

第 II 部 : 地下水汚染対策

第 13 章 廃さい堆積場およびワジ・スーク川の
地下水汚染対策

第 13 章 廃さい堆積場およびワジ・スーク川の地下水汚染対策

第 I 部の調査結果から廃さい堆積場およびワジ・スーク川の上流域が、高濃度の塩分および重金属類による地下水と土壌の汚染および被害の状況が明らかとなった。ワジ・スーク川上流部の汚染の浄化並びに下流側への汚染拡散の防止対策を図ることは急務である。

ワジ・スーク川の汚染対策は、図 13.1 に示すとおり廃さい堆積場～サブエリア-1 の区域およびワジ・スーク川下流部のサブエリア-1、3、4、5 の区域に大別される。

以下、本フィージビリティ調査の主要目的であるワジ・スーク川の地下水汚染対策について区域ごとに検討を行う。

13.1 廃さい堆積場の汚染対策

廃さい堆積場からトレンチ-1 および-2 (サブエリア-1) までの汚染対策については、OMCO によって検討され、その具体的な汚染対策案が提出され、オマーン政府によって既に承認を受け、蒸発池等一部の建設が開始されている。

本調査では OMCO の汚染対策案についてレビューし、代替案を含めて再検討を行った。

13.1.1 廃さい堆積場の汚染ポテンシャル

廃さい堆積場はワジ・スーク川流域に対する多量の塩分および重金属汚染の一次汚染源であり、現在もなお塩分および重金属による汚染が進行し、将来もこれらの汚染が継続するものと予想される。

また、廃さいは 1,000 t 当り CaCO_3 当量で最大 650 t に相当する酸性水を発生するポテンシャルを有しているが、現状では廃さい堆積場に添加された石灰による中和能によりほぼ中性を保持している。しかし、将来においても廃さい堆積場からの酸性浸出水の発生は継続され、堆積場内の石灰による中和能並びに川沿いのカルクリート (CaCO_3 を主成分とする) 化した河床堆積物による中和能が強力な緩衝作用を発揮するとしても、不測の状況変化による酸性浸出水の発生から新たな地下水汚染が生じる可能性も予想される。

したがって、廃さい堆積場からトレンチ-1～2 (サブエリア-1) の汚染対策は、汚染源対策として極めて重要であり、汚染物質の減少並びに封じ込めることが可能となる。

13.1.2 OMCO の汚染対策

1999 年に OMCO は、トレンチ-1～2 で集水した浸透水のリサイクル工程を終了させ、廃さい堆積場への雨水の浸透を防止する方法としてアスファルト系材質で被覆する案を作成した。この案の主要目的は堆積場から流出する浸透水を減量ないしは消滅させ、それにより地下水汚染源としての被害を低減させることにある。

