRS10に比べ各指標物質で1~3オーダー高い値となっている。RS10-RS11区間で最大の負荷源はRS9であり、区間内の他の支流に比べて1~3オーダー高い負荷量を示している。RS9以外の他負荷源についても負荷量は大きく、この区間がRocinha最大の汚染域であるといえる。

28. **Carvão:** 坑内水の排出口CS1とその下流CS2の水質はほぼ同様であり、CS1からCS2までの流下過程における負荷はない。CS3は当サイトのコントロールポイントであり、他の測点の数値に比べ2~4オーダー低く、汚染は認められない。MC4は稼働炭鉱の沈殿池排水であり水質はCS1よりも劣悪である。また、Carvão川の測点CS5のpHは2.4であり他の項目についてもCS1の水質よりも汚染が進んでいる。

29. Capivari: サイトの最上流部 PT16 の pH は 5.9 であり、他の指標項目の濃度も低く坑廃水による汚染は認められない。CAS2 の水質もおおむね PT16 と同様である。しかし、CAS3 では pH は 3.2 まで低下し、他の指標項目の濃度も 2~3 オーダー高くなっている。CAS2-CAS3 間の汚染は主に沈殿池からの酸性水のしみ出しによるものと考えられる。CAS4 の pH は 3.1 であり CAS3 と同程度であるが、他の指標物質の濃度は CAS3 の 2 倍程度高く、CAS3 よりも酸性水汚染が進んでいる。CAS4 は沈殿池周辺のボタを通過する表流水と沈殿池からの酸性水のしみ出しが汚染源である。サイトの最終流出地点 PT14 は pH が 3.6 であり、CAS3 および CAS4 の pH よりも良好である。他の指標項目についても CAS3 および CAS4 よりも明らかに濃度が低い。PT14 付近は広大な湿地帯であり、植物を起源とするフルボ酸等の有機酸の流入も考えられることから、CAS3 および CAS4 の合流地点から PT14 までの区間で何らかの水質浄化作用が存在している可能性がある。

4. 水質改善効果の予測・評価

30. Fiorita および Rocinha については、周辺の複数の廃棄炭鉱から直接あるいは支流を通して汚濁物質が流入するという複雑な汚染機構を有していることから、降水による影響を考慮した連続式、質量保存式による数値シミュレーションモデルにより予測を行った。Carvão および Capivari については、汚染源が 1ヶ所の坑内水およびポンドであり、汚染メカニズムが比較的単純であることから、完全混合式による予測を行った。

4.1 Fiorita および Rocinha における水質改善効果の予測・評価

(a) シミュレーションモデルの概要

31. シミュレーションモデルは流量モデルおよび水質モデルからなり、流量モデルはボックスモデルを用いて、降水量および集水域データから河川流量を再現した。水質モデルは流量モデルに各負荷源からの人為負荷量（廃棄炭鉱および稼働炭鉱）および自然負荷を乗せて現況水質を再現した。

32. 流量シミュレーション: 流量モデルの基本式は以下の通り。

$$\frac{dV}{dt} = Q_x + Q_i - Q_o + Q_p$$

ここで、

- V : ボックス容量
- Q_w : 上流の流量
- Q_i : 集水域からの流入
- Q_o : 流出水量
- Q_p : ボックス内発生水量

33. 計算はタイムステップを1日とし Runge-Kutta 法によって計算した。ボックス区分は図 B-16 に示す通りとした。流量計算結果の例として、Fiorita および Rocinha の最終流出地点 (Fiorita : FS9 および FS10 の合流点、Rocinha : RS11) における年間の流量計算結果を図 B-17 および 図 B-18 に示す。

流量モデルの検証として、流量観測を実施した月毎に実測値と月内の流量計算値との対応をみた結果を図 B-19 および図 B-20 に示す。実測値はおおむね予測流量の変動幅の内に収まっており、本流量モデルは現況の流量を十分再現している。

34. 水質シミュレーションモデル: 水質モデルの概念を図 B-21 に示す。シミュレーションの対象は、回帰分析の結果から pH の指標物質として抽出された硫酸イオン、全鉄、アルミニウムとした。pH への換算については、pH と指標物質との重回帰式を用いた。ボックス内の物質収支は次式で表される。

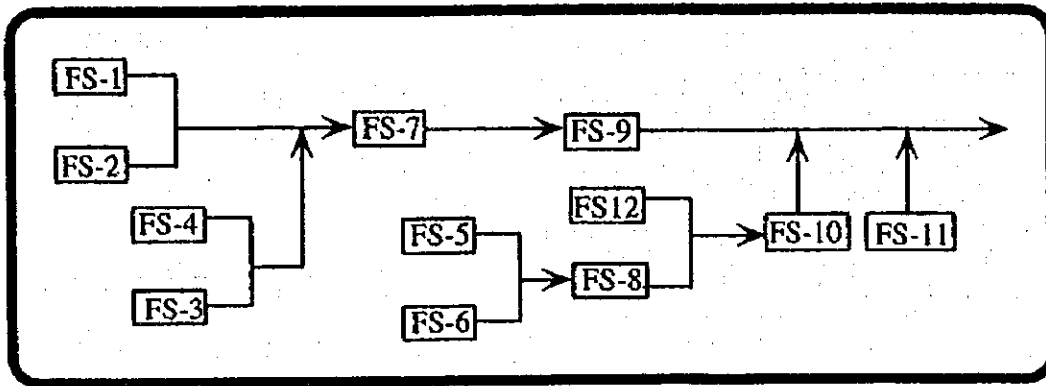
$$C_i = \frac{1}{Q_i} \{ Q_{i-1} C_{i-1} + (Q_N - \sum Q_{iC} - \sum Q_{iB}) C_N + \sum Q_{iC} C_{iC} + \sum Q_{iB} C_{iB} \}$$

ここで、

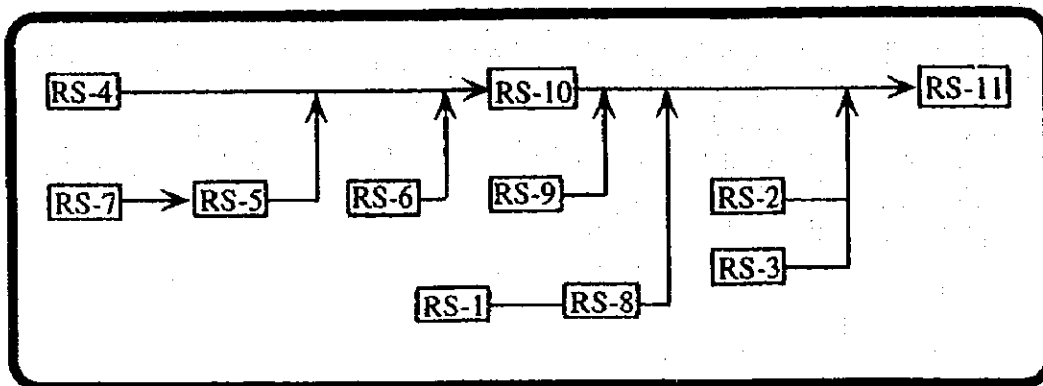
- C_i : ボックス内の物質濃度
- C_N : 流域最上流のコントロール濃度
- Q_N : 集水域からの流量
- $\sum Q_{iC} C_{iC}$: 稼働炭鉱からの負荷量
- $\sum Q_{iB} C_{iB}$: 廃棄炭鉱からの負荷量

35. Fiorita では2つの水系のFSサイト最終流出地点FS9 およびFS10、Rocinha では最終流出地点RS11 およびその上流のRS10 について、各項目の実測値と計算値を比較してモデルの検証を行った (表 B-4 および表 B-5)。Fiorita については概ね良好な再現状況となっている。Rocinha については Fiorita に比べてやや再現性が悪い場合がみられるが、年間平均値としては現況を十分に再現している。

