

国際協力事業団
ジョルダン国水灌漑省

ジョルダン国地下汽水淡水化計画調査

ファイナル・レポート

要 約

平成7年8月

JICA LIBRARY



J 1139978 [9]

八千代エンジニアリング株式会社
三井金属資源開発株式会社

社 調 二

JR

95-119

国際協力事業団

ジョルダン国水灌漑省

ジョルダン国地下汽水淡水化計画調査

ファイナル・レポート

要 約

平成7年8月

八千代エンジニアリング株式会社
三井金属資源開発株式会社



1139978[9]

序 文

日本国政府は、ジョルダン・ハシェミット王国政府の要請に基づき、同国の地下汽水淡水化計画にかかる調査を行うことを決定し、国際協力事業団がこの調査を実施いたしました。

当事業団は、平成6年4月から平成7年6月までの間、3回にわたり、八千代エンジニアリング株式会社の寺西良輔氏を団長とし、同社および三井金属資源開発株式会社から構成される調査団を現地に派遣しました。

調査団は、ジョルダン政府関係者と協議を行うとともに、計画対象地域における現地調査を実施し、帰国後の国内作業を経て、ここに本報告書完成の運びとなりました。

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

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

平成7年8月

藤田 公郎

国際協力事業団
総裁 藤田 公郎

ジョルダン国地下汽水淡水化計画調査団

伝 達 状

平成7年8月

国際協力事業団

総裁 藤田 公郎 殿

ジョルダン国地下汽水淡水化計画調査の最終報告書を提出致します。本報告書は、1994年3月から1995年8月までの間に、国際協力事業団と八千代エンジニアリング株式会社および三井金属資源開発株式会社から構成される共同企業体の間で締結された契約に基づいて、15ヶ月にわたって行われた調査の結果をとりまとめたものであります。本報告書は貴事業団の助言及び指示に従うとともに、ジョルダン国水資源灌漑省の意見を反映し作成しました。

本報告書では、ヒスバン、カフレイン、カラメー及びアブゼイガンを含むジョルダンバレー地域における地下汽水の開発可能量の調査結果と、ジョルダンバレー地域とアンマン市を含むジョルダン北部地域における深刻な水不足の解消を目的とした、年間約7千5百万 m^3 の地下汽水淡水化利用戦略について述べられています。

淡水化による地下汽水開発は、通常の地下水開発よりも費用の面で割高とはなりますが、本調査で得られた地下汽水淡水化による水価は、ジョルダン国の給水事業にとって十分に受け入れられるものとなっております。このため本報告書では、北部ジョルダンにおける水資源開発の緊急性、及びジョルダン国全体の社会・経済発展のための水資源の必要性に鑑み、ジョルダン国政府に対し、本調査で策定した地下汽水淡水化利用戦略における優先事業の実施を勧告しております。

本報告書を提出するにあたり、全調査期間を通して、多大な御支援を賜った貴事業団、外務省、在ジョルダン国日本大使館の関係各位ならびにジョルダン国政府諸機関の関係各位に対し、心から感謝の意を表するとともに、本調査の成果がジョルダン国の社会開発、経済発展及び福祉向上の一助となることを希望する次第であります。

調査団長

寺西 良輔

概 要

ジョルダン国地下汽水淡水化計画調査（開発戦略策定）

調査期間：1994年3月－1995年8月

受入機関：水灌漑省

1. 背景

ジョルダン国の90年代の人口増加率は3%台と高率であり、生活水準の向上とともに一人あたりの水消費量も確実に増加することから将来の高い水需要を満たすための対策が早急に必要となっている。同国の水供給のための水資源は大部分を地下水に頼っているが淡水地下水資源開発はもはや限界に近い。一方で膨大な地下汽水の存在が確認されているものの水資源開発としての地下汽水の淡水化の適用調査は未だ行われていない。