OMCO 案を図 13.2 に示し、その概要を以下に述べる。

- ・ 現在も行っているトレンチ - 1 および - 2 からの浸透水を廃さい堆積場に返送する工程を

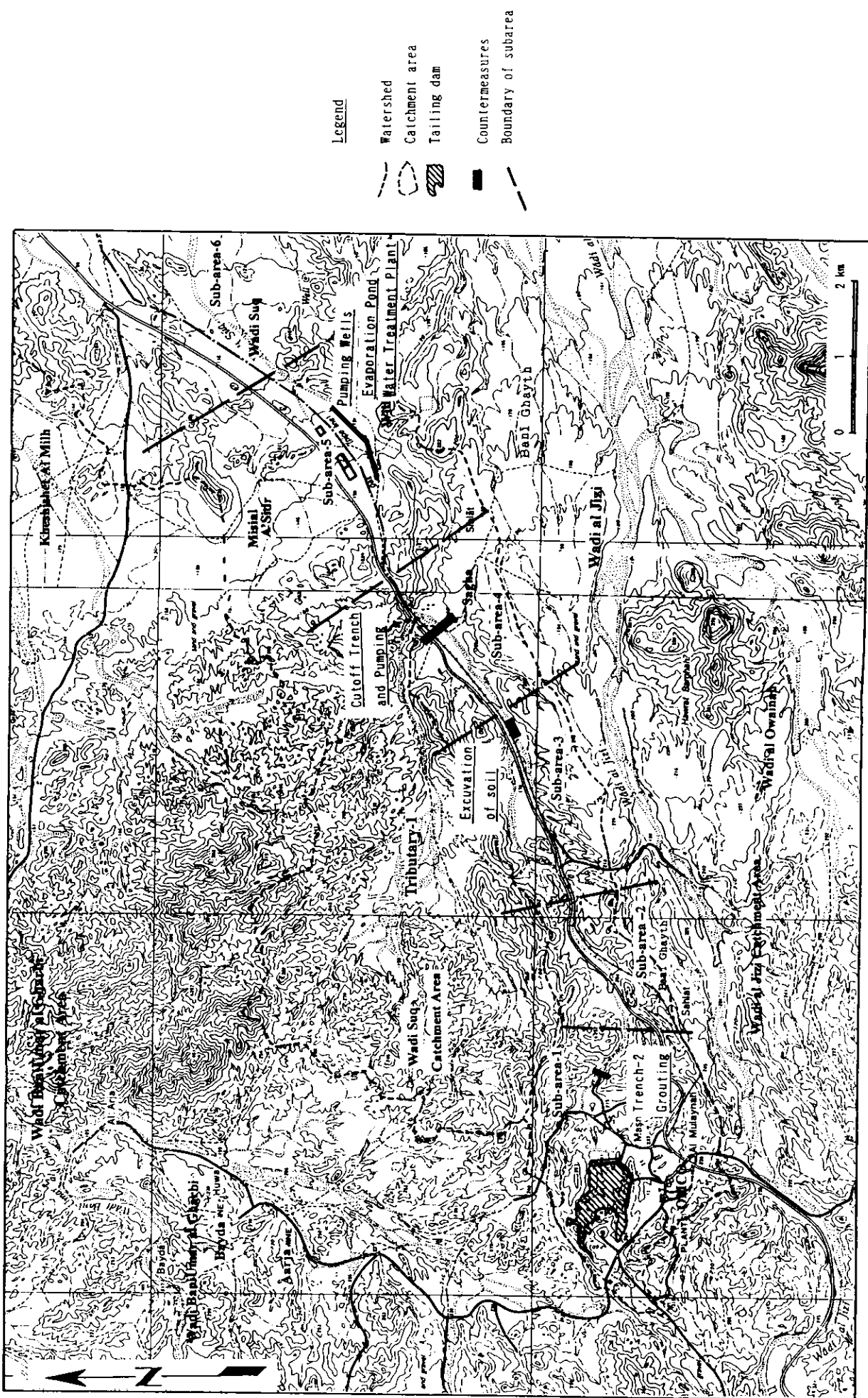


図13.1 ワジ・スーク川沿いの汚染対策地点

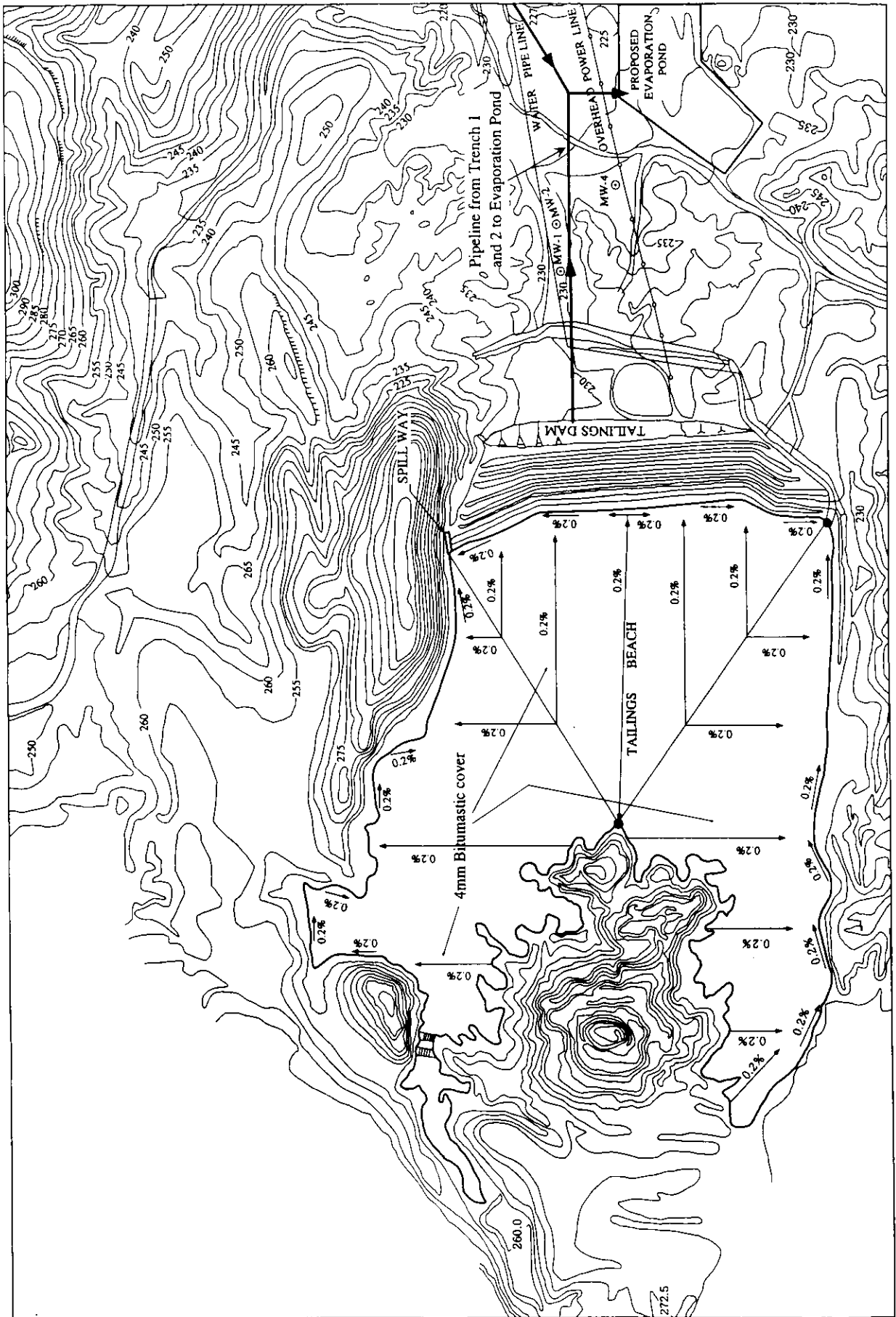


図 13.2 OMC0 による廃さい堆積場および蒸発池の計画

停止し、トレンチへの浸透水は堆積場下流部（サブエリア-1）に建設する蒸発池へポンプ流送する。蒸発池では年間推定 5 万 m³の浸透水が処理されることになる。蒸発池の面積は 3.26ha である。汚染水の地下遺漏を防止するため、蒸発池の底面には 2mm 厚の軟質 HDPE シートで被覆する。

- ・堆積場内の表面は東方向（下流側）へ排水するように敷きならす（現在の表面勾配は略西方向に 1~2%である）。廃さいの表面の計画勾配は 0.2%である。堆積場内へ流入する雨水は山腹水路で集水し、堆積場東側のワジ・スーク川に排水する。廃さい表層の整形には約 1.3 百万 m³の土工が必要である。
- ・整形後の表面は 4mm 厚のアスファルト被覆材で被覆する。重ね合せ部の継ぎ目は、不透水性とするためにシールする。

13.1.3 廃さい堆積場の汚染対策代替案

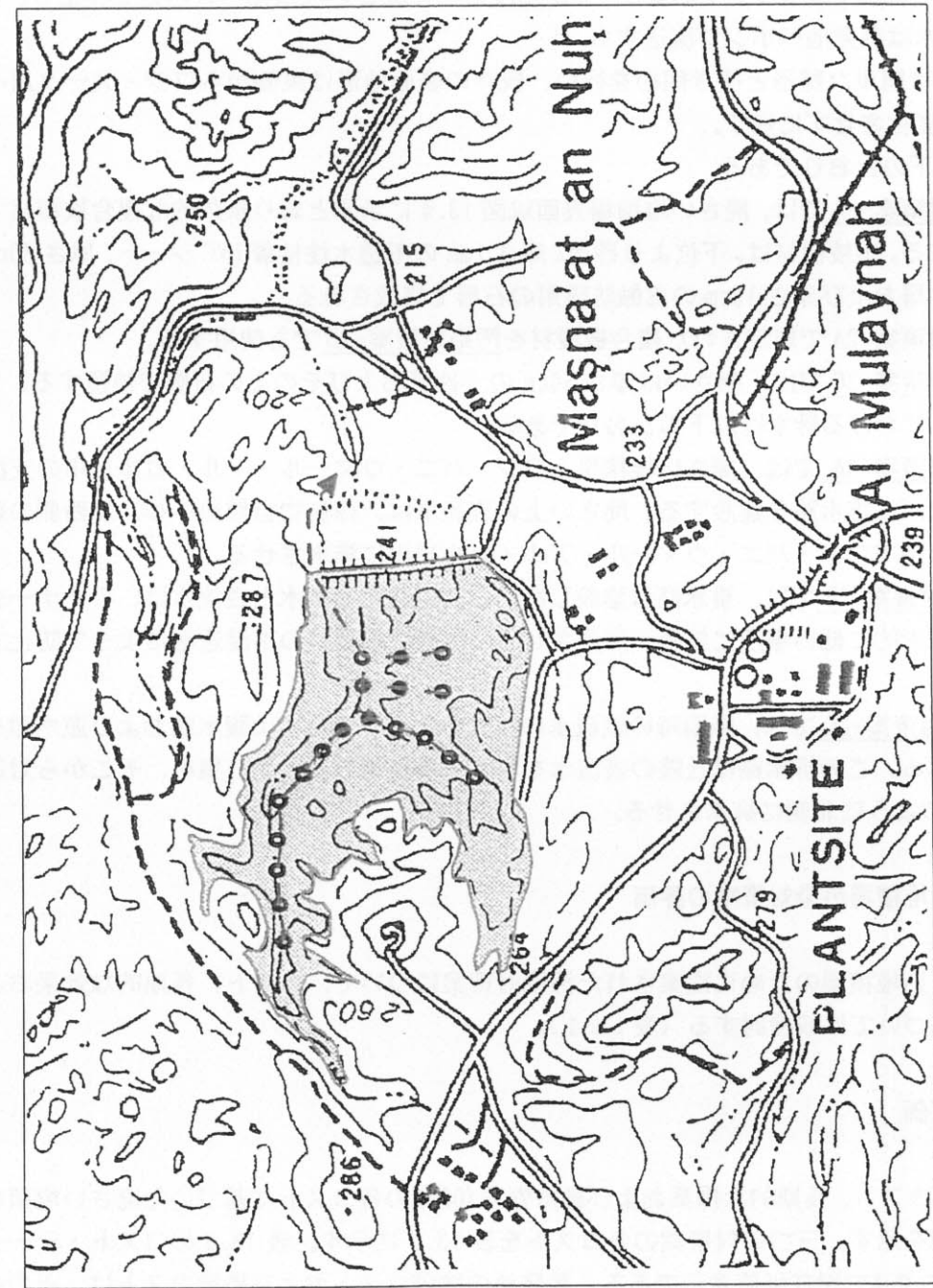
廃さい堆積場の汚染対策代替案は、1)揚水井の設置（汚染対策案-1）、および 2)複合被覆材による被覆（汚染対策案-2A、2B および 2C）の 4 案からなり、以下に各対策案の番号を示し、各代替案の内容を以下に説明する。