Fiorita FS Site



Rocinha FS Site



Legend

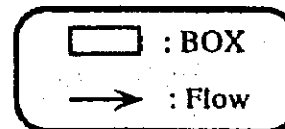


図 B-16 シミュレーションのボックス区分

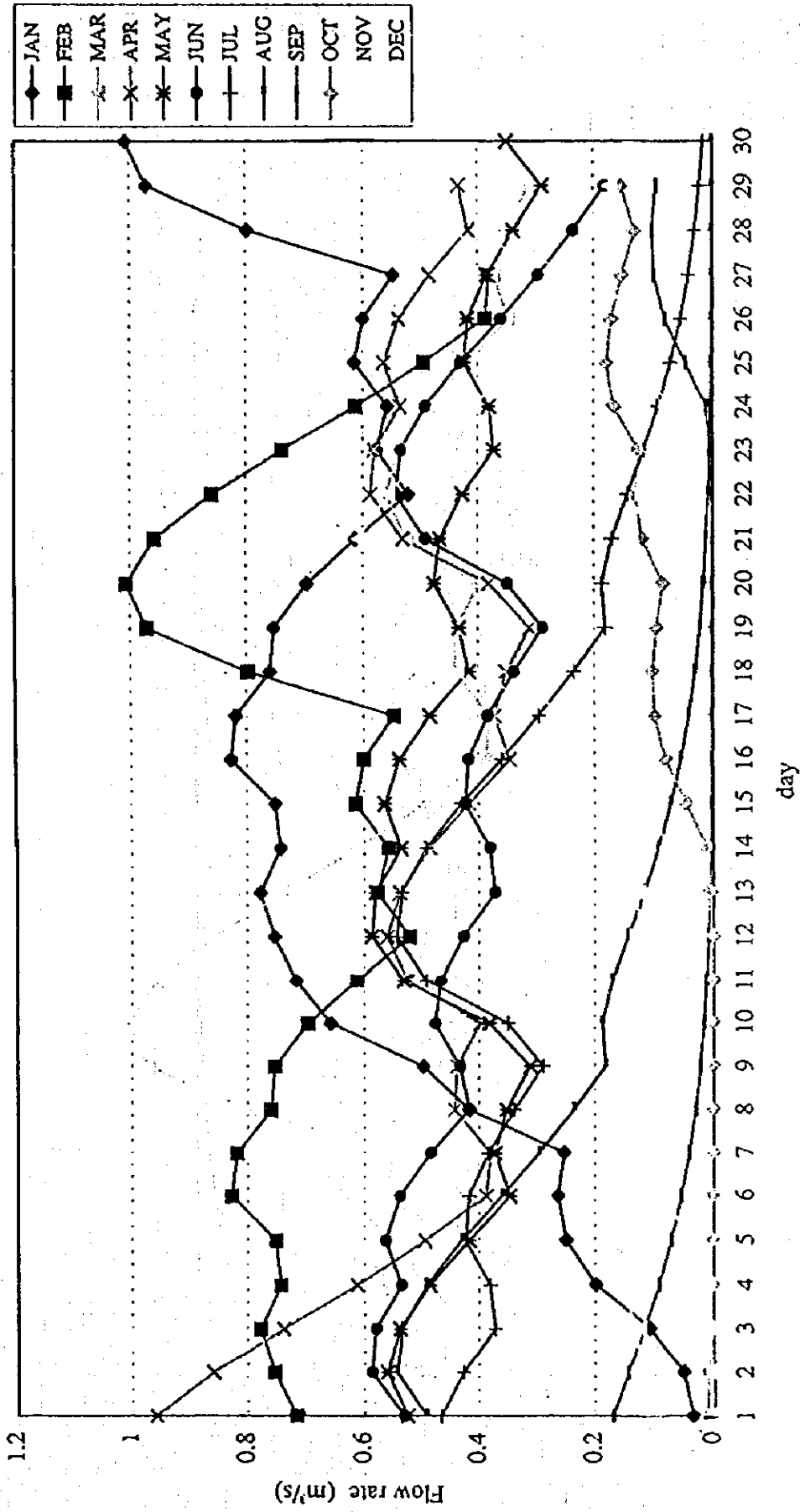


図 B-17
Fiorita 最終流出地点 (FS9 および FS10 の合流点) における流量計算結果

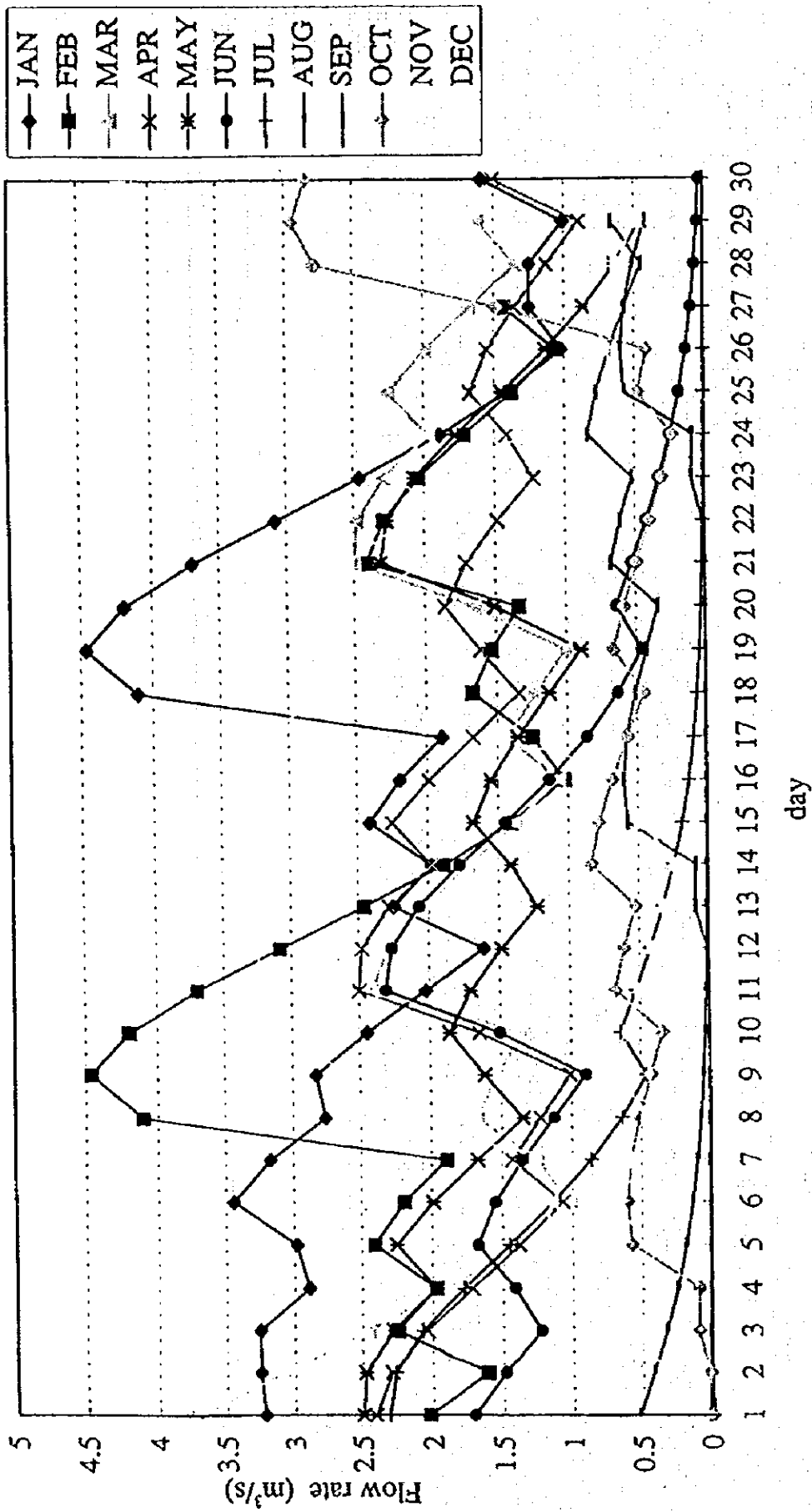
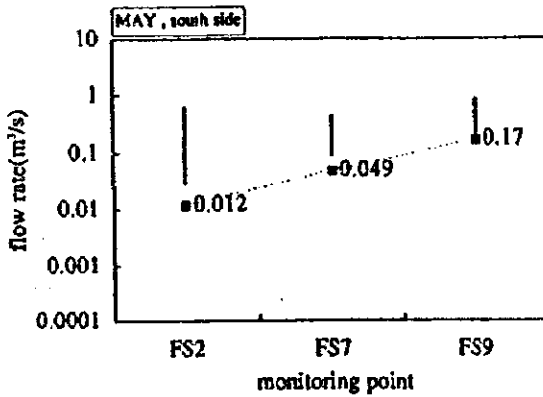
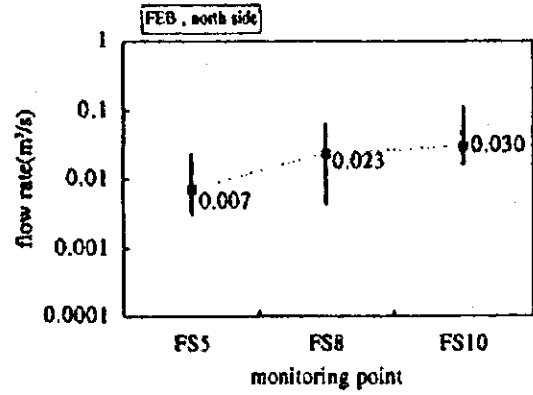
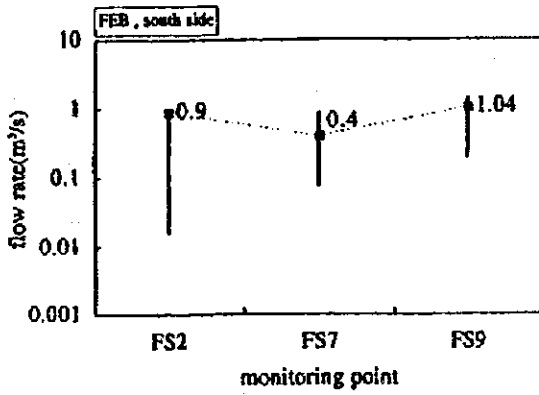
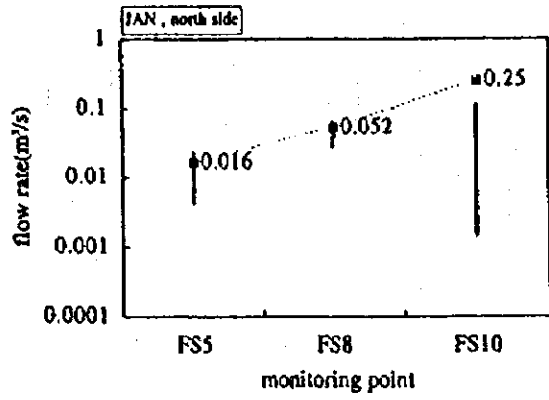
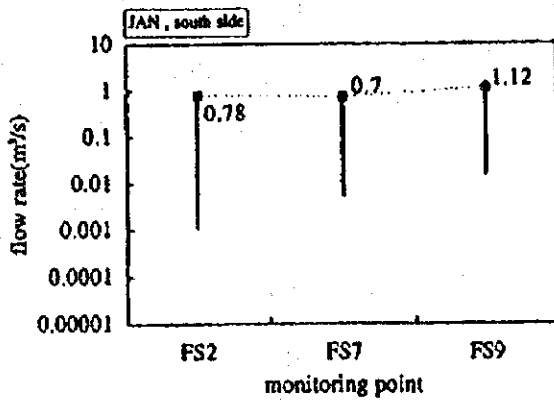
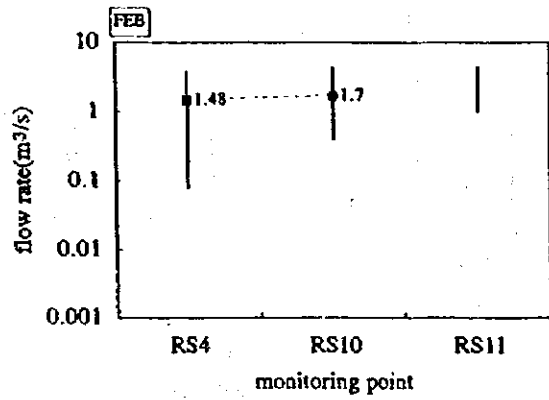
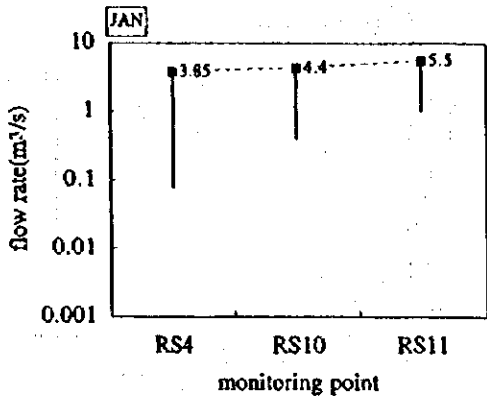


図 B-18 Rocinha 最終流出地点 (RS11) における流量計算結果



| : range of simulation result
 ...■... : measurement value

図 B-19 流量実績値と流量計算との比較(Fiorita)



*RS11: no date

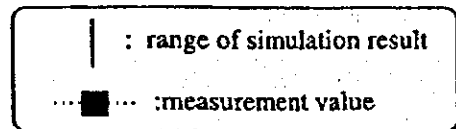
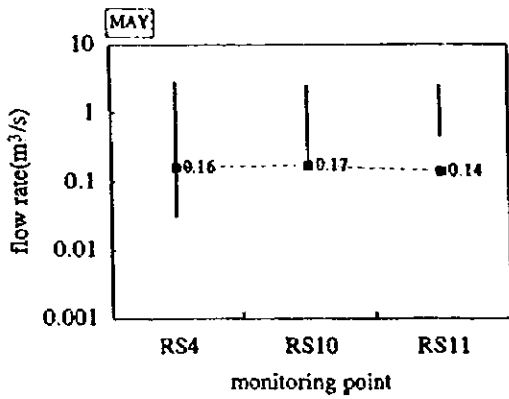


図 B-20 流量実績値と流量計算との比較(Rocinha)

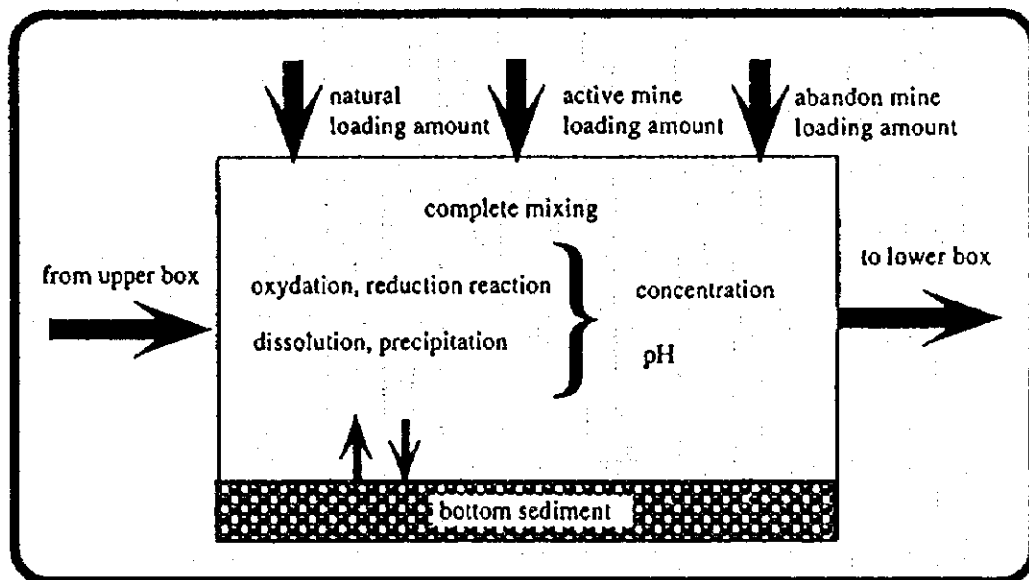


図 B-21 ボックス内の物質収支概念図

表 B-4
FS9 および FS10 における実測値と計算値の比較(Fiorita)

	UNIT	FS9					FS10				
		DEC	JAN	FEB	MAY	Average	DEC	JAN	FEB	MAY	Average
measurement value	mg/l	3.3	4.0	3.5	3.4	3.55	2.5	2.8	2.6	2.9	2.7
simulation result	mg/l	3.3	3.8	3.8	3.3	3.55	2.4	2.7	2.6	2.4	2.5

	UNIT	FS9					FS10				
		DEC	JAN	FEB	MAY	Average	DEC	JAN	FEB	MAY	Average
measurement value	mg/l	299.4	101.8	75.8	401.0	219.5	1876.0	616.0	163.0	1462.0	1029.3
simulation result	mg/l	218.3	144.4	129.9	428.1	230.2	1320.5	1009.6	834.9	1262.0	1106.7

	UNIT	FS9					FS10				
		DEC	JAN	FEB	MAY	Average	DEC	JAN	FEB	MAY	Average
measurement value	mg/l	1.6	1.0	2.3	1.8	1.7	131.4	41.3	22.6	140.5	83.9
simulation result	mg/l	2.8	1.9	1.9	2.8	2.4	97.0	64.2	51.6	109.5	80.6

	UNIT	FS9					FS10				
		DEC	JAN	FEB	MAY	Average	DEC	JAN	FEB	MAY	Average
measurement value	mg/l	11.5	4.9	3.1	14.7	8.6	132.4	62.8	31.9	93.3	80.1
simulation result	mg/l	7.6	6.0	5.7	11.7	7.8	96.2	66.2	54.0	107.4	80.9

表 B-5
RS10 および RS11 における実測値と計算値の比較(Rocinha)

	UNIT	RS10					RS11				
		DEC	JAN	FEB	MAY	Average	DEC	JAN	FEB	MAY	Average
measurement value	-	4.3	5.9	5.4	3.9	4.9	3.2	3.2	3.4	3.2	3.2
simulation result	-	4.7	4.3	4.1	4.6	4.4	3.0	3.2	3.0	3.3	3.1

	UNIT	RS10					RS11				
		DEC	JAN	FEB	MAY	Average	DEC	JAN	FEB	MAY	Average
measurement value	mg/l	75.6	290.0	46.7	206.1	154.6	160.0	740.0	325.7	869.5	523.8
simulation result	mg/l	84.3	295.6	289.2	130.0	199.8	398.7	1032.3	994.7	538.6	741.1

	UNIT	RS10					RS11				
		DEC	JAN	FEB	MAY	Average	DEC	JAN	FEB	MAY	Average
measurement value	mg/l	5.2	2.5	4.0	12.1	5.9	126.7	141.6	13.4	144.2	106.5
simulation result	mg/l	5.2	10.6	9.6	6.4	7.9	94.2	185.7	177.1	115.0	143.0

	UNIT	RS10					RS11				
		DEC	JAN	FEB	MAY	Average	DEC	JAN	FEB	MAY	Average
measurement value	mg/l	2.1	0.5	0.3	6.7	2.4	39.4	77.2	6.2	51.0	43.5
simulation result	mg/l	1.9	5.4	5.2	2.6	3.8	31.5	75.0	72.9	41.7	55.3

(b) 予測結果

36. 方法：水質改善効果の予測・評価：各汚染源に対し復旧工事を実施した場合の水質改善効果を予測・評価した。復旧工事による負荷量削減効果については、FS サイト内の現況の負荷量を一律に削減したケースを想定した。削減率は以下の3ケースとした。

- ・ case1 : 90%削減
- ・ case2 : 50%削減
- ・ case3 : 25%削減

37. 予測式は、以下の通り。

$$C_i = \frac{1}{Q_i} \{ Q_{i-1} C_{i-1} + (Q_N - \sum Q_{AC} - \sum Q_{AB}) C_N + \alpha_1 \sum Q_{AC} C_{AC} + \beta_1 \sum Q_{AB} C_{AB} \}$$

ここで、

- α_1 : 対策をとった際の稼働炭鉱からの負荷量の低減率
- β_1 : 対策をとった際の廃棄炭鉱からの負荷量の低減率

38. 予測結果：Fiorita における水質改善効果評価地点として、当該サイトにおける2系列の水系の最終地点 FS9、FS10 および両測点の合流地点における pH の改善効果を図 B-22 に示す。FS9 では最終合流点では FS サイト全域からの負荷量を 90%削減すれば 3.5 前後から 4.6 程度まで上昇すると予測される。Rocinha における RS10 および最終地点 RS11 における pH の改善効果を図 B-23 に示す。RS10 では 90%削減では最大 6.0 程度にまで上昇する。しかし、RS10 と RS11 の間に Rocinha 最大の汚染源が存在しているため、RS11 では 90%削減でも最大で 4.0 程度までしか上昇しない。鉄、硫酸イオン、アルミニウムについては、負荷量を 90%削減してもブラジルの水質基準の Class4 の基準をまだ 1 オーダー超過している。各サイトの負荷量を 90%まで削減しても pH が十分に回復しない理由としては、河川水中の pH を決定する硫酸イオン等の物質濃度が極めて高いため、対策によってその大部分が削減されても残存する物質によって pH 値の回復が妨げられていることが考えられる。

4.2 Carvão における水質改善効果の予測・評価

39. 予測方法：予測方法は、坑口 CS1 とその下流沈殿池出口 CS2 の実測値に大きな違いがないことから、CS2、CS3、MC4 の水質および流量実測値を用い、Carvão 川への流入地点 CS4 における水質を完全混合式によった。対策による負荷量削減の対象は CS2 とし