2. 目的

水資源の有効利用のためジョルダンバレー地域における地下汽水の賦存状況並びに水質を把握の上、北部ジョルダン地域に対する地下汽水開発戦略（目標年次2010年）を策定する。

3. 調査対象地域

地下汽水の賦存量調査対象地域として、ヒスバン、カフレイン、カラメー及びアブゼイガンを含むジョルダンバレー地域とし、水供給対象調査地域としてジョルダンバレー地域とアンマン市を含む北部ジョルダン北部地域とする（本文2ページ調査対象地域図参照）。

4. 計画の概要

4-1 基本方針

汽水賦存状況

物理探査・試験井掘削を含む水文地質調査・解析の結果によれば、調査対象地域での地下汽水賦存状況は開発地点は限定されるが、量・質ともに有望である。

淡水化方式

汽水の淡水化の方式は水質並びに開発地点の状況を考慮し逆浸透膜（Reverse Osmosis Process）方式を採用する。

水需給

北部ジョルダン地域における、水資源利用の現状と将来の調査・分析の結果、淡水化処理水の農業用水への利用は、開発コストと農業生産性の観点から現実的でなく生活用水、工業用水への利用に限定される。需給の面では、多国間の和平条約により長期的に期待される水量を含めた全ての既往水資源開発計画を考えても、将来需要を満たすことは不可能で、財政状況に応じた淡水化による新水源の開発は必須である。

4-2 事業内容

北部アンマンを対象とする水供給事業計画は、今後の中東和平の展開による表流水利用、南部の化石水開発の進展等に大きく影響されるが、汽水淡水化による開発戦略は次のとおりとする。

表-1 汽水淡水化事業

開発地点	開発地下汽水 開発量 (MCM/年) 水質 (TDS-ppm)	水供給 供給量 (MCM/年) 水質 (TDS-ppm)	供給先 アンマンへの供給方法
第1期 南部ヒスバン地区	6 5,000	5 300	ジョルダンバレー 第3期以降はアンマン
第2期 南部ヒスバン地区	39 5,000	31 300	アンマン 揚水設備を新設
第3期 北部デルアラ地区	30 7,500	24 300	ジョルダンバレー/アンマン 既設送水設備を利用

5. プロジェクトコスト

本開発計画での事業計画は、汽水の開発地点での生産井・淡水化設備と給水地点までの送水設備からなっており、その開発期別の建設費は以下のとおりである。水灌漑省・水総局の運転維持費を含めた総事業費は年間約70百万JDの財政規模である。

表-2 汽水淡水化事業費 (単位千JD)

開発地点	生産井・ 淡水化設備	送水設備	合 計
第1期南部ヒスバン地区	14,141	7,366	21,507
第2期南部ヒスバン地区	87,063	43,432	130,495
第3期北部デルアラ地区	72,667	15,227	87,894

1 JD = 150円

6. 事業評価

本計画は、経済・財務面からは困難な課題を抱えているが、地域の絶対的な水資源不足の状況下における全く新しい水源として評価される。特に第1期の優先プロジェクトについては、和平の成立後、開発の焦点となっている地域への水供給であること、技術面からの淡水化処理技術の修得・蓄積の必要性、財務的な負担増が軽微であることから、実行可能なものと判断される。なお、環境上の問題は全て対応が可能である。

6-1 経済・財務評価

各期案の建設費・運転維持管理費と現状の水道料金・補助金収入を比較し、借入金で事業を実施した場合の内部収益率を算定したが有意の値を得ることはできなかった。財務面でも、総収支は事業実施の25年間にプラスに転じることはない。近い将来の現実的な施策とは考えられないが、水道料金収入を50%あるいは補助金を100%上げる場合に、1.8%～5.7%程度の内部収益率が得られる。また、優先プロジェクトについては財務上の軽減措置が必要である。もし建設費が政府補助でまかなわれれば、15年後の機器の更新を含め、問題なく運転が維持される。