廃さい堆積場の汚染対策案	:	汚染対策案の番号
1) 揚水井の設置	:	汚染対策案-1
2) 複合被覆材による被覆	:	汚染対策案-2A
	:	汚染対策案-2B
	:	汚染対策案-2C

(1) 汚染対策案-1： 揚水井の設置

本調査の汚染対策案-1では、廃さいから水を抜く目的で一連の揚水井戸を設置する。地下水の揚水は堆積場内の地下水を排除して、堆積場からの浸透水を無くすことである。汚染対策案-1の措置は以下のとおりである。

- ・OMCO 案と同様にトレンチ-1 および-2 から浸透水の廃さい堆積場への返送を停止し、トレンチの浸出水は蒸発池へポンプ流送する。
- ・堆積場への流入雨水の排除のため、山腹水路と遊水池を設置する。集水した表流水は北方向に排出する。
- ・一連の揚水井戸の設備は廃さい中の地下水を抜水し、ワジ・スーク川下流側への浸透水源および背後のワジ・バニ・ウマール・アル・ガルビ川への漏水も減少する。この井戸群の配置を図 13.3 に示すとおり、以前の河川路に対応している。
- ・揚水井戸群は、平均深度約 40m で 19 基の井戸で構成される。各井戸には、自動電動水中ポンプを設置する。廃さいは低い透水性を示すことから揚水量は少なく、揚水量は 61 m³/日 (22,300 m³/年) と算定される。
- ・揚水した地下水は全量を蒸発池にポンプで送り、処分する。



○ Pumping well
 : 19 drill holes
 (100 m interval)
 40 m in depth
 12-1/4" in diameter
 8" PVC casing
 Pump

↗ Drainage line

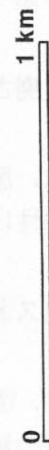


図 13.3 廃さい堆積場内の揚水計画

- ・ 風による廃さいの飛散を防止するため、廃さいの表面はすべて 30cm 厚の土で被覆し、更に風蝕を防ぐため石で防護する（後述の汚染対策案-2C と同様である）。

(2) 汚染対策案-2 : 複合被覆材による被覆

本調査の汚染対策案-2 は永久的な複合被覆材による被覆であり、表面からの雨水の浸透を遮断し、廃さい堆積場からの浸透水を減少させることである。汚染対策案-2 での措置は以下のとおりである。

- ・ 汚染対策案-1 と同様トレンチ - 1 および - 2 から浸透水の廃さい堆積場への返送を停止し、トレンチの浸透水は蒸発池へポンプ流送する。
- ・ 廃さいの表面は簡単な整形と突き固めを行い、既存の表面地形は東側からワジ・スーク川へ排水するため変化させずに残す。
- ・ 被覆作業は以下のとおりである。
 - 1) 汚染対策案-2A では、廃さい堆積場表面は図 13.4 に示すとおり永久的な複合被覆材で被覆する。本被覆材は、下位より砂層、厚さ 1mm の不透水性接着 PVC シート、厚さ 30cm の土砂層および厚さ 15cm の風蝕防護用の石層で構成される。
 - 2) 汚染対策案-2A で規定された複合被覆材を汚染対策案-2B でも使用する。
 - 3) 汚染対策案-2C では、廃さいは厚さ 50cm の土砂層およびその上の石層で被覆する。
- ・ 汚染対策案-2 における排水は以下のとおりである。
 - 1) 汚染対策案-2A では、廃さい堆積場とワジ・バニ・ウマール・アル・ガルビ川の支流につながる排水路を建設する。廃さい上の表流水は、西側に自然流下し、北西側の新規排水路でワジ・バニ・ウマール・アル・ガルビ川に排水させる。
 - 2) 汚染対策案-2B では、排水路は建設しない。その代わり雨水と表流水は、ライナー表面の地形的に低い場所に集め、蒸発させる。浸透は被覆材の不浸透層によって防止する。
 - 3) 汚染対策案-2C では、降雨時の表流水の流入を防止するため山腹水路および遊水池を設置する。この排水路は丘陵の表流水を廃さい堆積場の西と北に集め、そこから対策案-1 のように北側に排水させる。