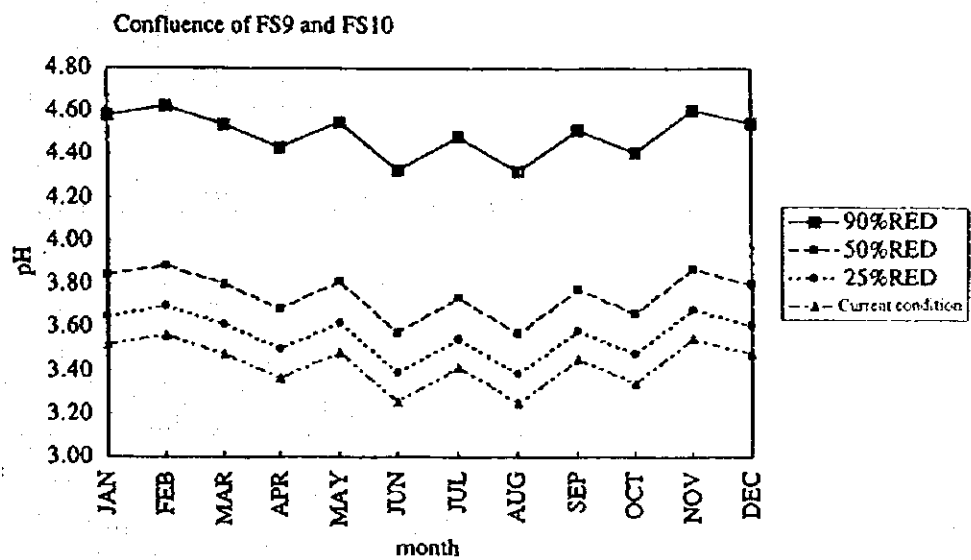
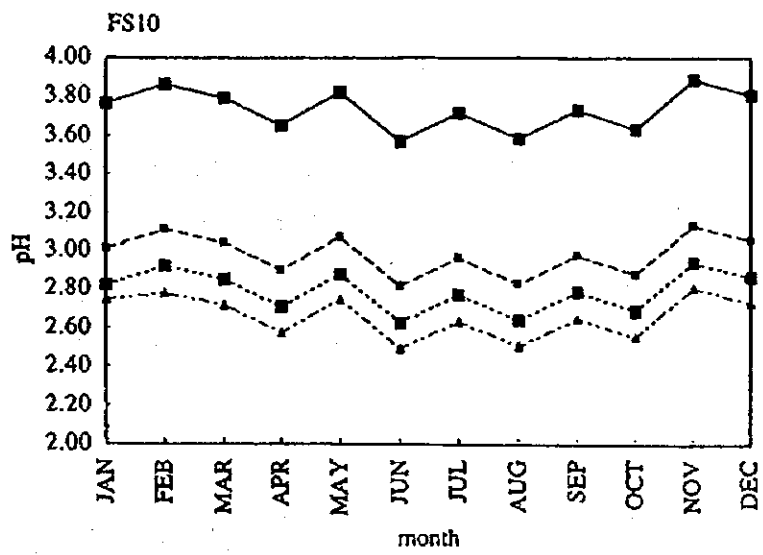
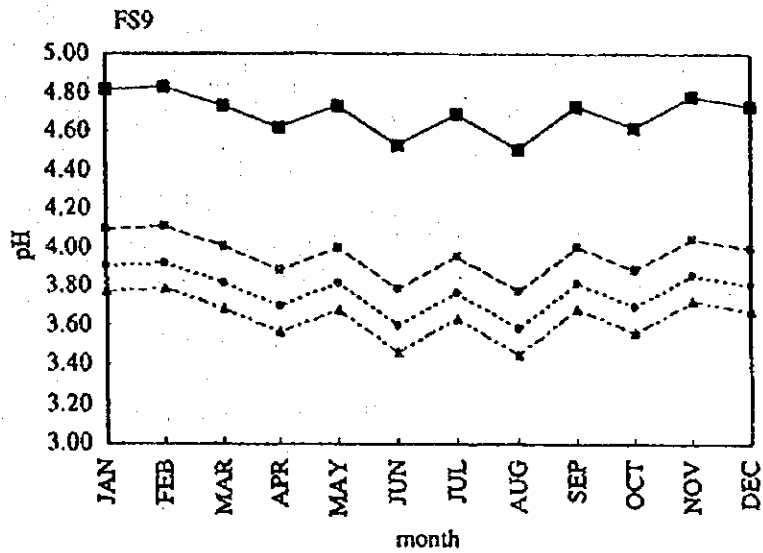


図 B-22

最終流出地点 FS9 および FS10 における水質予測結果 (Fiorita)

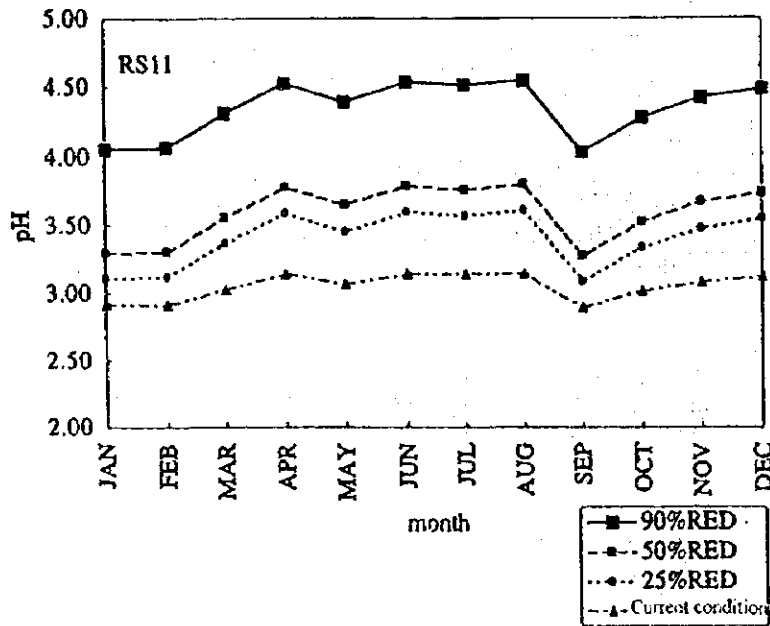
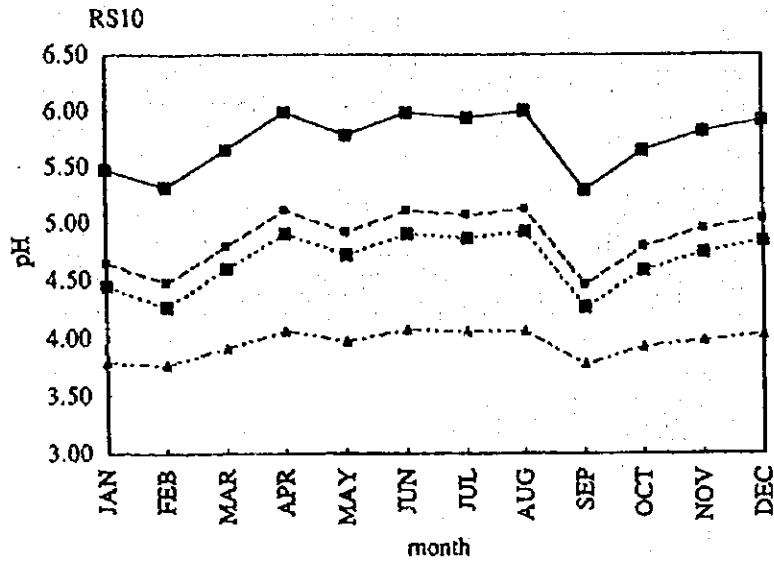


図 B-23

最終流出地点 RS10 および RS11 における水質予測結果 (Rocinha)

た。削減係数は Fiorita および Rocinha と同様の 3 ケースを想定した。予測式を以下に示す。

$$C = \frac{\alpha_1 Q_1 C_1 + Q_2 C_2 + Q_3 C_3}{Q_1 + Q_2 + Q_3}$$

ここで、

C : CS4 の水質 (mg/l)	α_1 : 対策をとった際の負荷量の削減率
C_1 : CS2 における水質 (mg/l)	Q_1 : CS2 における流量 (m ³ /s)
C_2 : CS3 における水質 (mg/l)	Q_2 : CS3 における流量 (m ³ /s)
C_3 : CS4 における水質 (mg/l)	Q_3 : MC4 における流量 (m ³ /s)

40. 予測結果: 計算結果を図 B-24 に示す。対策に伴う削減効果については、90%の削減で現況の pH3.6 から 4.5 程度まで上昇すると予測される。しかしながら、これらの数値はブラジルの水質基準 Class4 pH6~9 を満足していない。硫酸イオン、全鉄、アルミニウムについても基準を大幅に超過している。仮に CS1 の負荷量を 100%削減した場合でも、稼働炭鉄の排水(MC4)の影響が大きいため、CS4 における水質改善効果はあまり大きなものとはならないと推察される。

4.3 Capivari における水質改善効果の予測・評価

41. 予測方法: 予測方法は、最上流の PT16 と CAS3 との負荷量の差を浸出水による負荷量 L1 とし、CAS4 の負荷量を浸出水と酸性表流水による負荷量 L2 とした。対策による削減係数は L1 と L2 の合計量に乘じ、Tubarão 川への最終流出地点 PT14 における水質を完全混合式によって予測した。負荷量の削減率は Carvão と同様である。予測式を以下に示す。

$$C = \frac{\alpha_1 (-Q_1 C_1 + Q_2 C_2 + Q_3 C_3) + Q_1 C_1}{Q_2 + Q_3}$$

ここで、

C : PT14 の水質(mg/l)	α_1 : 対策をとった際の負荷量の削減率
C_1 : PT16 における水質 (mg/l)	Q_1 : PT16 における流量 (m ³ /s)
C_2 : CAS3 における水質 (mg/l)	Q_2 : CAS3 における流量 (m ³ /s)
C_3 : CAS4 における水質 (mg/l)	Q_3 : CAS4 における流量 (m ³ /s)

42. 予測結果: 計算結果を図 B-25 に示す。90%の削減で現況の pH3.7 から 5.1 程度まで上昇すると予測される。90%削減では硫酸イオン濃度はブラジルの水質基準 Class2 硫酸イオン濃度 250mg/l をクリアできるが、全鉄、アルミニウムについては基準を超過している。Capivari の場合、他のサイトに比べ対策による改善効果が見込めそうである。

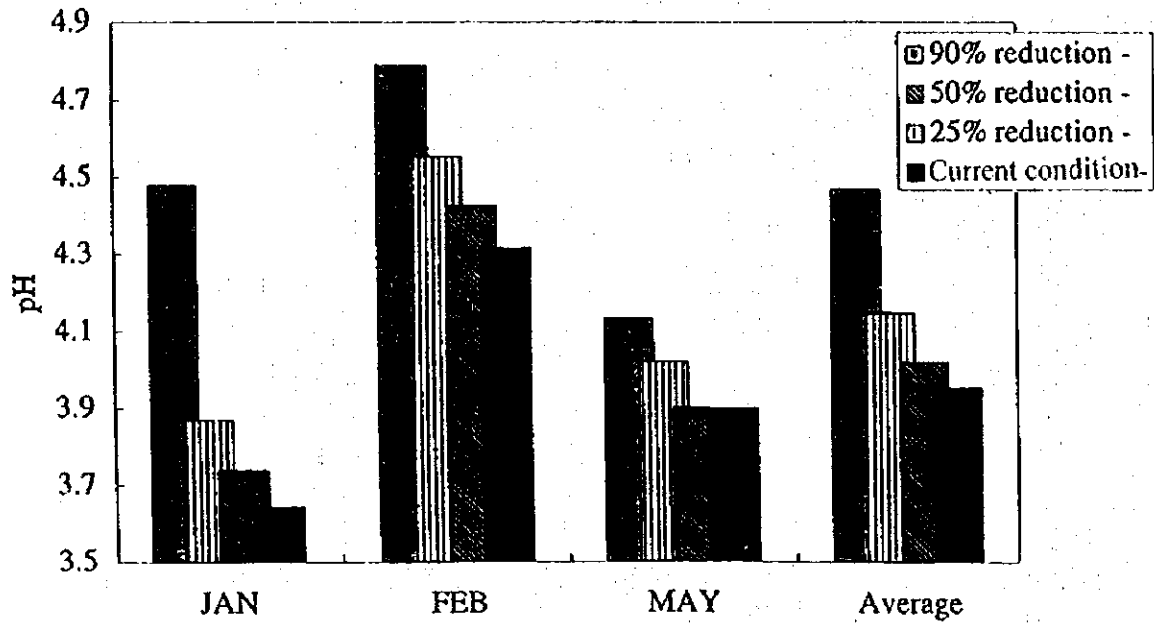


図 B-24 Carvão 最終流出地点における各削減ケース毎の水質改善効果

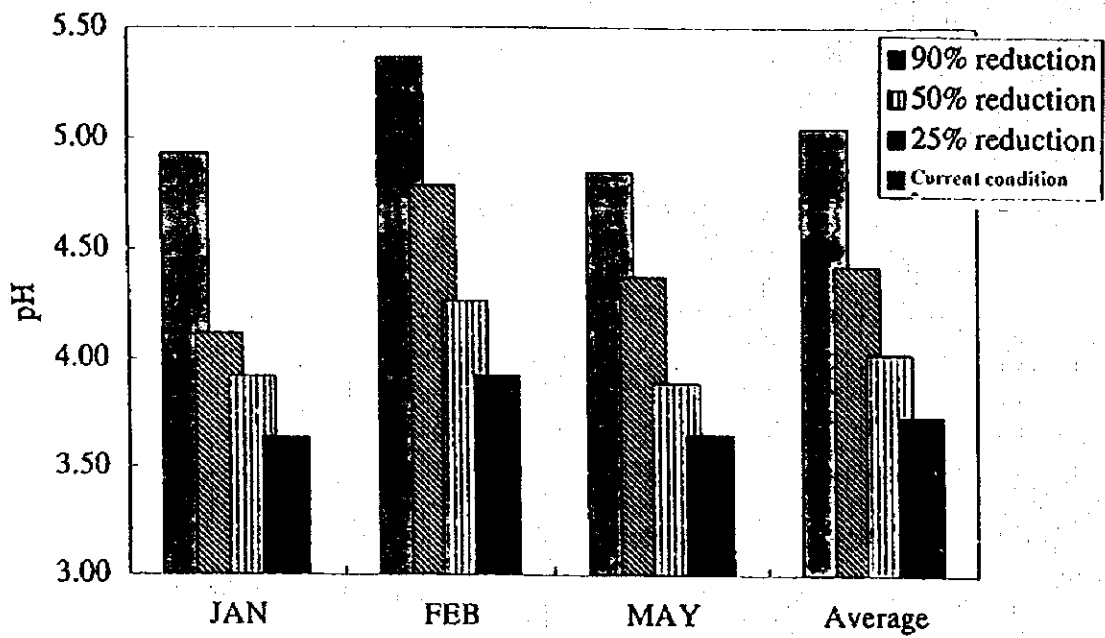


図 B-25 Capivari 最終流出地点における各削減ケース毎の水質改善効果

5. 全体域における水質改善効果の予測・評価

43. Tubarão 川、Urussanga 川、Araranguá 川の上流から下流までのうち、下流部の感潮域を除くほぼ全域を対象として、流域の稼動炭鉱及び廃棄炭鉱に対して環境修復を実施した場合の河川水質の改善効果を予測・評価した。

5.1 シミュレーションモデルの概要

44. 流動モデルは FS サイトの Fiorita および Rocinha に適用したモデルと同様とした。水質モデルについても基本的には Fiorita および Rocinha に適用したモデルと同様である。ただし、河川水中の鉄およびアルミニウムについては pH5.5 付近で急激に水酸化第二鉄および水酸化アルミニウムとして沈殿し水中から除去されることが知られていることから、鉱山汚染のない pH がほぼ中性の河川が本流に流入する地点ではかなりの量の鉄およびアルミニウムが沈殿することが考えられる。したがって、全体域における水質予測ではこれらの金属の沈降・除去過程をモデルに組み込んだ。対象 3 河川のボックス区分を図 B-26 に示す。また、ボックスに流入する稼動鉱山および廃棄鉱山の排水流入位置と負荷料の設定条件を表 B-6 に示す。