6-2 環境評価

地下汽水開発における環境問題は比較的に単純で、評価の段階で検討を要する環境評価項目は多くなく、初期環境影響調査の段階では著しい悪影響が生じる項目はないと結論づけられた。ネガティブインパクトの想定される項目と今後の方針は表-3に示すとおりである。

表-3 環境評価項目

環境項目	評価	今後の方針
地下水	B	浅層地下水の水位低下を許容範囲に抑制。
水質汚染	B	濃縮塩水の適切な排水処理。
土壌汚染	B	濃縮塩水の適切な排水処理。
遺跡・文化財	C	ローマ時代の遺跡が存在の可能性。

B：多少のインパクトが見込まれる。C：不明

7. 提言

事業評価の結果、本戦略実施の付帯条件として以下の提言を行う。

- 1) 淡水化技術の研究・適用体制の確立
- 2) 対象帯水層の水位・水質長期モニタリング
- 3) 農業塩水排水・淡水化施設濃縮塩水の共同排水路の整備
- 4) 和平条約の実行・進展に伴う水資源開発計画の見直し
- 5) 地下汽水調査の実施

目 次

序 文

伝達状

概 要

序 論	1
1. 調査の背景	1
2. 調査の目的	1
3. 調査の範囲	1
4. 調査の経過	3
第1章 地下汽水賦存量及び水質評価	4
1. 調査地域の概要	4
2. 水文地質調査	9
3. 地下汽水水収支解析	11
4. 地下汽水水質	13
5. 水文地質解析	15
6. 地下水シミュレーション	23
7. 地下汽水開発可能量及び水質評価	28
第2章 地下汽水淡水化開発戦略	33
1. 給水事業の現況	33
2. 水需要予測	40
3. 地下汽水開発代替案	45
4. 事業評価	52
5. 優先事業	60
6. 事業実施計画	75
7. 勧告	77

序論

1. 調査の背景

ジョルダン国の人口増加率は1991年から1992年の1年間で3.2%と高率であり、生活水準の向上とともに一人あたりの水消費量も確実に増加することから将来の高い水需要を満たすための対策が早急に必要となっている。1992年には生活用水と工業用水（灌漑用水は除く）の需要量が300MCM/年を越えるのに対して、供給量は208MCM/年と大幅に下回っている。

また、ジョルダン国では、1992年の年間総水供給量900MCMの内56%を地下水に頼っている。将来、表流水は国際河川であるヤルムーク川の開発が残っているが、新規に開発可能な大規模淡水地下水資源は南部ディシ砂岩帯水層の化石水のみであり、その利用には深い帯水層からの揚水と350kmに及ぶ長大な導水管路の建設が必要である。

一方、ジョルダン国各地に膨大な量の地下汽水の存在が確認されているものの、水資源開発としての地下汽水淡水化の適用調査は未だ行われていない。

1992年9月に開催された中東和平多国間協議第2回水資源作業部会での議論を踏まえ、1993年1月にジョルダン国の水資源有効利用のための地下汽水淡水化調査について、我が国によってプロジェクト形成調査が行われた。