13.1.4 廃さい堆積場汚染対策案の評価

本項では、廃さい堆積場のために提案された汚染対策案について、コスト、長期的な効果およびその実現性に基づいて比較検討する（表 13.1）。

(1) コスト評価

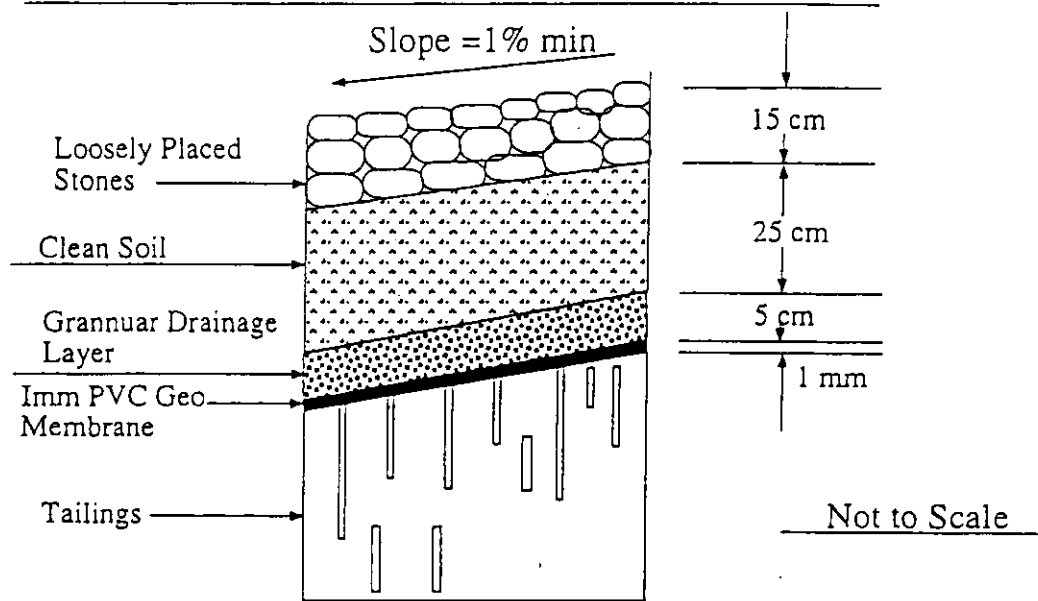
コストは、建設コスト、長期的な操業および維持管理(O&M)の各コストに基づいた廃さい堆積場の汚染対策の評価を示す。三つの対策案の各コストを表 13.2 に示す。表 13.2 のコスト・データは、2001 年現在の US\$ で現在価値表示である。蒸発池の建設コストおよび操業コストは、どの対策案でもその建設、操業、維持管理が必要なために対策案の比較には含めない。

表 13.1 廃さい堆積場の汚染対策 (OMCO) の評価

Evaluation of Tailing Dam Alternatives for Effectiveness, Implementability, and Cost

Alternative	Effectiveness	Implementability	Cost
OMCO Plan	Initially, OMCO's plan will effectively eliminate infiltration will significantly reduce seepage from the dam. However, this is not a permanent remedy because the proposed bitumen liner will require replacement in the future, unless covered by a protective soil layer.	Implementation of this alternative will require moving a large volume (1.3 million m ³) of tailings. The acidic condition of the tailings may pose risks to workers. Installing the bitumen liner will be labor intensive. The design slope of 0.2% is nearly impossible to achieve. Also, the tailings may continue to consolidate after re-contouring.	The net present value of this alternative is extremely high due to the volume of tailings that would be excavated and filled to achieve design slopes, the high initial cost of the bitumen liner, and the future replacement costs of the liner.
Alternative 1	The estimated pumping rate for the extraction wells under Alternative 1 is less than the estimated infiltration rate. Hence, seepage from the dam may continue to occur despite the pumping. Pumping will be required continuously into the future to deal with rainfall that will continue to infiltrate the tailings. If pumping stops in the future, seepage will begin to occur again.	This alternative is implementable using readily available technology. However, the corrosive nature of the tailings and groundwater in the tailings will create maintenance problems. Pump replacement costs are expected to be high.	The net present value of Alternative 1 is in the middle of the range of tailings dam alternatives. However, O&M costs will continue beyond the 20 year time period used for the cost analysis of this alternative.
Alternative 2A	This alternative is expected to eliminate surface infiltration, thereby eliminating seepage from the tailings dam. The proposed capping design is expected to be permanent with no replacement needed in the future. Eliminating infiltration will have beneficial effects on water quality in both Wadi Suq and Wadi Bani Umar al Gharbi.	This alternative is readily implementable with available materials and technologies. Little or no long-term O&M is required in the future.	The net present value of this alternative is high compared to other JICA alternatives due to high initial capital costs. However, the cost of this alternative is approximately ¼ the present value of OMCO's proposed plan.
Alternative 2B	This alternative is expected to be as effective as Alternative 2A. The cover system is the same as proposed in Alternative 2A and is expected to perform equally as well. However, water ponded on top of the cover system may result in degradation of the cover system over a long period of time, say 50 to 100 years.	This alternative is readily implementable with available materials and technologies. However, some long-term maintenance may be required in the future.	The cost of this alternative is slightly less than Alternative 2 A but the long-term effectiveness may also be diminished slightly.
Alternative 2C	According to hydrologic modeling results, this cover design is almost equally effective as Alternatives 2A and 2B. However, some infiltration would occur under this alternative.	This alternative is readily implementable with available materials and technologies. Long-term maintenance of the drainage channels would be required.	This is the lowest cost alternative proposed for the tailings dam.

Tailings Dam Cover Design (1)



Tailings Dam Cover Design (2)

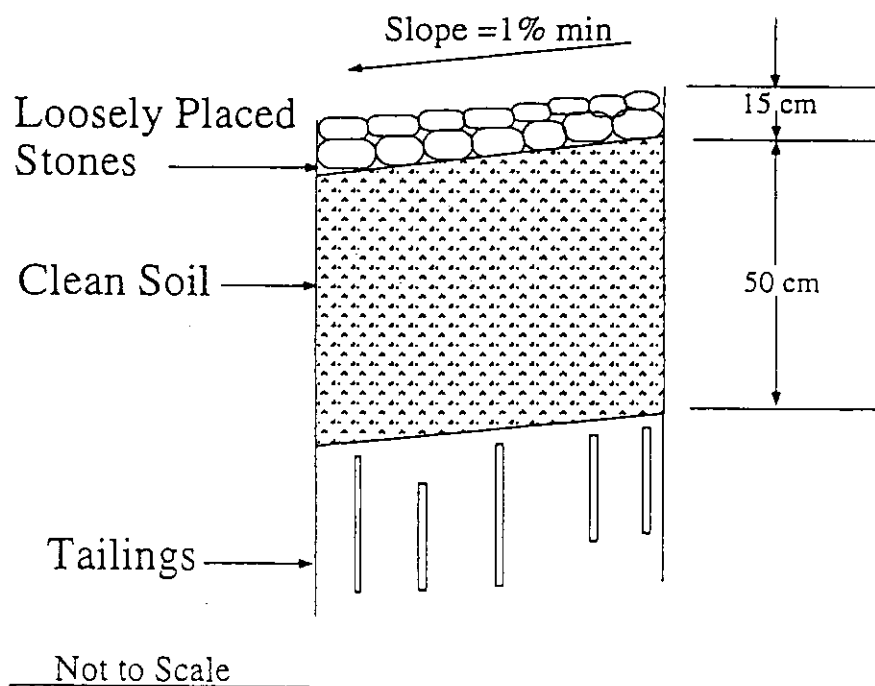


図 13.4 廃さい堆積場の被覆材の検討

表 13.2 廃さい堆積場汚染対策案のコスト比較

(単位：US\$)