(a) 流量シミュレーション

45. 対象 3 河川の最終流出地点における流量現況再現結果を図 B-27 から図 B-29 に示す。各河川とも夏期の雨季に流量が多く、冬期の乾期に流量が低下する状況が再現された。また、主要なモニタリング地点における実測値と流量計算値との対応をみた結果を表 B-7 から表 B-9 に示す。いずれの河川についても実測値はおおむね予測流量の変動幅の内に収まっており、本流量モデルは現況の流量を再現していた。

(b) 水質シミュレーションモデル

46. 水質モデルにおけるボックス内の物質収支は次式の通り。

$$C_i = \frac{1}{Q_i} \{ Q_{i-1} C_{i-1} + (Q_N - \sum Q_{AC} - \sum Q_{AB}) C_N + \sum L_{AC} + \sum L_{AB} \} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

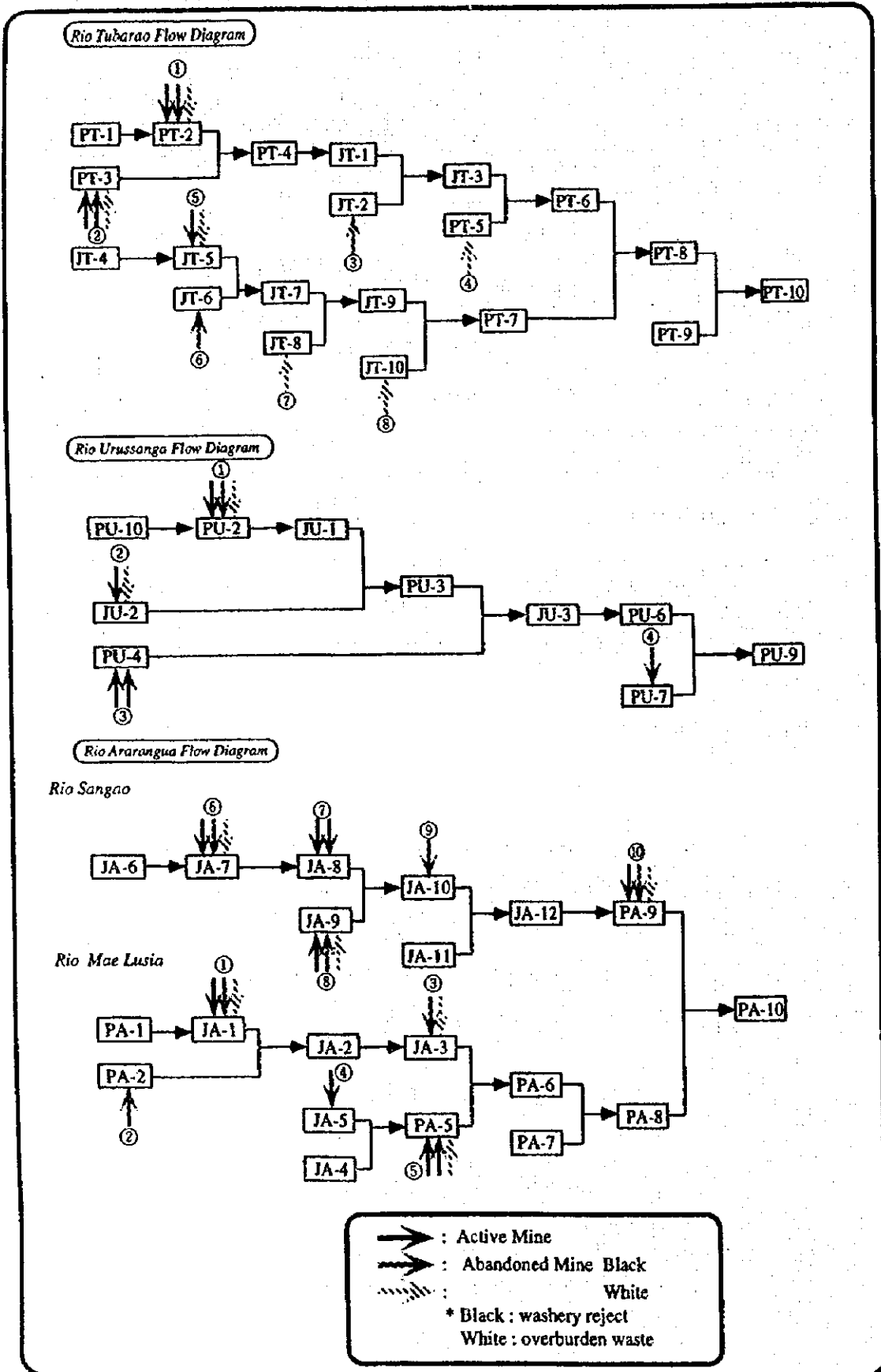


図 B-26 シミュレーションモデルにおけるボックス区分

表 B-6
負荷源の設定条件

No.	Active mine Number of facility	Abandoned mine	
		Black Washery reject	White Overburden waste
		Total Area (ha)	Total Area (ha)
<i>Rio Tubarao</i>			
PT-2	1	1.3	69.3
PT-3	1	8	40.8
JT-2			98
PT-5			59
JT-5		42.7	70.1
JT-6	1	54.1	78.2
JT-8			89
JT-10			294.8
Sum	3	106.1	799.2
<i>Rio Urussanga</i>			
PU-2	3	187.2	247
JU-2	1		7
PU-4	1	38.2	
PU-7		44.8	
Sum	5	270.2	254
<i>Rio Ararangua</i>			
JA-1	2	120.8	118.6
PA-2			110.2
JA-3		28.8	225.8
JA-5	1		
PA-5	3	151	738.6
JA-7	2	76.5	10
JA-8	2	101	
JA-9	2	206.5	45.5
JA-10		147	
PA-9	5	598.4	28
Sum	17	1430	1276.7

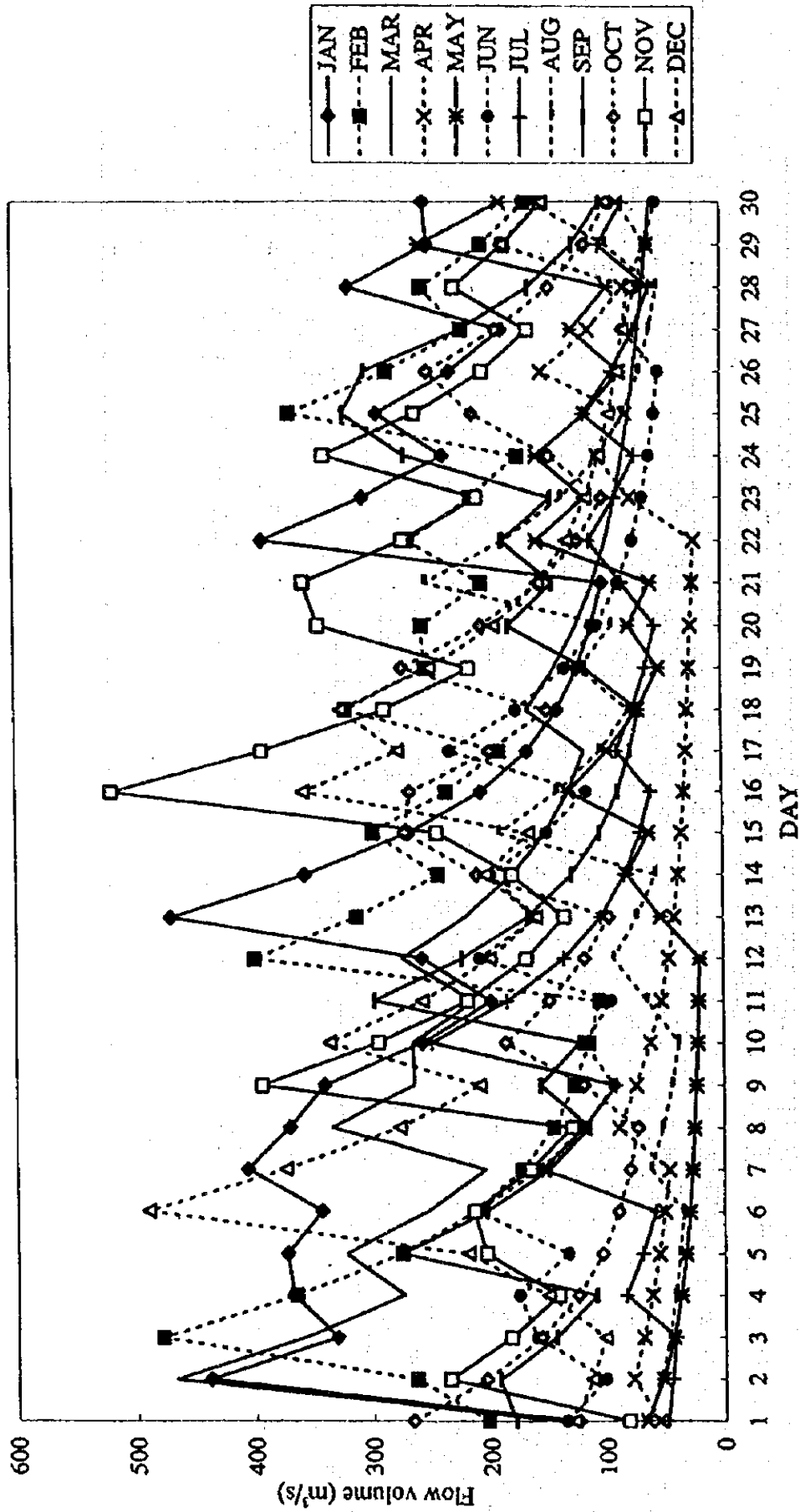


図 B-27 最終流出地点での流量シミュレーション結果 (Rio Tubarao)

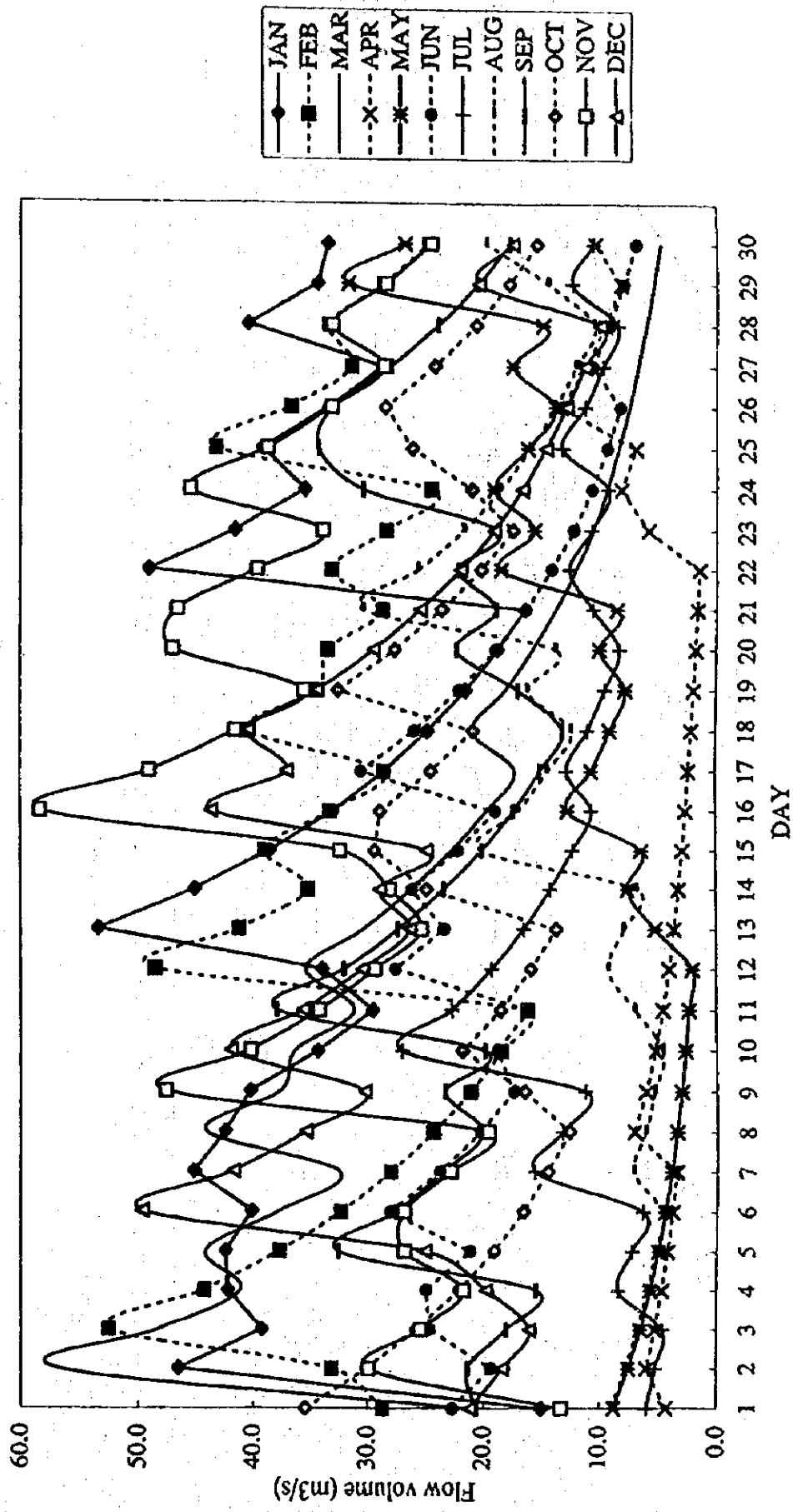


図 B-28 最終流出地点での流量シミュレーション結果 (Rio Urussanga)