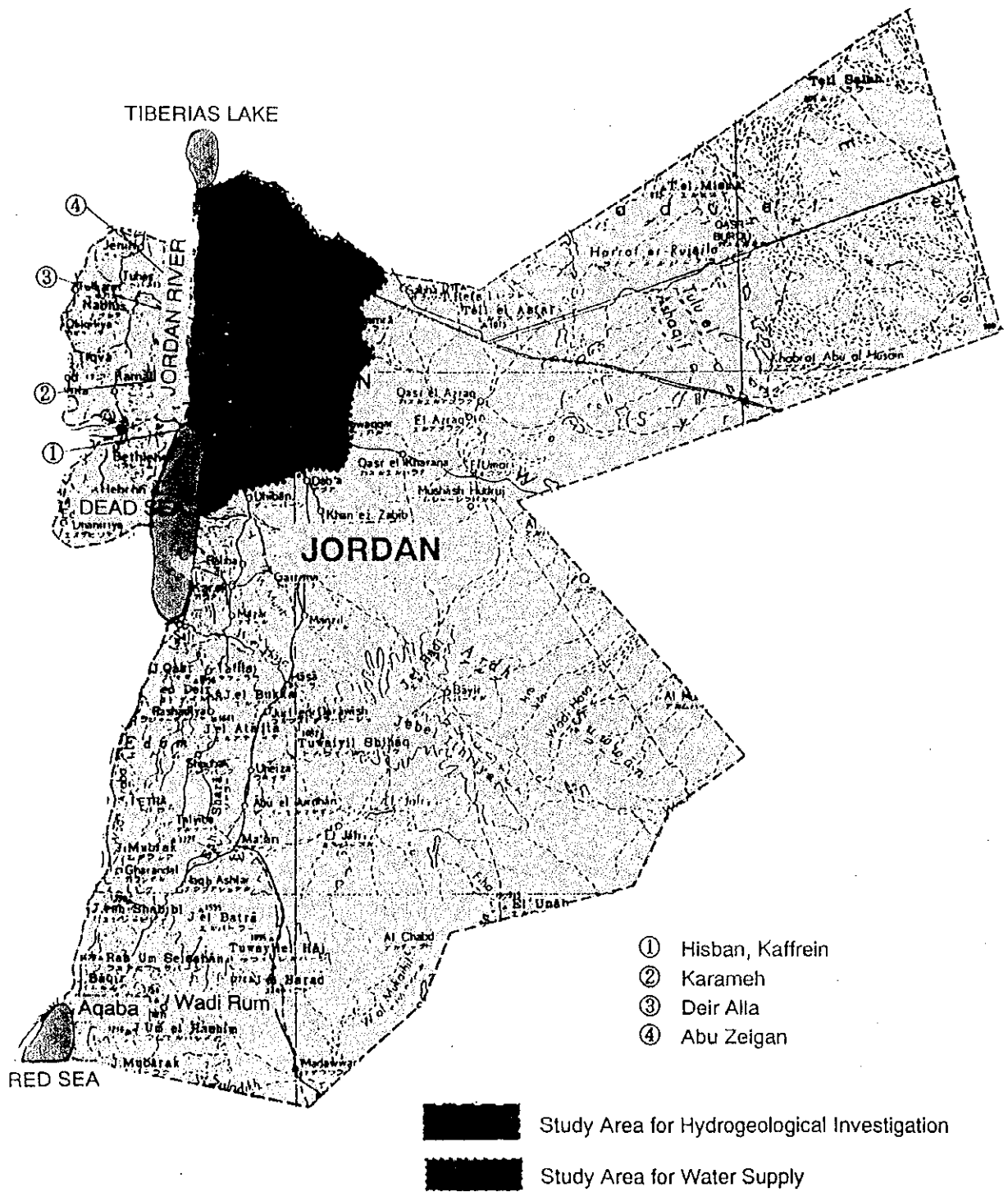
更にこのような背景から、1993年10月地下汽水淡水化計画調査に係わる事前調査が実施され、S/Wが締結された。

2. 調査の目的

- (1) ジョルダンバレーの調査対象地域における地下汽水の賦存状況並びに水質を把握する。
- (2) アンマンを含む北部ジョルダン地域に対する地下汽水開発戦略を策定する。
- (3) 調査を通じ、カウンターパートに技術移転を行う。