汚染対策案名	積算建設コスト
OMCO 案	16,084,000
汚染対策案-1	9,000,000
汚染対策案-2A	12,000,000
汚染対策案-2B	12,000,000
汚染対策案-2C	6,000,000

(2) 廃さい堆積場汚染対策案の評価

廃さい堆積場の汚染対策については OMCO 案を含め 5 案を提示したが、OMCO による廃さい堆積場の汚染対策は既に開始されていることを勘案すれば、OMCO 案を選定せざるを得ないと考えられる。

ただし、実行性の観点から、堆積場内の勾配 0.2%の達成の困難性および廃さいの圧密作用の継続による不同沈下の発生から勾配の再検討、さらに廃さいの移動時の作業状況の悪化には十分留意する必要がある。

13.2 ワジ・スーク川の汚染対策

廃さい堆積場から下流のワジ・スーク川に対する汚染対策の位置は、サブエリア-1、3、4 および 5 の 4 箇所からなる (図 13.1)。各サブエリアの汚染対策案および水処理は下記に示すとおり 7 案からなり、汚染対策案の番号を下記に示し、各汚染対策案の詳細を以下に述べる。

廃さい堆積場の対策案	:	汚染対策案の番号
・サブエリア-1	:	汚染対策案-3
・サブエリア-3	:	汚染対策案-4
・サブエリア-4	:	汚染対策案-5A 汚染対策案-5B
・サブエリア-5	:	汚染対策案-6
・汚染地下水処理	:	汚染対策案-7A 汚染対策案-7B

13.2.1 サブエリア-1の汚染対策 (汚染対策案-3)

サブエリア-1の末端にはトレンチ-2が設置されている。本トレンチにはコンクリート製の遮水壁および基盤中へのカーテン・グラウトによる遮水が施工されている。しかし、遮水効果は十分ではなく、トレンチ底部 (あるいは側方) からの漏洩が継続され下流部への汚染が拡大し、現在の汚染状況を悪化させた原因の一つと考えられる。

ワジ・スーク川沿いの地下水汚染シミュレーションの結果 (第7章参照) では、対策なしでは

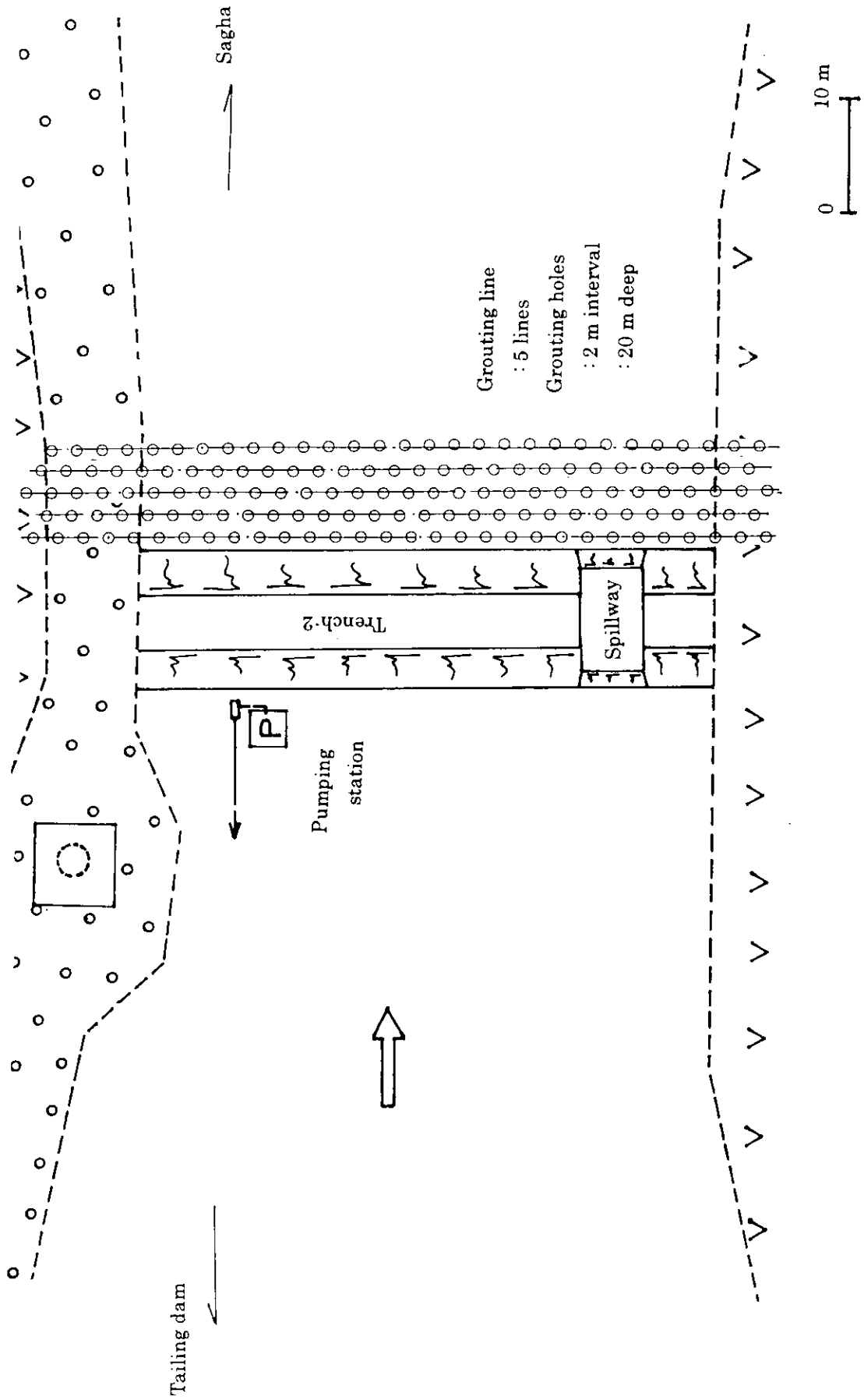


図 13.5 トレンチ-2のグラウト計画の概要

(3) 費用積算

トレンチ-2におけるグラウト工の総費用は、下記に示すとおり US\$1,700,000 である。

1) 調査ボーリング工事費	US\$	70,000
2) グラウト工事費	US\$	1,630,000
合計	US\$	1,700,000

(注：工事費には、経費、予備費、雑費を含む。)

13.2.2 サブエリア-3の汚染対策（汚染対策案-4）

サブエリア-3は、ワジ・スーク川本流 6.2km 地点からボーリング孔 DH-3 までの約 2.5km である（図 13.1）。サブエリア-3の汚染箇所は、サブエリア-3の最下流部（DH-3 付近）から PS-2 ポンプ所までであり、海水用の送水管から長期間にわたる海水の漏洩に起因する塩分を含む汚染土壌が分布している（図 13.6）。この区域における海水の汚染については、1995 年の水資源省のワジ・スーク川に関する報告書にその概略が記載されている。本調査の詳細調査では、塩分で汚染された土壌が局地的に分布していることが明らかとなり、ワジ（河川）内地下水の主要な二次汚染源になっていると考えられる。なお、本汚染土壌は海水からの塩分による汚染のみであり、廃さい堆積場からの重金属類を含む汚染とは異なる。