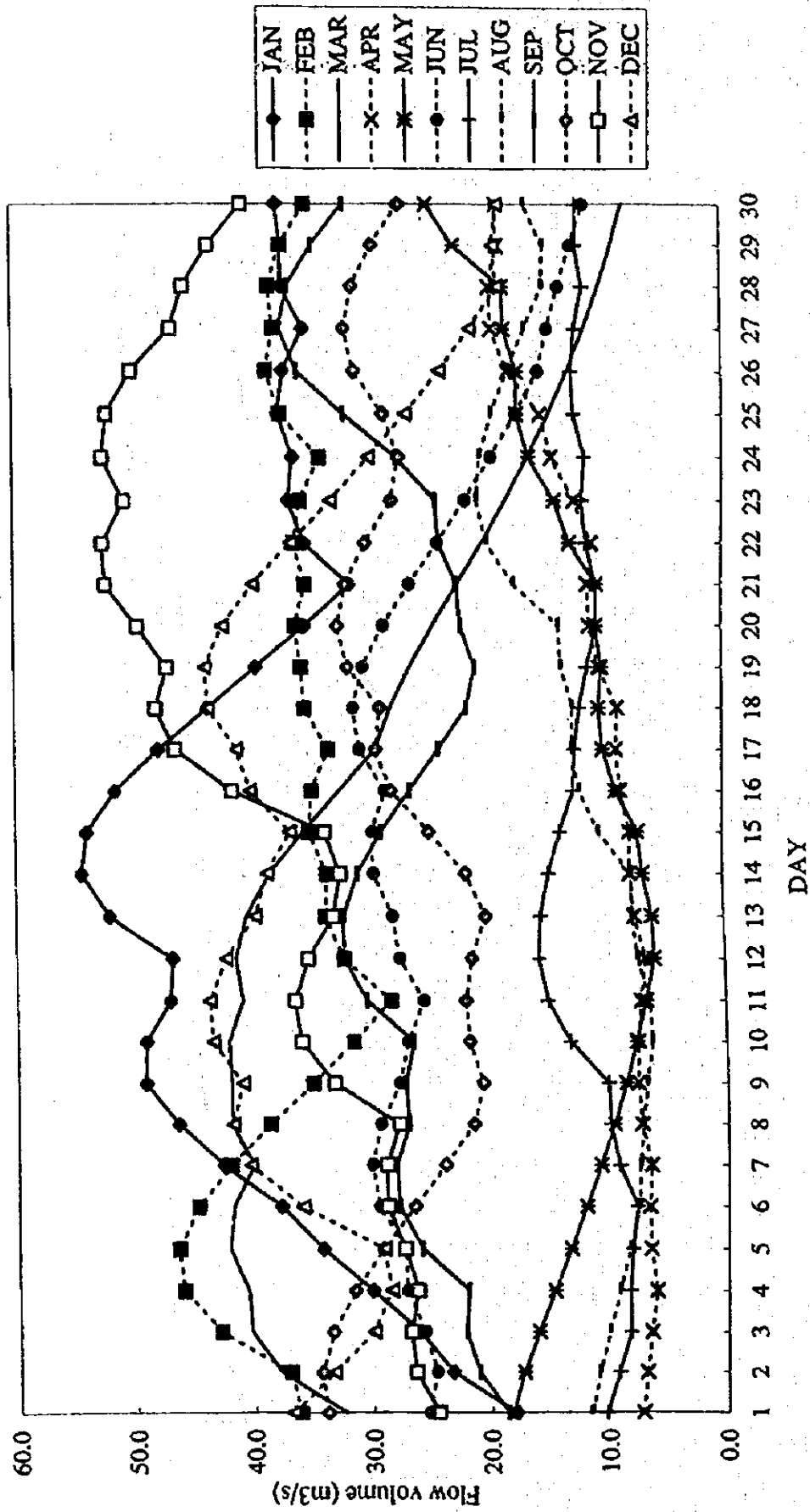


図 B-29 最終流出地点での流量シミュレーション結果 (Rio Ararangua)

表 B-7
流量シミュレーション結果(Rio Tubarão)

		unit: m ³ /s											
Location		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	DEC	NOV	DEC
PT4	Max	10.09	9.70	9.12	1.31	5.77	5.99	4.18	5.30	7.48	6.27	10.70	8.54
	Min	2.68	3.28	0.54	0.10	0.28	1.31	0.78	0.85	2.93	2.66	3.06	1.74
	Average	7.23	6.74	4.83	0.61	1.98	4.19	2.23	2.47	5.10	4.74	7.27	5.54
	Measurement value	-	5.51	1.55	0.53	0.12	-	-	-	-	-	-	-
JT3	Max	12.18	12.53	12.99	7.99	3.65	6.98	6.03	4.88	7.87	8.34	12.07	11.98
	Min	9.85	12.03	8.36	2.60	2.10	3.86	4.53	3.40	4.97	7.82	8.05	10.09
	Average	11.32	12.29	11.71	4.44	2.52	5.94	5.07	4.06	6.66	8.09	9.83	11.48
	Measurement value	-	-	8.40	2.13	3.42	-	-	-	-	-	-	-
PT6	Max	27.41	28.14	29.27	17.19	8.82	14.68	12.43	11.02	16.92	17.91	25.65	25.72
	Min	20.99	25.99	17.95	6.49	5.07	9.23	10.10	7.55	11.33	16.60	16.92	21.41
	Average	25.34	27.54	25.83	10.10	6.15	12.77	11.27	9.22	14.63	17.40	21.52	24.46
	Measurement value	-	-	18.20	5.28	6.40	-	-	-	-	-	-	-
PT7	Max	21.89	21.35	20.03	5.71	12.48	10.31	10.05	11.66	13.93	12.21	25.42	23.17
	Min	2.66	2.66	0.88	0.20	0.34	1.20	0.79	0.76	2.02	1.91	2.37	1.59
	Average	9.66	8.27	5.61	1.41	2.94	4.53	2.91	3.13	6.42	5.88	8.95	6.87
	Measurement value	21.00	9.20	6.27	1.97	-	-	-	-	-	-	-	-
PT8	Max	269.53	279.33	248.26	86.46	143.20	117.46	136.75	140.38	177.43	149.69	330.66	324.37
	Min	38.08	31.47	20.03	7.49	5.76	16.05	13.71	10.57	19.47	21.26	24.23	24.94
	Average	114.79	96.65	67.32	24.35	33.52	47.10	36.83	36.07	71.86	67.59	98.84	82.34
	Measurement value	188.59	41.66	28.58	6.38	5.56	-	-	-	-	-	-	-
PT10	Max	469.60	478.76	467.62	153.09	256.45	232.99	249.84	252.27	321.41	272.47	520.45	490.37
	Min	181.31	105.43	58.85	22.59	19.55	52.12	41.49	34.31	69.71	72.47	81.63	77.28
	Average	273.81	244.42	179.75	59.92	79.42	121.79	92.29	89.54	169.72	162.58	237.37	199.30
	Measurement value	324.17	157.19	205.68	56.63	19.34	-	-	-	-	-	-	-

* Max, Min, Average: Dally average

** Measurement value: Monitoring data

表 B-8
流量シミュレーション結果(Rio Urussanga)

unit: m3/s												
Location	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	DEC	NOV	DEC
PU2												
Max	4.42	4.33	4.06	1.06	2.82	2.32	2.18	2.63	3.07	2.57	5.16	4.37
Min	0.45	0.45	0.08	0.02	0.04	0.20	0.11	0.12	0.40	0.35	0.50	0.21
Average	2.14	1.84	1.22	0.23	0.69	1.09	0.64	0.74	1.51	1.33	2.13	1.52
Measurement value	4.41	2.09	2.76	0.61	0.40	.	.	.	.	.	.	.
PU3												
Max	4.56	4.19	3.97	0.90	2.59	2.65	1.89	2.37	3.23	2.90	4.62	3.81
Min	1.09	1.37	0.30	0.08	0.13	0.53	0.34	0.36	1.17	1.05	1.33	0.71
Average	3.16	2.93	2.12	0.35	0.91	1.80	0.98	1.09	2.21	2.06	3.18	2.41
Measurement value	4.53	.	3.59	1.02	0.99	.	.	.	.	.	.	.
JU3												
Max	10.74	10.21	11.27	2.52	6.30	5.93	5.09	5.94	7.45	7.13	11.38	9.66
Min	2.61	3.03	0.96	0.32	0.38	1.21	0.85	0.83	2.39	2.24	2.57	1.79
Average	6.65	6.15	4.54	1.01	1.93	3.52	2.16	2.31	4.40	4.21	6.38	5.04
Measurement value	10.60	.	5.40	2.38	.	.	.	.	.	.	.	.
PU6												
Max	29.17	28.28	31.15	6.86	17.56	16.91	14.51	16.65	20.94	19.70	31.66	24.52
Min	7.99	8.86	2.19	0.60	1.91	3.61	2.35	2.38	7.41	6.96	7.53	5.20
Average	19.68	18.07	13.17	2.54	5.61	10.40	6.33	6.81	12.96	12.33	18.82	14.75
Measurement value	28.84	20.30	19.01	6.14	1.84	.	.	.	.	.	.	.
PU9												
Max	53.34	52.49	56.91	13.23	31.74	30.51	26.91	30.35	37.93	35.44	58.30	49.66
Min	14.99	16.10	4.76	1.46	2.06	6.81	4.61	4.51	13.07	12.47	13.30	9.89
Average	35.54	32.76	24.03	5.14	10.19	18.55	13.43	12.27	23.16	22.13	33.54	26.64
Measurement value	53.15	53.84	32.54	.	3.90	.	.	.	.	.	.	.

* Max, Min, Average: Daily average

** Measurement value: Monitoring data

表B-9
流量シミュレーション結果(Rio Araranguá)

		unit: m ³ /s											
Location		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	DEC	NOV	DEC
Rio Maehata													
JA1													
	Max	19.57	19.46	15.27	7.85	11.83	9.14	8.25	10.81	12.96	10.03	24.32	20.88
	Min	1.10	1.07	0.10	0.98	0.10	0.47	0.21	0.28	1.03	0.89	1.27	0.46
	Average	7.61	6.21	3.93	2.25	2.59	3.73	2.04	1.49	5.48	4.68	7.54	5.25
	Measurement value	19.00	-	5.01	1.70	0.44	-	-	-	-	-	-	-
JA3													
	Max	11.16	9.43	8.48	4.28	5.44	6.51	3.16	4.64	7.57	7.04	11.25	8.67
	Min	2.52	5.02	0.72	0.48	0.71	1.60	0.97	0.94	3.80	3.51	4.66	2.69
	Average	7.56	7.08	5.41	1.89	2.45	4.94	1.10	2.48	5.57	5.37	7.99	6.45
	Measurement value	-	-	7.56	0.79	0.39	-	-	-	-	-	-	-
PA8													
	Max	71.51	65.94	54.25	29.43	39.44	36.97	25.70	33.48	52.41	40.93	74.89	64.01
	Min	11.44	10.67	1.61	1.33	1.53	4.76	2.40	2.65	9.14	8.28	11.54	5.68
	Average	38.90	32.35	21.90	10.34	12.43	20.60	10.04	11.70	27.72	24.52	37.88	28.01
	Measurement value	45.88	44.80	49.22	3.71	1.22	-	-	-	-	-	-	-
Rio Sanguo													
JA7													
	Max	1.21	1.23	0.81	0.46	0.68	0.31	0.47	0.61	0.83	0.60	1.56	1.38
	Min	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.04	0.03	0.05	0.02
	Average	0.41	0.31	0.19	0.11	0.14	0.18	0.10	0.12	0.29	0.24	0.38	0.27
	Measurement value	1.20	0.57	0.77	0.21	0.07	-	-	-	-	-	-	-
JA10													
	Max	1.47	1.40	1.42	0.55	0.72	0.86	0.60	0.65	0.95	0.99	1.44	1.28
	Min	0.67	0.90	0.34	0.26	0.21	0.39	0.30	0.22	0.59	0.62	0.67	0.63
	Average	1.24	1.20	0.96	0.37	0.39	0.69	0.42	0.40	0.77	0.80	1.13	1.03
	Measurement value	0.76	4.61	2.19	0.81	0.34	-	-	-	-	-	-	-
JA12													
	Max	4.57	4.28	3.91	1.94	1.56	2.64	1.73	2.27	3.30	2.82	4.66	3.80
	Min	1.19	1.63	0.43	0.36	0.28	0.65	0.45	0.48	1.33	1.25	1.49	0.95
	Average	3.18	2.99	2.22	0.94	1.04	1.89	0.98	1.08	2.26	2.14	3.23	2.55
	Measurement value	1.00	-	3.63	1.96	1.22	-	-	-	-	-	-	-

* Max, Min, Average: Daily average

** Measurement value: Monitoring data

- Q_i : 河川流量 (m^3/s)
- C_i : ボックス内の物質濃度 (mg/l)
- C_N : コントロール濃度 (流域最上流の値) (mg/l)
- Q_N : 集水域からの流量 (m^3/s)
- Q_{AC} : 稼動炭鉱からの排水量 (m^3/s)
- Q_{AB} : 廃棄炭鉱からの流入水量 (m^3/s)
- ΣL_{AC} : 稼動炭鉱からの負荷量 (mg/s)
- ΣL_{AB} : 廃棄炭鉱からの負荷量 (mg/s)

5.2 負荷量の設定

47. 稼動炭鉱および廃棄炭鉱からの負荷量、鉄イオンおよびアルミニウムイオンの沈殿過程は次のように設定した。

(a) 稼動炭鉱からの負荷量の設定

48. 対象域内の各稼動炭鉱山からの汚濁負荷量は、炭鉱の原炭生産量に比例して増大すると仮定し、稼動炭鉱のモニタリング結果から単位生産量当たりの負荷量を炭鉱毎に求め、これらを平均して稼動炭鉱の負荷原単位とした。さらに、対象域内の稼動炭鉱の原炭出炭量に負荷原単位を乗じて、稼動炭鉱毎に負荷量を求めた。ただし、モニタリング対象炭鉱のひとつである Metropolitana 社(MC1-3) のモニタリングデータについては、石炭生産量が他の炭鉱に比べ1オーダー高い値を示していることから、原単位の計算には使用しなかった。稼動炭鉱排水の設定水質は以下の通り。

表 B-10

稼動炭鉱排水の設定水質

・ pH	(-)	2.81
・ SO ₄	(mg/l)	2,838
・ Dis.Fe	(mg/l)	391
・ Al	(mg/l)	123

(b) 廃棄炭鉱からの負荷量の設定

49. 対象域内の各廃棄炭鉱からの汚濁負荷量を次のように設定した。調査対象域内の廃棄炭鉱は、その廃棄物の性状から黒ボタ域と白ボタ域とに分類される。黒ボタは洗炭ボタ、白ボタは露天掘りの際生じた表土が主である。黒ボタは黄鉄鉱を多量に含む洗炭ボタが主であり、酸性水生成能力が高い。一方、白ボタは酸性水を生成する能力は小さいが、

混入する黄鉄鉱や投棄された洗炭ボタ等により周辺の河川を酸性化している場合が多い。ここでは、FSサイトのうち、洗炭ボタが多量に放置されている Rocinha サイトを黒ボタの代表域、表土が主である Fiorita サイトを白ボタの代表域とし、両サイトの最終流出地点における負荷量を求め、それぞれのサイト内のボタ面積で除して負荷原単位を求めた。この際、Rocinha では最終流出地点からの総負荷量からサイト内の稼動炭鉱からの排水負荷量を除いた。これらの負荷原単位を各廃棄炭鉱の黒ボタおよび白ボタ面積に乗じて、対象域内の廃棄炭鉱毎に負荷量を設定した。

黒ボタおよび白ボタ廃棄炭鉱からの設定流出水質は以下の通り。

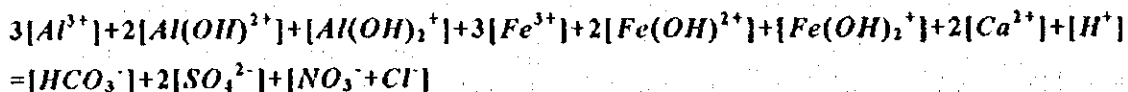
表 B-11

黒ボタおよび白ボタ廃棄炭鉱からの設定流出水質

	黒ボタ廃棄炭鉱	白ボタ廃棄炭鉱
・ pH (-)	3.3	3.2
・ SO ₄ (mg/l)	645.0	494
・ Dis.Fe (mg/l)	94.8	29.5
・ Al (mg/l)	44.8	32.7