3. 調査対象地域

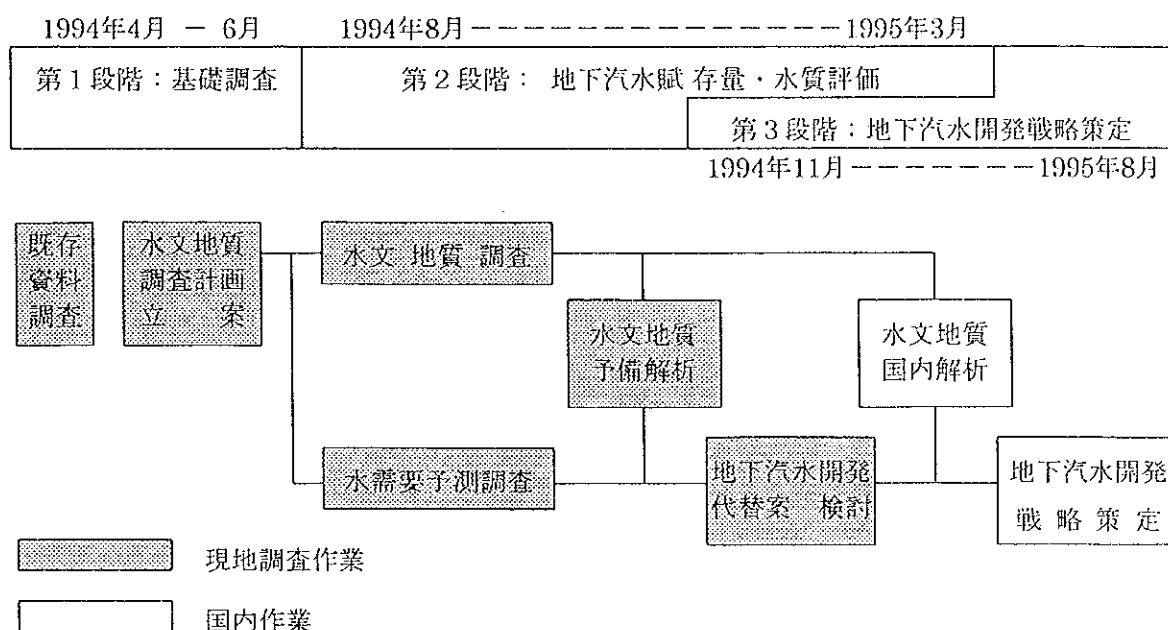
地下汽水の賦存量調査対象地域として、ヒスバン、カフレイン、カラメー及びアブゼイガンを含むジョルダンバレー地域とし、水供給対象地域としてジョルダンバレー地域とアンマン市を含むジョルダン北部地域とする（調査位置図を参照）。



調査対象地域

4. 調査の経過

本調査は概略、下記の基本工程表の内容に沿って、三段階の調査により実施され完了した。また、試験井掘削を含む、現地調査においてはジョルダン国側カウンターパートの全面的な協力が得られ、無事完了することができた。



(1) 第1段階：基本調査

国内準備作業を平成6年3月に開始、同年4月より基礎調査として、既往の資料の収集・分析、現地調査を実施し、調査に直結する基礎資料を得た。これらの結果は基礎調査の終了時点の同年6月末にプログレスレポートとして集約され、ジョルダン側に提供された。

(2) 第2段階：地下汽水賦存量・水質評価調査

第2段階調査は平成6年7月に現地調査を開始し、試験井掘削・短期／長期揚水試験、水質調査を実施、それらの結果を基に水文地質解析、汽水開発シミュレーションを行い、平成7年3月、有望開発地点、開発可能量、水質予測として集約され、インテリムレポートとして報告された。

(3) 第3段階：地下汽水開発戦略策定

第1段階での給水状況調査、第2段階での水需要予測及び地下汽水賦存量・水質評価に基づき、平成6年12月より、淡水化技術の検討、代替案の策定およびその事業評価を行い平成7年6月、調査地域の地下汽水開発戦略の策定を行った。また同時に優先プロジェクトを選定し、施設の概略計画を作成、ファイナルレポートにとりまとめた。