PS-2 周辺の汚染土壌の対策なしでの放置では、今後とも下流側の地下水を汚染し、さらに周辺の植生にも悪影響を及ぼし続けると考えられる。したがって、汚染物質を除去し地下水質を改善する必要がある。

汚染物質の除去方法としては、汚染土壌の掘削除去工（汚染対策案-4）に限定される。

汚染土壌は海水のみの汚染であることから、全量を海岸部の埋め立て等による処分が可能である。また、掘削箇所は、清浄な土で置換する必要があるため、清浄な土は周辺から供給し、その埋め戻し量は約 25,000 m³ である。

(1) 掘削除去工の内容

掘削除去工の内容を以下に示す。

- 1) 掘削工事位置 : DH-3 地点～PS-2 地点間
- 2) 掘削工事仕様
 - ・掘削の延長 : 400 m
 - ・掘削の幅 : 10～70m (平均40m)
 - ・掘削深度 : 地表0～3m (平均2m)
 - ・掘削量 : 35,000 m³
 - ・埋め戻し量 : 25,000 m³

3) 使用機器等

- ・ブルドーザー : D-8 クラス : 3 台 : リッパ付
- ・油圧ショベル : 2m³クラス : 3 台
- ・ダンプトラック : 20 t 積載 : 10 台

(2) 工程

掘削除去工の工程を表 13.4 に示す。工事期間は約 4 ヶ月を要する。

表 13.4 掘削除去工の工程

工事内容 (月)	1	2	3	4	5	備考
1. 準備・移動	■					
2. 掘削		■	■	■		
3. 運搬		■	■	■		
4. 埋め戻し			■	■		周辺部 から供給
5. 撤収					■	

(3) 費用積算

PS-2 地点における掘削除去工の総費用は、下記に示すとおり US\$ 1,100,000 である。

1) 掘削・運搬工事費	US\$	800,000
・掘削費		300,000
・運搬費		500,000
2) 埋め戻し工事費	US\$	300,000
合計	US\$	1,100,000

(注：工事費には、経費、予備費、雑費を含む。)

13.2.3 サブエリア-4 の汚染対策 (汚染対策案-5A、5B)

サブエリア-4 は PS-2 地点から KM-14 地点 (サガ部落) の DH-4 孔に至る 3.5km の距離を有する (図 13.6)。サブエリア-4 には地下水の汚染源はなく、汚染地下水はすべて上流側から移流・拡散されたものであり、高濃度な塩分と重金属類に汚染されている。

KM-14 地点 (サガ部落) はサブエリア-4 の末端であり、幅約 70m の自然の狭窄部となっている。

この自然の地形構造は、表流水および地下水の流動に対しダム・アップ効果をあげており、汚染地下水の自然的制御にもすぐれた働きを有している。ダム・アップ効果により、サブエリア-4 より下流側では、サブエリア-5 の局所的な地下水汚染を除いて全体の汚染度が極端に減少していることが認められた。

しかし、KM-14 地点における汚染対策が実施されない場合には、今後とも汚染地下水の流下が継続し、さらに高濃度の塩分と重金属類がワジ・スーク川の中流～下流域（農業・人口密集域）に達し、汚染地下水による被害の増大が確実である。したがって、KM-14 地点における汚染対策の実施は急務であり、有効な対策を実施する必要がある。

なお、KM-14 地点では支流-1 が合流しているが、支流-1 の地下水は清浄であることから、本流側の汚染地下水と混合させることは得策でなく、清濁分離による支流-1 の地下水をそのまま流下させ、下流側の地下水を清浄化並びに涵養を継続する必要がある。したがって、KM-14 地点の汚染対策の位置は支流-1 との合流点の上流側が望ましい。

サブエリア-4 の汚染対策案は対策案-5A および 5B の 2 案からなり、各対策案を以下に述べる。

- ・汚染対策案-5A : 揚水井戸による揚水および送水
- ・汚染対策案-5B : 集水トレンチによる揚水および送水

(1) 汚染対策案-5A

サブエリア-4 の汚染対策案-5A は、支流-1 の合流点上流側に位置するボーリング DH-4 孔地点に揚水井戸群を設置し（図 13.6）、汚染地下水を揚水・浄化する計画であり、その内容を以下に示す。

- ・ボーリング DH-4 孔付近において、ワジ・スーク川に直交させて揚水井戸群を配置し、汚染地下水を揚水する。
- ・支流-1 の河川水は比較的清浄であり、本流との合流地点が揚水井戸群の下流側に位置していることから、そのまま下流側に流出させる。
- ・揚水した汚染地下水はサブエリア-5 の汚染水処理施設にポンプ送水する。

a. 揚水井戸工の内容

- ・揚水井戸工の仕様を以下に示す。
 - 1) 揚水井戸工の位置 : DH-4 孔地点
 - 2) 揚水井戸工の仕様
 - ・揚水井戸群の延長 : 460 m
 - ・揚水井戸の孔数 : 22 孔 (20 mピッチ)
 - ・揚水井戸の孔径 : 12・1/4 inch
 - ・揚水井戸掘進長 : 30 m
 - ・ストレーナー孔径 : 8 inch (PVC)
 - ・ストレーナー深度 : 4~30 m
 - ・実揚水量 : 150 m³/日
 - ・揚水量の算定

(算定式)

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - H_0^2)}{2.303 \log(R/R_0)} \dots\dots\dots \text{深井戸の式}$$

Q : 揚水量 (m³/s)

k : 透水係数 (m/s)

H : 水頭 (m)

H₀ : 揚水時の水深 (m)

R : 影響圏の半径 (m)

$$R = 3000 \cdot S_w \cdot k^{1/2} \quad \text{(ジーハルト式)}$$

$$3000 \cdot 11.39 \cdot (7.76 \times 10^{-6})^{1/2} = 95.2 \text{ m}$$

R₀ : 水井戸の半径 (m)

$$= \frac{3.14 \times 7.76 \times 10^{-6} \times (6.39^2 - 0^2)}{2.303 \log(95.2/0.203)}$$

$$= 1.62 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$= 13.9 \text{ m}^3/\text{d/孔} \quad (\text{全揚水量 : } 308 \text{ m}^3/\text{日})$$