5.3 沈殿過程のモデル化

50. FS サイトでは、局所的に小河川から中性の河川水が流れ込むが、サイト内の河川は pH2-4 程度の値を示しており、鉄およびアルミニウムの沈殿反応を特に考慮する必要がなかった。しかしながら、全体域における鉄、アルミニウムの挙動を考えた場合、大河川から鉱山汚染のない中性の水が大量に流入する場所が多く、本流とこれらの中性河川との混合域において鉄およびアルミニウムの沈殿反応を考慮した水質モデルが必要になる。ここでは、対象河川の水質が全域好気条件下にあることから、河川水中の硫酸イオンが比較的安定であることに注目し、まず、(1) 式から硫酸イオン濃度を予測した。次に、実測値から硫酸イオンと鉄およびアルミニウムとの関係を求め、電荷保存の原理（水中での陽イオンと陰イオンとが常に釣り合っている状態）に基づき、以下に示す酸性河川の電荷平衡式が本対象河川にも成立すると仮定して (B.J.Cosby et al 1,1985,11,1985, N.Cristophersen et al 1990)、平衡状態における硫酸イオン濃度と電荷平衡条件下にある溶存態鉄およびアルミニウムの濃度を推定した。



[参考文献]

Nils Christophersen et al. (1990). Modelling Streamwater Chemistry as a Mixture of Soil Water End-Members. *Journal of Hydrology*, 116 307-320

J. Cosby, et al. (1985). Modeling the Effects of Acid Deposition, *Water Resources Research*, Vol. 21 51-63

J. Cosby, et al. (1985). Modeling the Effects of Acid Deposition, *Water Resources Research*, Vol. 21 1591-1601

51. アルミニウムについて Tubarão 川における実測値とモデル計算結果とを比較した例を図 B-30 に示す。アルミニウム濃度/硫酸イオン濃度比は、アルミニウムの実測値 1.0×10^{-5} mol/l 付近で急激に減少し、その後回復していることがわかる。参考として図中に pH 実測値を付記したが、これらの pH 実測値から pH 4～7 の範囲でアルミニウムの沈殿が生じてアルミニウムの溶存態濃度が低下し、pH 5.6 付近で最大の沈殿が生じ、pH の上昇に伴って再化溶化により溶存態の占める割合が高くなっていくことを示している。このようなアルミニウムの挙動は既存のアルミニウムの溶解度曲線と良く一致しており、本モデルはアルミニウムの沈殿現象を良好に再現していたと言える。

52. 対象 3 河川について、水質の実測値と計算値とを比較してモデルの検証を行った (表 B-12 から表 B-14)。いずれの河川についても実測値はおおむね予測水質の変動幅の内に収まっており、本水質モデルは現況の水質を十分再現していた。

5.4 水質改善効果の予測・評価

(a) シナリオ

53. 稼動炭鉱および廃棄炭鉱に対し対策を実施した場合の水質改善効果を予測・評価した。対策実施による負荷量削減効果については、以下の 3 ケースを設定した。

⇒ シナリオ 1 : 稼動炭鉱の排水の水質をブラジルの排水基準と同様とし、かつ廃棄炭鉱からの負荷量を復旧工事により 90%削減する。

⇒ シナリオ 2 : 廃棄炭鉱からの負荷量を 90%削減する。

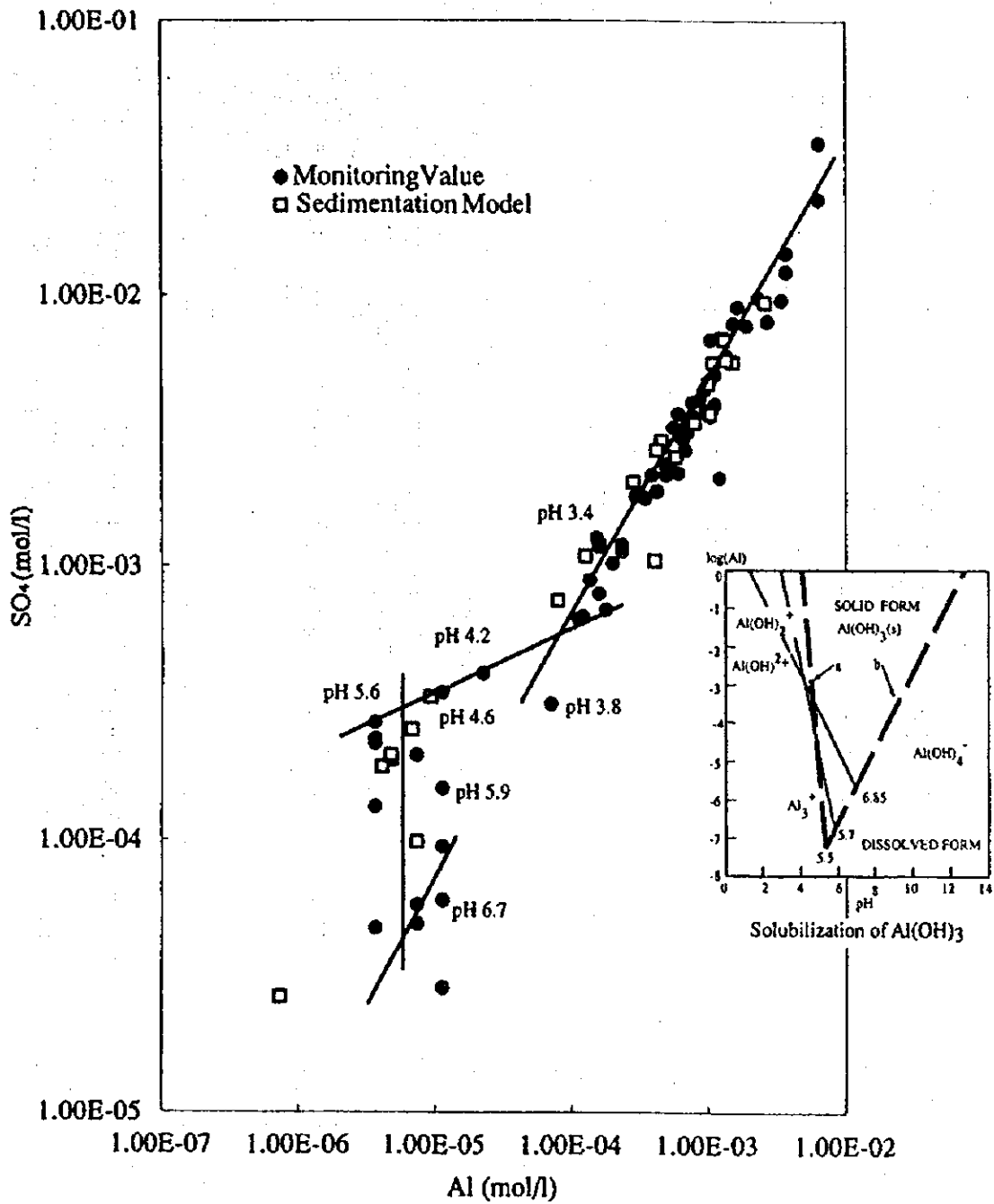


図 B-30 実測値とモデル計算値との比較

表 B-12
シミュレーション結果の現況再現状況(Rio Tubarão)

Location	Measurement value			Simulation result			Location	Measurement value			Simulation result		
	average	max	min	average	max	min		average	max	min	average	max	min
PT-1	pH	3.6	3.3	3.5	2.9		JT-6	pH	3.7	3.7	3.8	3.7	
	SO ₄	512	490	962	291			SO ₄	86	212	221	208	
	Dis-Fe	53.5	40.0	76.8	24.5			Dis-Fe	2.3	28.0	28.6	27.8	
	Dis-Al	27.6	32.2	63.8	18.9			Dis-Al	4.6	9.6	10.1	9.3	
PT-3	pH	3.4	3.3	3.5	3.0		JT-7	pH	3.2	3.9	4.0	3.6	
	SO ₄	399	373	365	237			SO ₄	317	242	350	176	
	Dis-Fe	15.2	46.1	69.6	29.2			Dis-Fe	13.7	6.0	8.7	4.4	
	Dis-Al	13.9	28.2	42.6	17.9			Dis-Al	18.1	10.5	17.1	6.5	
PT-4	pH	3.2	3.5	3.7	3.1		JT-8	pH	3.0	2.4	2.6	2.1	
	SO ₄	1,037	473	882	274			SO ₄	1,734	1,782	3,669	1,129	
	Dis-Fe	53.7	11.4	18.1	6.8			Dis-Fe	149.0	249.7	430.0	158.3	
	Dis-Al	29.8	24.5	46.7	11.4			Dis-Al	126.5	139.9	240.9	88.7	
JT-1	pH	4.9	3.6	3.8	3.2		JT-9	pH	2.9	3.2	3.3	2.7	
	SO ₄	103	498	1,115	242			SO ₄	495	565	1,070	389	
	Dis-Fe	5.4	11.9	24.7	6.0			Dis-Fe	24.4	55.3	126.1	34.0	
	Dis-Al	6.9	26.1	66.6	10.2			Dis-Al	33.3	37.7	76.8	24.3	
JT-2	pH	3.7	3.3	3.4	3.2		JT-10	pH	2.8	2.8	2.9	2.5	
	SO ₄	353	367	441	329			SO ₄	1,112	979	1,643	801	
	Dis-Fe	22.4	25.9	30.6	23.5			Dis-Fe	110.3	62.2	104.4	50.9	
	Dis-Al	23.3	22.9	27.6	20.4			Dis-Al	73.6	63.0	105.8	57.6	
JT-3	pH	3.4	4.1	4.4	3.8		PT-7	pH	3.2	3.7	3.8	3.3	
	SO ₄	175	192	370	102			SO ₄	265	297	471	224	
	Dis-Fe	8.6	4.8	8.8	2.6			Dis-Fe	7.2	7.4	11.7	5.6	
	Dis-Al	10.5	8.0	18.9	3.3			Dis-Al	15.9	13.2	23.6	8.7	
PT-5	pH	6.6	5.5	5.7	5.2		PT-8	pH	3.9	4.5	4.9	4.3	
	SO ₄	14	8	13	5			SO ₄	76	87	154	48	
	Dis-Fe	0.1	0.5	0.9	0.4			Dis-Fe	0.7	2.2	3.8	1.2	
	Dis-Al	0.3	0.5	0.9	0.4			Dis-Al	4.3	2.9	6.7	1.3	
PT-6	pH	4.8	4.6	4.9	4.3		PT-10	pH	5.8	6.0	6.4	5.7	
	SO ₄	64	90	172	45			SO ₄	23	22	38	13	
	Dis-Fe	2.2	2.3	4.3	1.2			Dis-Fe	0.2	0.2	0.5	0.1	
	Dis-Al	3.4	3.0	7.6	1.2			Dis-Al	0.3	0.2	0.6	0.1	
JT-5	pH	3.1	3.5	3.6	3.1								
	SO ₄	458	304	558	197								
	Dis-Fe	32.4	42.5	78.2	27.6								
	Dis-Al	25.8	23.8	43.8	15.4								

* Measurement value: Monitoring data measured from December, 1996 to June, 1997

** Average, max, min: monthly value

表B-13

シミュレーション結果の現況再現状況(Rio Urussanga)

Location	Measurement value average	Simulation result			Location	Measurement value average	Simulation result				
		average	max	min			average	max	min		
PU-2	pH	3.0	2.8	2.8	2.6	JU-3	pH	3.0	3.7	3.3	3.3
	SO ₄	1,527	1,396	1,802	1,254		SO ₄	687	457	664	342
	Diss-Fe	123	197	255	177		Diss-Fe	23	8	11	6
	Diss-Al	113	91	138	87		Diss-Al	38	14	20	11
JU-1	pH	3.0	3.1	3.2	2.9	PU-6	pH	3.5	3.8	4.0	3.8
	SO ₄	1,837	854	1,599	671		SO ₄	249	349	388	187
	Diss-Fe	64	121	170	95		Diss-Fe	4	6	7	5
	Diss-Al	71	60	86	47		Diss-Al	14	11	12	9
JU-2	pH	3.6	4.3	4.4	4.1	PU-7	pH	3.8	4.8	4.1	3.8
	SO ₄	112	145	182	124		SO ₄	160	172	227	152
	Diss-Fe	15	17	19	16		Diss-Fe	1	26	35	23
	Diss-Al	25	7	10	6		Diss-Al	3	14	18	12
PU-3	pH	3.8	3.5	3.6	3.3	PU-9	pH	3.4	4.2	4.3	4.1
	SO ₄	1,020	657	944	517		SO ₄	185	202	221	153
	Diss-Fe	70	11	14	9		Diss-Fe	3	4	5	4
	Diss-Al	54	26	28	16		Diss-Al	18	6	7	5
PU-4	pH	3.7	3.7	4.0	3.3						
	SO ₄	110	352	437	265						
	Diss-Fe	2.6	51.4	94.7	28.9						
	Diss-Al	4.9	22.7	48.7	18.8						

*Measurement value: Monitoring data measured from December, 1996 to June, 1997

** Average, max, min: monthly value

表 B-14
シミュレーション結果の現況再現状況(Rio Araranguá)

Location	Measurement value average	Simulation result			Location	Measurement value average	Simulation result				
		average	max	min			average	max	min		
Ararangua basin					Sanga basin						
JA-1					JA-7						
	pH	3.6	3.4	3.5	3.2		pH	2.9	2.9	3.0	2.7
	SO ₄	424	391	585	390		SO ₄	1,124	801	1,004	665
	Dis-Fe	24.7	54.4	70.8	48.3		Dis-Fe	143.3	114.3	144.9	94.1
	Dis-Al	11.1	19.0	28.0	15.7		Dis-Al	85.4	47.7	64.1	36.8
PA-3					JA-8						
	pH	4.0	3.6	4.3	3.8		pH	2.8	2.5	2.7	2.1
	SO ₄	229	261	533	54		SO ₄	1,267	1,446	1,612	1,016
	Dis-Fe	14.3	14.4	33.9	3.4		Dis-Fe	162.5	211.2	389.0	145.4
	Dis-Al	17.1	16.8	34.3	3.5		Dis-Al	103.3	95.3	189.3	60.5
JA-3					JA-9						
	pH	3.6	3.4	3.8	3.1		pH	3.0	2.5	2.6	2.4
	SO ₄	393	416	632	253		SO ₄	2,003	1,624	1,928	1,305
	Dis-Fe	13.3	7.8	11.3	4.9		Dis-Fe	249.4	232.2	277.4	195.3
	Dis-Al	12.1	15.6	27.4	8.1		Dis-Al	123.0	94.7	119.0	75.3
JA-3					JA-10						
	pH	3.4	3.1	3.3	2.7		pH	2.8	2.6	2.8	2.3
	SO ₄	381	611	1,012	392		SO ₄	1,557	1,521	2,144	1,157
	Dis-Fe	6.4	34.3	75.5	19.5		Dis-Fe	185.3	26.7	36.5	20.9
	Dis-Al	12.3	31.6	58.1	18.0		Dis-Al	94.2	67.9	107.4	47.1
JA-5					JA-12						
	pH	4.9	3.7	3.7	3.7		pH	3.1	3.1	3.2	2.8
	SO ₄	254	254	254	254		SO ₄	1,111	740	1,076	605
	Dis-Fe	28.3	35.0	35.0	35.0		Dis-Fe	118.3	13.6	19.2	11.4
	Dis-Al	7.8	11.0	11.0	11.0		Dis-Al	72.0	28.4	46.6	21.6
PA-5					PA-9						
	pH	3.2	3.5	3.6	3.3		pH	3.2	3.6	2.7	2.5
	SO ₄	445	331	400	301		SO ₄	1,013	1,351	1,736	1,144
	Dis-Fe	15.2	44.9	53.4	41.4		Dis-Fe	113.6	111.0	148.5	85.3
	Dis-Al	17.4	16.0	21.2	13.0		Dis-Al	60.4	71.5	87.5	58.2
PA-6					PA-10						
	pH	3.2	3.2	3.3	3.0		pH	3.1	3.3	3.5	3.0
	SO ₄	811	564	878	359		SO ₄	549	531	722	366
	Dis-Fe	12.5	18.5	16.1	7.0		Dis-Fe	39.3	9.9	12.9	7.0
	Dis-Al	19.1	21.4	34.1	11.6		Dis-Al	31.9	19.3	30.0	12.4
PA-8											
	pH	3.4	3.6	3.9	3.3						
	SO ₄	391	346	448	213						
	Dis-Fe	6.2	6.6	8.2	4.3						
	Dis-Al	15.7	11.9	17.7	6.4						