第1章： 調査地域の地下汽水賦存量と水質

1. 調査地域の概要

(1) 地 形

水文地質調査対象地域は約700km²であり、ジョルダン川沿いの死海北岸からクレイマ付近までの区間である（図1. 1参照）。

調査地域は、南北に延びる明瞭な4つの異なった地形区により成る。これらの地形区は、主要な造構造運動により形成されたものであり、この造構造運動はジョルダン溪谷－死海－ワジ・アラバー紅海の線沿いに地殻を引き裂いている。この運動は数千万年の時をかけ、同じ線上に断裂性の溪谷を形成した。

これらの地形区は次の様なものであり、図1. 1に分布を示す。

- 1) 高 原（標高800m以上）
- 2) 斜 面（標高0～800m）
- 3) 斜面裾部（標高-200～0m）
- 4) 断裂溪谷（標高-400～-200m）

(2) 地 質

調査地域においては、三疊紀、ジュラ紀、白亜紀の地層が主として斜面裾部、斜面及び高原に分布する。第三紀および第四紀の地層は断裂溪谷を覆っている。

地層の分布は図1. 6の水文地質図に示してある。

三疊紀から白亜紀にかけての地層は一般に北東方向から南西方向に分布している。同方向の褶曲軸も何本か認められる。

一般に褶曲は緩やかであり、向斜および背斜とも認められる。

断裂溪谷を形成する主要構造断層は調査地域を南北方向に縦貫している。

三疊紀から白亜紀にかけての地層は水平方向の層理が発達しており、これらの地層は主要構造断層と同方向の数多くの小断層により変位を受け、ゆるやかに階断状にジョルダン溪谷へと向け傾斜している。