・実揚水量 : 150 m³/日

3) 使用機器等

- ・パーカッション・ドリリング・リグ : Air-form使用 : 1台
- ・揚水ポンプ : 22台
- ・水位計 : 22台

b. 工程

揚水井戸工 (汚染対策案-5A) の工程を表 13.5 に示す。工事期間は約 4 ヶ月を要する。

表 13.5 揚水井戸工の工程

工事内容 (月)	1	2	3	4	5	備考
1. 準備・移動	■					
2. 揚水井戸掘削		■	■	■		ガス管に留意
3. 洗浄・揚水ポンプ設置		■	■	■		
4. 配管等付帯工事				■		
5. 撤収					■	

c. 費用積算

KM-14 地点における揚水井戸工の総費用は、下記に示すとおり US\$ 800,000 である。

1) 揚水井戸工事費	US\$	500,000
・揚水井戸掘削費		300,000
・洗浄・仕上げ等費		40,000
・ポンプ設置費		160,000
2) 配管等工事費	US\$	300,000
合計	US\$	800,000

(注：工事費には、経費、予備費、雑費を含む。)

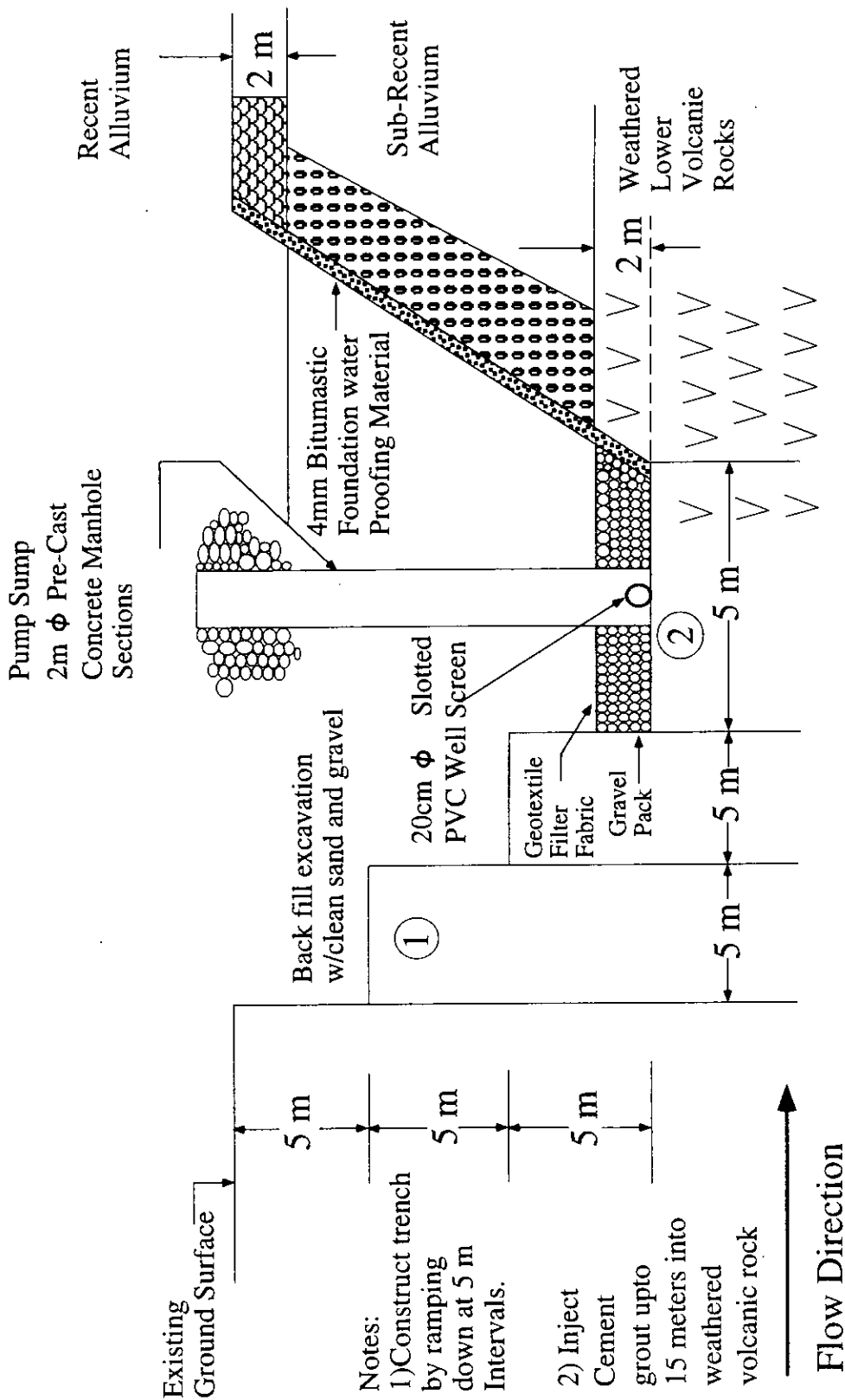
(2) 汚染対策案 - 5B

サブエリア-4の汚染対策案 - 5Bは、汚染対策案 - 5Aの位置に集水トレンチを設置し(図 13.6)、汚染地下水を揚水・浄化する計画であり、その内容を以下に示す。

- ・集水トレンチはDH-4孔の位置において、ワジ・スーク川に直交に設置し、汚染地下水を揚水する。
- ・集水トレンチの断面を図 13.7 に示す。
- ・集水トレンチ部の基岩の深度は5～14mであり、基岩は風化～弱風化玄武岩質枕状溶岩～塊状岩からなる。河床堆積物の下部層はカルクリートで固結した洪積層であり、上部層は未固結の沖積層からなる。
- ・集水トレンチの下流側には遮水壁を設置し、亀裂の発達した風化基岩部にはグラウト工により遮水性を向上させる計画である。
- ・集水トレンチの延長が460mであり、掘削は基岩の表層まで掘削する。掘削工事時、ガス・パイプライン、海水の輸送管、国道および送電設備等に支障のないよう留意する必要がある。
- ・支流 - 1の河川水は比較的清浄であり、本流との合流地点が集水トレンチの下流側に位置していることから、そのまま下流側に流出させる。
- ・揚水した汚染地下水はサブエリア - 5の汚染水処理施設にポンプ送水する。

a. 集水トレンチ工の内容

- ・集水トレンチ工の仕様を以下に示す。
 - 1) 集水トレンチ工の位置 : DH-4 孔地点
 - 2) 集水トレンチ工の仕様
 - ・集水トレンチの長さ : 460 m
 - ・集水トレンチの幅 : 10～15 m
 - ・集水トレンチの底面幅 : 5 m



X-section area=262.5 m²

図13.7 サブエリア-4における遮水用トレンチの概念設計

- ・基岩掘削・埋め戻し量 : 50,000 m³
- ・掘削床付け面積 : 5,900 m²
- ・底板コンクリート量 : 1,400 m³ (厚さ: 50cm)
- ・下流斜面防護コンクリート量 : 4,350 m³ (厚さ: 75cm)
- ・下流斜面伸縮目地 : 300 m
- ・下流斜面ビチューメン仕上げ : 8,500 m²
- ・排水工事 : 1式
- ・コンクリート井戸 : 1式 (直径1m)
- ・揚水量の算定