*Measurement value: Monitoring data measured from December, 1996 to June, 1997

(*) Average, max, min: monthly value

⇒ シナリオ 3 : 稼動炭鉱の排水の水質をブラジルの排水基準と同様とする。

(b) 予測式

54. 予測式は以下の通り。

$$C_i = \frac{1}{Q_i} \{ Q_{i-1} C_{i-1} + (Q_N - \sum Q_{AC} - \sum Q_{AB}) C_N + \sum L_{AC} + \alpha \sum L_{AB} \}$$

ここで、

L_{AC} : 対策をとった際の稼動炭鉱からの排出負荷量 (mg/s)

α : 対策をとった際の廃棄炭鉱からの負荷量の低減率 (ここでは 90%)

ブラジルにおける稼動炭鉱の排出基準は、 SO_3 1,000 ug/l、T-Fe 15,000 ug/l である。ただし、アルミニウムは排出基準値がないため、ブラジルの水質環境基準 Class 4 における鉄とアルミニウムの比率 (1/50) を用いて鉄の排出基準値から Dis-Al の排出基準を 300 ug/l と設定した。

(c) 予測結果

55. 各測点におけるケーススタディ計算結果を年平均値としてとりまとめた結果を表 B-15 から表 B-17 に示す。pH を指標としてケース毎の酸性水質改善効果を検討すると以下の通りである (表 B-18)。

56. シナリオ 1 : いずれの河川についても廃棄炭鉱および稼動炭鉱の対策を同時に実施した場合が、最も酸性水質改善効果が高い。シナリオ 1 では Araranguá 川水系の Sangão 川以外の河川は平均 pH で 3.5 前後まで改善され、最も改善効果の大きい地点では pH6 ~7 まで水質が回復する。ただし、改善効果の小さい地点では pH4 前後までしか回復しない。Sangão 川では効果が小さく、最大でも pH5 程度までしか改善されない。pH 実測値と予測値の比較を図 B-31 に示す。

57. シナリオ 2 : 廃棄炭鉱からの負荷率 90%削減によって、Tubarão 川および Urussanga 川上流域では pH が 4 以下と著しい効果がみられないが、下流域をも含めた平均で見ると 4.5~5.0 程度まで回復が見込める。Araranguá 川では稼動炭鉱の影響が大きいので、いずれの支流も平均で pH4.0 以下のままである。

表B-15
ケーススタディ結果(Rio Tubarão)...

Location	Parameter	Current condition	unit: mg/l			
			Scenario 1 • 90% load reduction for Abandoned mine • Regulation for Active mine	Scenario 2 90% load reduction for Abandoned mine	Scenario 3 Regulation for Active mine	Brazilian Ambient Standard class 4
PT-1	pH	3.3	4.6	4.3	3.3	6-9
	SO ₄	490.4	46.2	74.9	461.7	250.0
	Dis-Fe	40.0	3.8	7.6	36.2	5.0
	Dis-Al	32.2	3.1	4.3	31.0	0.1
PT-3	pH	3.3	4.6	4.6	3.3	6-9
	SO ₄	374.8	37.5	37.5	374.8	250.0
	Dis-Fe	46.1	4.6	4.6	46.1	5.0
	Dis-Al	28.2	2.8	2.8	28.2	0.1
PT-4	pH	3.5	5.1	4.7	3.5	6-9
	SO ₄	472.9	44.9	69.1	448.6	250.0
	Dis-Fe	11.4	1.1	1.7	10.8	5.0
	Dis-Al	24.5	1.3	2.1	23.1	0.1
JT-1	pH	3.6	5.2	4.8	3.6	6-9
	SO ₄	497.5	43.2	72.6	472.2	250.0
	Dis-Fe	11.9	1.2	1.8	11.3	5.0
	Dis-Al	26.1	1.4	2.3	24.7	0.1
JT-2	pH	3.3	4.7	4.3	3.4	6-9
	SO ₄	367.1	33.2	68.4	331.9	250.0
	Dis-Fe	23.9	2.3	7.0	21.3	5.0
	Dis-Al	22.9	2.1	3.7	21.4	0.1
JT-3	pH	4.1	5.7	5.3	4.1	6-9
	SO ₄	191.7	17.9	30.7	178.9	250.0
	Dis-Fe	4.8	0.5	0.8	4.4	5.0
	Dis-Al	8.0	0.4	0.8	7.4	0.1
PT-5	pH	5.5	6.6	6.6	5.5	6-9
	SO ₄	8.4	2.5	2.5	8.4	250.0
	Dis-Fe	0.5	0.1	0.1	0.5	5.0
	Dis-Al	0.5	0.1	0.1	0.5	0.1
PT-6	pH	4.6	6.2	5.8	4.6	6-9
	SO ₄	89.6	8.4	14.1	83.9	250.0
	Dis-Fe	2.3	0.2	0.4	2.1	5.0
	Dis-Al	3.0	0.2	0.3	2.8	0.1
JT-5	pH	3.5	4.8	4.8	3.5	6-9
	SO ₄	303.5	30.4	30.4	303.5	250.0
	Dis-Fe	42.5	4.3	4.3	42.5	5.0
	Dis-Al	23.8	2.4	2.4	23.8	0.1
JT-6	pH	3.7	6.2	3.8	5.1	6-9
	SO ₄	212.3	2.5	197.9	16.1	250.0
	Dis-Fe	28.0	1.1	27.1	2.1	5.0
	Dis-Al	9.6	0.1	8.6	1.1	0.1
JT-7	pH	3.9	5.8	4.4	4.2	6-9
	SO ₄	141.5	15.4	103.2	153.7	250.0
	Dis-Fe	6.0	0.4	2.6	3.8	5.0
	Dis-Al	10.3	0.3	3.4	6.4	0.1
JT-8	pH	2.4	3.7	3.7	2.4	6-9
	SO ₄	1,782.2	178.2	178.2	1,782.2	250.0
	Dis-Fe	249.7	25.0	25.0	249.7	5.0
	Dis-Al	139.9	14.0	14.0	139.9	0.1
JT-9	pH	3.3	4.5	4.3	3.3	6-9
	SO ₄	565.3	50.7	108.8	507.2	250.0
	Dis-Fe	55.3	5.4	6.9	53.9	5.0
	Dis-Al	37.7	3.2	5.1	35.0	0.1
JT-10	pH	2.8	4.1	4.1	2.8	6-9
	SO ₄	978.8	97.9	97.9	978.8	250.0
	Dis-Fe	62.2	6.2	6.2	62.2	5.0
	Dis-Al	63.0	6.3	6.3	63.0	0.1
PT-7	pH	3.7	5.3	4.8	3.7	6-9
	SO ₄	297.3	27.2	52.4	272.1	250.0
	Dis-Fe	7.4	0.7	1.3	6.8	5.0
	Dis-Al	13.2	0.6	1.4	11.9	0.1
PT-8	pH	4.5	6.1	3.7	4.6	6-9
	SO ₄	87.0	8.1	14.1	80.6	250.0
	Dis-Fe	2.2	0.2	0.4	2.0	5.0
	Dis-Al	2.9	0.1	0.3	2.6	0.1
PT-10	pH	6.0	6.9	6.9	6.0	6-9
	SO ₄	21.6	2.9	3.7	20.0	250.0
	Dis-Fe	0.2	0.1	0.1	0.2	5.0
	Dis-Al	0.2	0.0	0.0	0.2	0.1

* Values are sample average

表 B-16
ケーススタディ結果(Rio Urussanga)

unit: mg/l						
Location	Parameter	Current condition	Scenario 1 • 90% load reduction for Abandoned mine • Regulation for Active mine	Scenario 2 90% load reduction for Abandoned mine	Scenario 3 Regulation for Active mine	Brazilian Ambient Standard class 4
PU-2	pH	2.8	4.3	3.6	2.9	6-9
	SO ₄	1,396	106	441	1,061	250.0
	Dis-Fe	197	16.9	61.3	152.6	5.0
	Dis-Al	98	8.4	22.9	83.7	0.1
JU-1	pH	3.1	4.6	3.9	3.2	6-9
	SO ₄	854	65	268	651	250.0
	Dis-Fe	121	10.3	37.3	93.7	5.0
	Dis-Al	60	5.2	14.0	51.4	0.1
JU-2	pH	4.3	6.4	4.5	5.0	6-9
	SO ₄	145	4.6	109.1	39.4	250.0
	Dis-Fe	17	0.8	14.7	3.1	5.0
	Dis-Al	7.1	0.3	4.8	2.5	0.1
PU-3	pH	3.5	5.1	4.1	3.7	6-9
	SO ₄	657	49	216	489	250.0
	Dis-Fe	11	1.5	4.6	8.4	5.0
	Dis-Al	20	1.7	6.8	14.9	0.1
PU-4	pH	3.7	5.6	4.2	4.2	6-9
	SO ₄	352	19.9	173.3	199.0	250.0
	Dis-Fe	51.4	3.8	24.2	31.1	5.0
	Dis-Al	22.7	1.6	8.3	16.1	0.1
JU-3	pH	3.0	5.3	4.3	3.9	6-9
	SO ₄	687	33	161	328	250.0
	Dis-Fe	23	1.1	3.7	6.2	5.0
	Dis-Al	38	1.1	5.2	10.2	0.1
PU-6	pH	3.5	5.4	4.5	4.0	6-9
	SO ₄	249	25	124	250	250.0
	Dis-Fe	3.7	0.9	3.0	5.0	5.0
	Dis-Al	16	0.9	4.0	7.8	0.1
PU-7	pH	3.8	5.4	5.4	4.0	6-9
	SO ₄	160	17	17	172	250.0
	Dis-Fe	1.8	2.6	2.6	26.3	5.0
	Dis-Al	2.9	1.4	1.4	13.9	0.1
PU-9	pH	3.4	5.7	4.9	4.3	6-9
	SO ₄	165	16	62	156	250.0
	Dis-Fe	2.7	0.7	1.8	3.6	5.0
	Dis-Al	10	0.6	2.1	5.0	0.1

* Values are annual average

表 B-17
ケーススタディ結果(Rio Araranguá)

unit: mg/l

Location	Parameter	Current condition	Scenario 1 • 90% lead reduction for Abandoned mine • Regulation for Active mine	Scenario 2 90% lead reduction for Abandoned mine	Scenario 3 Regulation for Active mine	Brazilian Ambient Standard class 4
Mac Lusa						
JA-1	pH	3.4	3.1	3.5	4.4	6-9
	SO ₄	392.5	6.7	342.8	55.4	250.0
	Dis-Fe	54.4	2.6	47.2	9.8	5.0
	Dis-Al	19.0	0.5	15.1	4.4	0.1
PA-1	pH	3.6	4.9	4.9	3.6	6-9
	SO ₄	260.7	26.1	26.1	260.7	250.0
	Dis-Fe	16.6	1.7	1.7	16.6	5.0
	Dis-Al	16.8	1.7	1.7	16.8	0.1
JA-3	pH	3.4	6.2	3.6	4.4	6-9
	SO ₄	416.4	12.5	308.1	120.4	250.0
	Dis-Fe	7.8	0.2	5.9	2.1	5.0
	Dis-Al	15.6	0.3	10.1	4.8	0.1
JA-3	pH	3.3	4.7	3.6	3.3	6-9
	SO ₄	611.2	35.0	299.4	346.5	250.0
	Dis-Fe	34.3	2.9	8.0	29.2	5.0
	Dis-Al	31.6	1.0	10.8	22.0	0.1
JA-5	pH	3.7	7.0	3.7	7.0	6-9
	SO ₄	254.1	2.5	254.1	2.5	250.0
	Dis-Fe	35.0	1.3	35.0	1.3	5.0
	Dis-Al	11.0	0.7	11.0	0.7	0.1
PA-5	pH	3.5	4.3	3.6	4.0	6-9
	SO ₄	331.0	74.8	285.3	120.6	250.0
	Dis-Fe	44.9	11.3	39.2	17.0	5.0
	Dis-Al	16.0	3.4	12.5	6.9	0.1
PA-6	pH	3.2	5.3	3.7	3.7	6-9
	SO ₄	563.8	42.3	503.1	302.8	250.0
	Dis-Fe	10.5	0.7	5.8	5.7	5.0
	Dis-Al	21.4	0.7	9.8	10.8	0.1
PA-8	pH	3.6	5.6	4.0	4.0	6-9
	SO ₄	345.7	25.3	193.0	177.7	250.0
	Dis-Fe	6.6	0.3	3.8	3.4	5.0
	Dis-Al	11.9	0.3	5.7	5.7	0.1
Sargan basin						
JA-7	pH	2.9	4.5	3.3	3.2	6-9
	SO ₄	801.0	35.3	484.8	351.5	250.0
	Dis-Fe	114.3	7.6	67.2	54.8	5.0
	Dis-Al	47.7	2.9	22.3	28.2	0.1
JA-8	pH	2.5	4.4	3.1	2.7	6-9
	SO ₄	1,446.4	87.7	658.6	875.6	250.0
	Dis-Fe	211.2	16.3	93.9	135.5	5.0
	Dis-Al	95.3	7.1	31.8	70.6	0.1
JA-9	pH	2.5	4.1	2.9	2.9	6-9
	SO ₄	1,625.7	65.5	1,039.4	651.7	250.0
	Dis-Fe	232.2	14.9	144.0	103.1	5.0
	Dis-Al	94.7	5.3	47.5	52.5	0.1
JA-10	pH	2.6	4.5	3.1	2.9	6-9
	SO ₄	1,521.2	94.9	668.4	947.7	250.0
	Dis-Fe	26.7	1.8	12.5	17.0	5.0
	Dis-Al	67.9	2.3	24.4	40.3	0.1
JA-11	pH	3.1	5.1	3.6	3.4	6-9
	SO ₄	739.6	45.5	331.4	453.7	250.0
	Dis-Fe	13.6	0.7	6.5	8.5	5.0
	Dis-Al	28.4	0.8	10.5	16.4	0.1
PA-9	pH	2.6	4.2	3.1	2.8	6-9
	SO ₄	1,351.2	84.5	592.0	843.8	250.0
	Dis-Fe	111.0	8.4	47.5	72.4	5.0
	Dis-Al	71.5	4.2	23.9	49.8	0.1
PA-10	pH	3.3	5.3	3.7	3.7	6-9
	SO ₄	531.3	35.8	270.4	296.4	250.0
	Dis-Fe	9.9	0.6	5.3	5.7	5.0
	Dis-Al	19.5	0.5	8.4	10.1	0.1