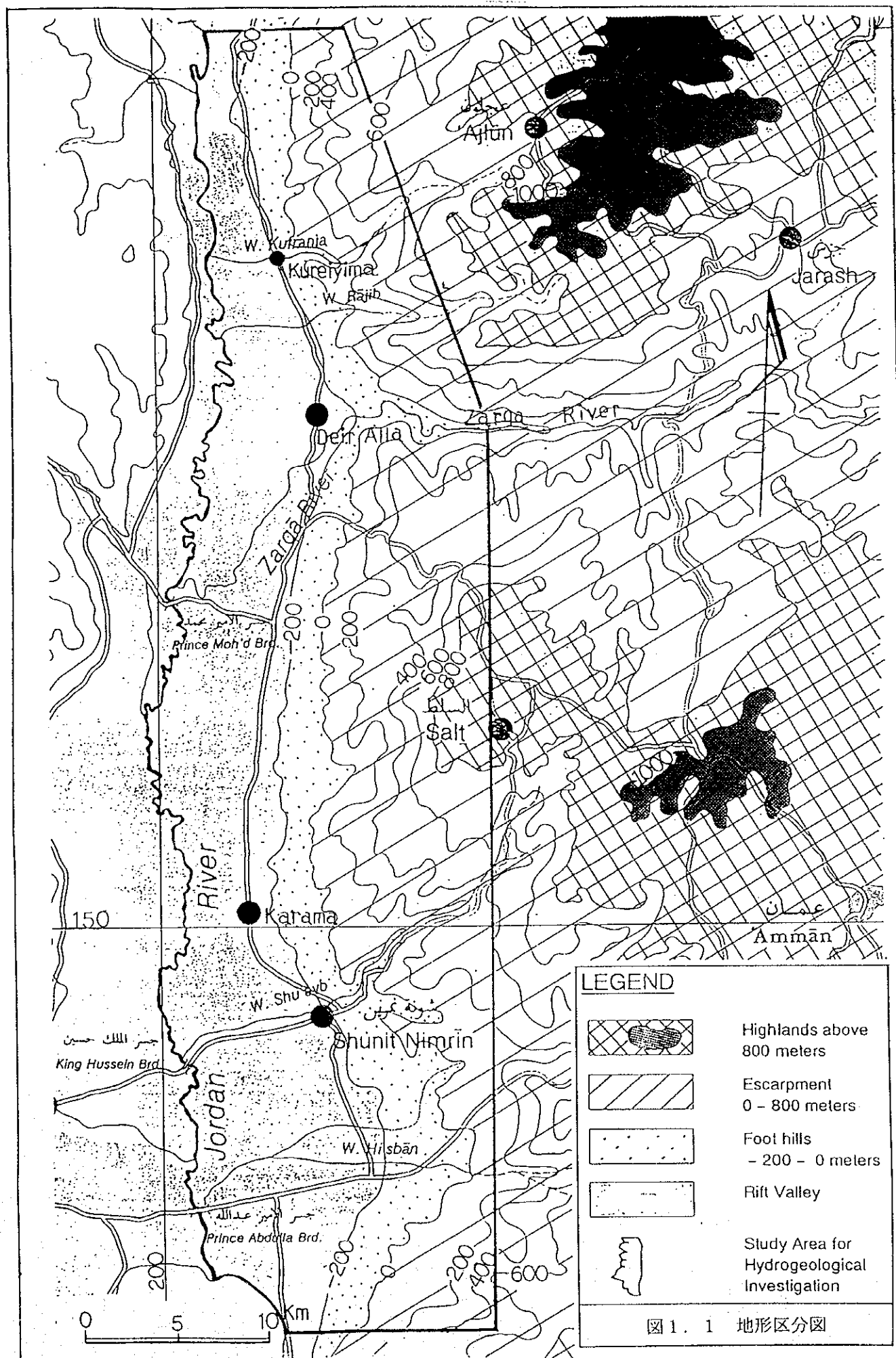


图 1. 1 地形区分图

(3) 水文・気象

1) 水系

調査地域の河川およびワジの分布を図1. 2に示す。表流水は北よりキング・アダブラ水路を通じ調査地域へ流入するとともに、東の高原からはザルカ川、ワジ・シュエイブ、ワジ・カフレイン、ワジ・ヒスパンを通じ流入している。

ワジ・メラハはキング・アブダラ水路の西に源を発し、ジョルダン川へと流入している。このワジには現在ダムとその貯水池が建設中である。

キング・アブダラ水路はそのほとんどの水量をヤルムーク川より取水している。ザルカ川を通じ調査地域へと流入する河川水はキング・タラムダムにより制御されている。このダムの下流では、タラル・ダハブ取水工によりかんがい水路網へ取水している他、アブ・ゼイガンにおいて取水工および水路でキング・アブダラ水路へ導水されている。

調査地域ではワジ・シュエイブおよびワジ・カフレインに小規模ダムが建設されている。これらのダムの位置は図1. 2に示す通りである。

2) 気象

調査地域の集水域の気象は、次の区域に区分される。

- (i) 西の砂漠区域
- (ii) 高原区域
- (iii) ジョルダン溪谷区域

ザルカ川の流域は上記3区域を含むが、調査地域を含むワジの流域は上記(ii)および(i)の区域しか含まない。

高原区域は海拔1,000m（地中海を基準にして）であり、穏やかな気候である。夏期の最高気温は35℃にまで達し、夜間には20℃まで下がる。冬期の最低気温は氷点下数度にまで下がる。

ジョルダン溪谷地域の海拔は北部で-197m、南部の死海沿岸で約-400mである。夏期の平均最高気温は39℃であり、ジョルダン国の最高気温・記録である51.2℃はこの区域で測定されたものである。

3区域の年平均降水量は図1. 3に示す通りである。年平均降水量は砂漠区域およびジョルダン溪谷区域で200mm/年以下なのに対し、高原区域のサルトでは600mm/年である。