(算定式)

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - H_o^2)}{2.303 \log(R/R_o)} \dots\dots\dots \text{深井戸の式}$$

Q : 揚水量 (m³/s)

k : 透水係数 (m/s)

H : 水頭 (m)

H_o : 揚水時の水深 (m)

R : 影響圏の半径 (m)

$$R = 3000 \cdot S_w \cdot k^{1/2} \dots\dots\dots \text{(ジーハルト式)}$$

$$3000 \cdot 6.39 \cdot (7.76 \times 10^{-6})^{1/2} = 53.4 \text{ m}$$

R_o : 水井戸の半径 (m)

$$= \frac{3.14 \times 7.76 \times 10^{-6} \times (6.39^2 - 0^2)}{2.303 \log(53.4/31.8)}$$

$$= 1.92 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec} \quad (\text{全揚水量 : } 165 \text{ m}^3/\text{日})$$

- ・実揚水量 : 150 m³/日
- ・その他 : 道路移設および復旧、電線移設および防護、ガス管移設および保護

3) 使用機器等

- ・油圧ショベル : 2m³クラス : 4台
- ・ブルドーザー : D-8クラス : 2台 (リッパ付)
- ・ダンプトラック : 10t積載 : 5台
- ・揚水ポンプ (工事用) : 5台
- ・揚水ポンプ (揚水用) : 1台
- ・水位計 (モニター用) : 3台
- ・その他

b. 工程

集水トレンチ工（汚染対策案-5B）の工程を表 13.6 に示す。工事期間は 11 ヶ月を要する。

表 13.6 集水トレンチ工の工程

工事内容 (月)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. 準備・移動	■										
2. ボーリング調査		■									
3. 排水設備の設置		■	■								
4. 掘削工事			■	■	■	■	■				
5. 下部のコンクリート打設				■	■	■	■	■			
6. グラウト工事					■	■	■	■	■		
7. 斜面部コンクリート打設						■	■	■	■	■	
8. 埋め戻し							■	■	■	■	■
9. 撤収											■

c. 費用積算

KM-14 地点における揚水井戸工の総費用は、下記に示すとおり US\$ 5,400,000 である。

1) 集水トレンチ工事費	US\$	3,500,000
2) ボーリング調査費	US\$	500,000
3) グラウト工事費	US\$	1,400,000
合計	US\$	5,400,000

(注：工事費には、経費、予備費、雑費を含む。)

13.2.4 サブエリア-5 の汚染対策（汚染対策案-6）

サブエリア-5 は KM-14 地点からボーリング DH-5 孔までの 4km 区間である（図 13.6）。本区間内にはミシャル・ア・シドゥール部落が位置している。本区間の地下水はワジ・スーク川の本流部

に沿って局部的に汚染地下水が分布している。また、廃さい堆積場を汚染源とする地下水汚染の他に、鉍化作用ならびに海水搬送用パイプラインからの漏水による局部的人為的汚染と自然的汚染がある。また、支流-3はワジ・スーク川本流とほぼ並行に東流しているが、汚染されていない。

サブエリア-4からの汚染地下水は、KM-14下流側の地形的に狭まった谷を流下したサブエリア-5内に汚染を拡大させている。サブエリア-5への汚染地下水の流下は、サブエリア-4での汚染対策が実施されない限り今後とも継続するが、既にサブエリア-5に流出した汚染地下水はサブエリア-5内に滞留しており、今後さらに下流側に流下し、高濃度の塩分と重金属類がワジ・スーク川の中流～下流域（農業・人口密集域）に達し、汚染地下水による被害の増大が確実である。

したがって、サブエリア-5における汚染対策の実施は有効であると考えられる。また、本地点では地下水の改善が確認された時点において終了となる。

サブエリア-5の汚染対策案は揚水井戸による対策に限られる。汚染対策案-6の詳細を以下に述べる。

- ・サブエリア-4の汚染対策-1と同様に、揚水井戸群の設置からなる。揚水井戸群の配置は図13.6に示すとおり河川に並行し、現在の河川の流路に沿って、汚染地下水を確認したボーリングDH-5孔付近まで至る。なお、揚水井戸群の配置を河川に直交させるケースは、支流-1等からの清浄地下水を含めて過剰の地下水を揚水することから、非現実的であり、対策案から除外する。
- ・ボーリングの配置延長は600mであり、揚水井戸数および掘削深度はそれぞれ20孔および40mである。実揚水量は200m³/日と算定される。
- ・ワジ・スーク川の本流で揚水することにより、北側方向のミシャル・ア・シドゥール部落ならびに支流-3への汚染拡散は効果的に減少する。
- ・揚水された汚染地下水はサブエリア-5の汚染水処理施設にポンプ送水する。

a. 揚水井戸工の内容

・揚水井戸工の仕様を以下に示す。

- 1) 揚水井戸工の位置 : DH-5孔の上流側
- 2) 揚水井戸工の仕様
 - ・揚水井戸群の延長 : 600 m
 - ・揚水井戸の孔数 : 20 孔 (30mピッチ)
 - ・揚水井戸の孔径 : 12・1/4 inch
 - ・揚水井戸掘進長 : 40 m
 - ・ストレーナー孔径 : 8 inch (PVC)
 - ・ストレーナー深度 : 20～40 m
 - ・揚水量の算定

(算定式)

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - H_o^2)}{2.303 \log(R/R_o)} \dots\dots\dots \text{深井戸の式}$$

Q : 揚水量 (m³/s)

k : 透水係数 (m/s)

H : 水頭 (m)

Ho : 揚水時の水深 (m)

R : 影響圏の半径 (m)

$$R = 3000 \cdot S_w \cdot k^{1/2} \quad (\text{ジーハルト式})$$

$$3000 \cdot 20.1 \cdot (7.42 \times 10^{-7})^{1/2} = 163.2 \text{ m}$$

Ro : 水井戸の半径 (m)

$$= \frac{3.14 \times 7.42 \times 10^{-7} \times (20.1^2 - 0^2)}{2.303 \log (163.2/0.203)}$$

$$= 1.41 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$= 12.2 \text{ m}^3/\text{d/孔} \quad (\text{全揚水量 : } 244 \text{ m}^3/\text{日})$$

・実揚水量 : 200 m³/日

3) 使用機器等

- ・パーカッション・ドリリング・リグ : Air-form 使用 : 1 台
- ・揚水ポンプ : 20 台
- ・水位計 : 20 台

b. 工程

サブエリア-5 の揚水井戸工 (汚染対策案-6) の工程を表 13.7 に示す。工事期間は 4 ヶ月を要する。

表 13.7 揚水井戸工の工程

工事内容 (月)	1	2	3	4	備考
1. 準備・移動	■				
2. 揚水井戸掘削		■			ガス管・海水送水管に留意
3. 洗浄・揚水ポンプ設置		■			
4. 配管等付帯工事			■		
5. 撤収				■	