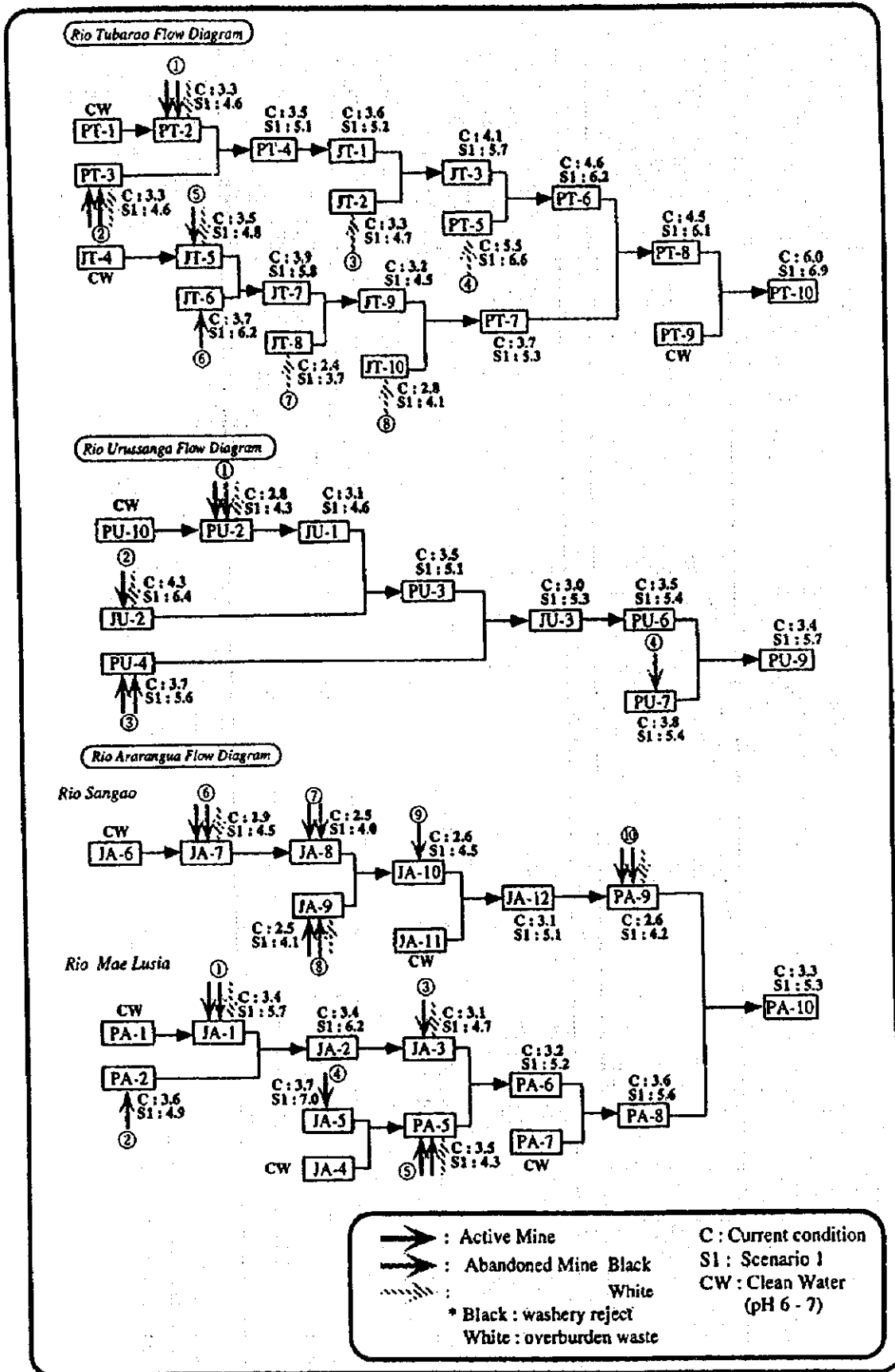
* Values are annual average

表 B-18

対策に伴う酸性水質改善効果

River	Current condition						Unit .						
	Scenario 1			Scenario 2			Scenario 3			Scenario 3			
	90% load reduction for Abandoned mine			90% load reduction for Abandoned mine			Regulation for Active mine			Regulation for Active mine			
	Average	Max	Min	Average	Max	Min	Average	Max	Min	Average	Max	Min	
Rio Taboao	pH (-)	3.8	6.0	2.4	5.3	6.9	3.7	4.9	6.9	3.7	3.9	6.0	2.4
	Increasing rate	1.0	-	-	1.4	1.7	1.2	1.3	1.5	1.0	1.0	1.4	1.0
Rio Uruangua	pH (-)	3.5	4.3	2.8	5.3	6.4	4.3	4.4	5.4	3.6	3.9	5.0	2.9
	Increasing rate	1.0	-	-	1.5	1.8	1.4	1.3	1.4	1.0	1.1	1.3	1.0
Rio Mac.Luzia	pH (-)	3.4	3.7	3.1	5.4	7.0	4.3	3.8	4.9	3.5	4.3	7.0	3.3
	Increasing rate	1.0	-	-	1.6	1.9	1.2	1.1	1.4	1.0	1.2	1.9	1.0
Rio Ararungua	pH (-)	2.8	3.3	2.5	4.5	5.3	4.0	3.3	3.7	2.9	3.1	3.7	2.7
	Increasing rate	1.0	-	-	1.6	1.7	1.6	1.2	1.2	1.1	1.1	1.14	1.08

* Values are annual average
 ** Increasing rate: Case # / Present condition
 *** Brazilian ambient standard: pH 6-9



図B-31 pH実測値とシナリオ1に基づく予測値と結果との比較

58. シナリオ3：稼働炭鉱の排水規制では、Araranguá川水系のMão Luzia川の改善効果が他の河川に比べて大きく平均でpH4.0程度に回復する。その他の河川は規制後も平均でpH4.0以下である。

(d) 評価

59. 以上のケーススタディ結果から、全体域における水質改善効果は次のように評価される。

60. 酸性湖における研究では、植物プランクトンの種の多様性およびバイオマスはpH値の低下に伴って減少し、大きな変化はpH5~6の範囲で起こり、それ以下では酸性水に強い特定の種の増殖が起こることが報告されている。動物プランクトンとpHの関係も概ね同様であり、pH5.0~5.5では影響がみられないが、pH5.0以下ではまったく動物プランクトンがみられない状態になる等の報告がある(Green & Leuven, 1986)。また、北上川水系におけるpHと底生生物との関係ではpH5.5~6.0辺りから影響がみられており(福島, 1967)、pHが6.0から高次元栄養段階の生物影響が始まる(坂本, 1991)などの報告もある。これら多くの知見をまとめると、pH5.0~6.0辺りで生態系への影響が明確になるというのが一般的である。これは逆にpHを5.0以上に回復させれば、酸性水河川に生態系を回復できる可能性があることを意味している。

参考文献

J.F.M. Geelen and R.S.E.W. (1986). Leuven: Impact of acidification on phytoplankton and zooplankton communities. *Experientia* 42

福島博(1967). 横浜市大紀要(c), 173, 1

坂本充(1991). 酸性雨と水環境, 水質汚濁研究, 14, 599-606

61. ケーススタディ結果では、いずれのシナリオにおいても局所的にpHが5.0以上に回復する地点がみられるが、平均値で各河川のpHが5.0以上に回復するのはシナリオ1以外にはみられない。これは、廃棄炭鉱の復旧だけでなく稼働炭鉱の排水規制も並行して行うことによってのみ、本調査対象河川に生態系が回復できる可能性があることを示唆している。ただし、Sangão川については集水域が小さいこと、清澄な河川水の流入がないこと、炭鉱が集中していることなどから、シナリオ1によってもpH5.0を達成することは極めて困

難であると推察される。

62. ブラジルのpH水質環境基準は6～9であり、いずれの河川においてもシナリオ1の対策を実施したとしても基準を満たすことはできないが、pHを5.0以上に回復することによって生物を起源とする有物質による河川水の中和効果や土壌中の重金属化合物からの重金属の溶出の防止効果等が期待できるため、シナリオ1を実施することによって長期的には緩やかに河川の水質が回復するものと推察される。

6. 環境モニタリングシステム

6.1 機能

63. 環境モニタリングの主な機能は、一般に(i)水質環境把握、(ii)汚染の監視である。本調査の対象域では河川の排水汚染が極度に進行しており（例えば危険な化学プラントの存在のような）非常用のモニタリング装置は必要としない。当該地域における水質汚染が、突発的に増加することはなく、事故に対応するための水質モニタリングは必要としない。従って、水質自動モニタリング装置は必要としない。

6.2 水質モニタリング

64. 水質モニタリングは、定期的採水、携帯用メーターによる現地測定と実験室における分析により行う。現在使用中の3個所の水質自動モニタリング装置は継続使用するが追加の必要はない。調査方法、頻度及び項目は次の通りである。

65. 測定点：図B-32に測定点を示す。各水系の最重要測定点は次のとおり、

- ・ Tubarão 水系：PT4, PT6, PT7, PT8, PT10;
- ・ Urussanga 水系：JU3, PU9
- ・ Araranguá水系：JA3, PA5, PA6, PA9, PA10
- ・ Capivari 水系：PT14, PT16

66. 調査頻度及び項目：

調査頻度：毎月または隔月毎

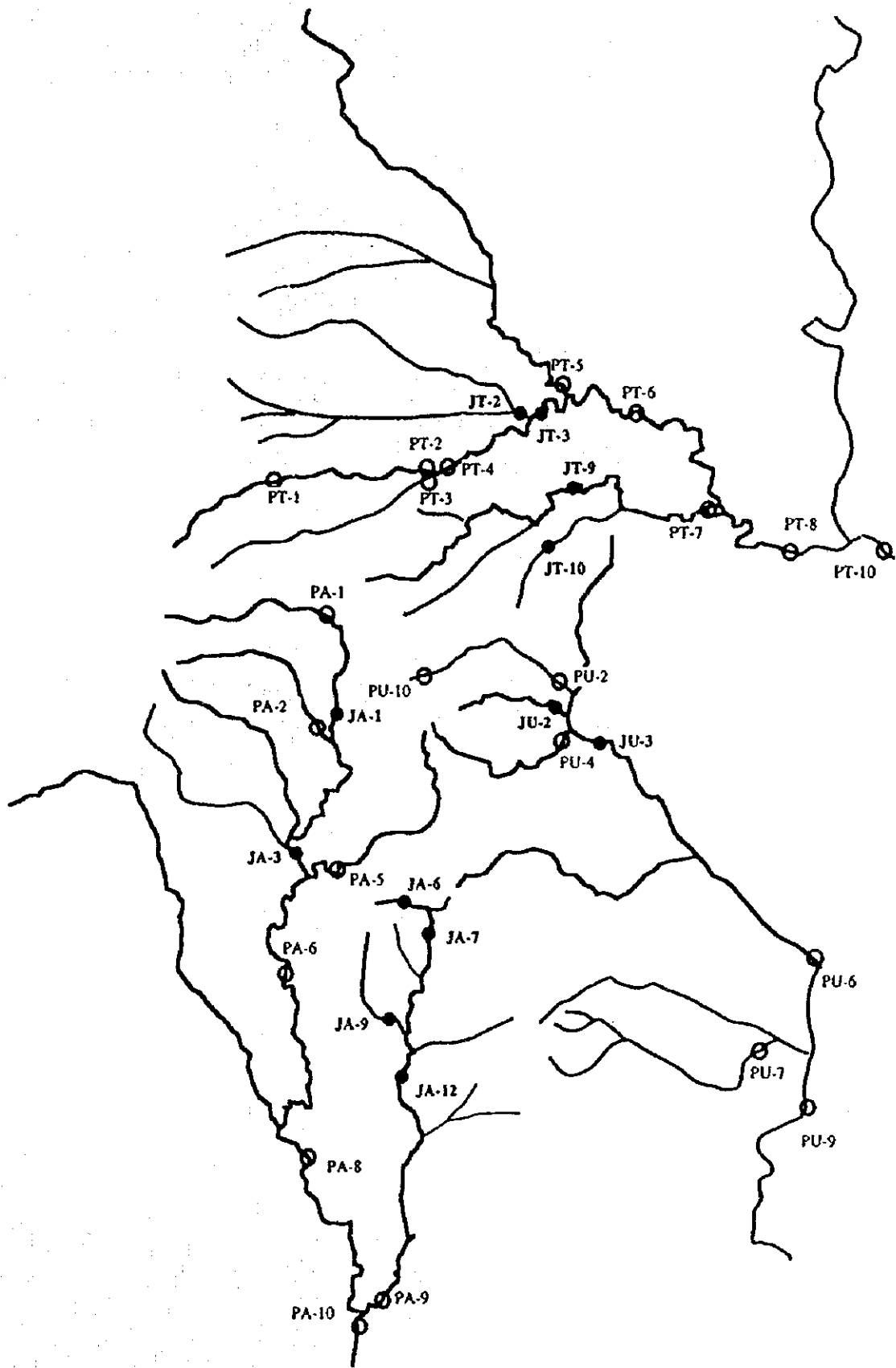


図 B-32

環境モニタリングシステム測定点

- 調査項目：携帯用メーターによる現地測定と実験室における分析
- ・現地測定項目：水質（水温、pH、DO、電気伝導率、濁度）、流量
 - ・水質分析項目：酸性水指標項目（硫酸イオン、鉄、アルミニウム）、重金属類（鉛、亜鉛など）
 - ・その他（懸濁物質など）

67 モニタリングシステム用機器：水質自動モニタリング装置の配備及びこれらのオンライン・オフラインネットワークを通じての情報の集約化は、これまで述べた様に現状では必要としない。モニタリングデータは、パソコンによるデータベースによって一括管理し、必要に応じてデータの集約、グラフィック化等が行なえるソフトウェアで対応可能であると考えられる。以上述べた現地測定機器及びパソコン、ソフトウェアは、FATMA 所有の機器および、本調査で FATMA に供与された機材で対応可能である。また、水質分析は、FUCRI/UNESC のラボで対応可能である。

6.3 汚染源の水質監視

68. 汚染源の水質監視：稼働鉱山や再洗炭業者は自費により排水のモニタリングを実施し、必要な場合 FATMA がそのモニタリング記録をチェックする。