年平均可能蒸発散量は砂漠区域で2,000mm/年、高原区域およびジョルダン溪谷区域で1,600mm/年である。雨季の期間の可能蒸発散量は降水量よりも少ない。

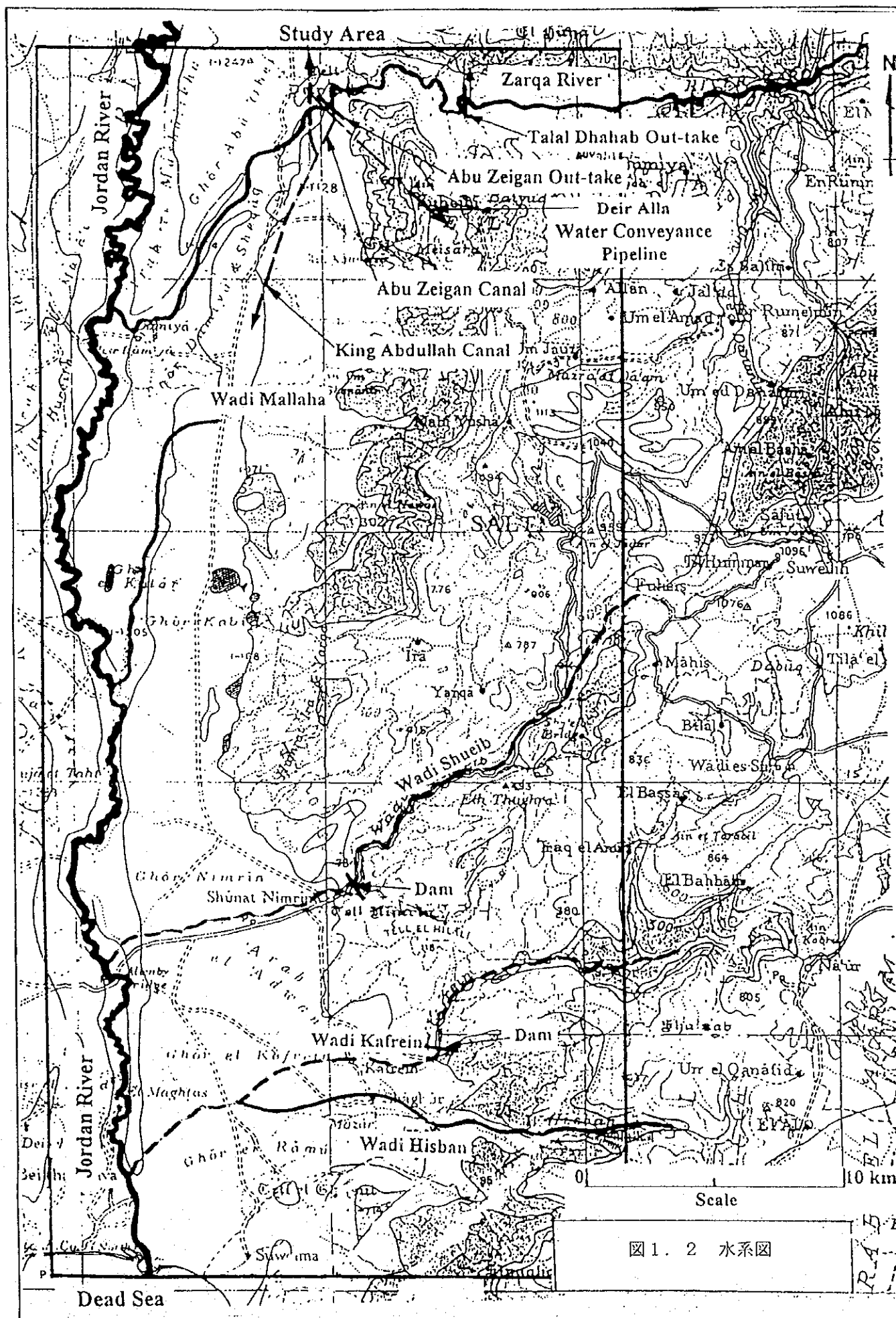


图 1. 2 水系图

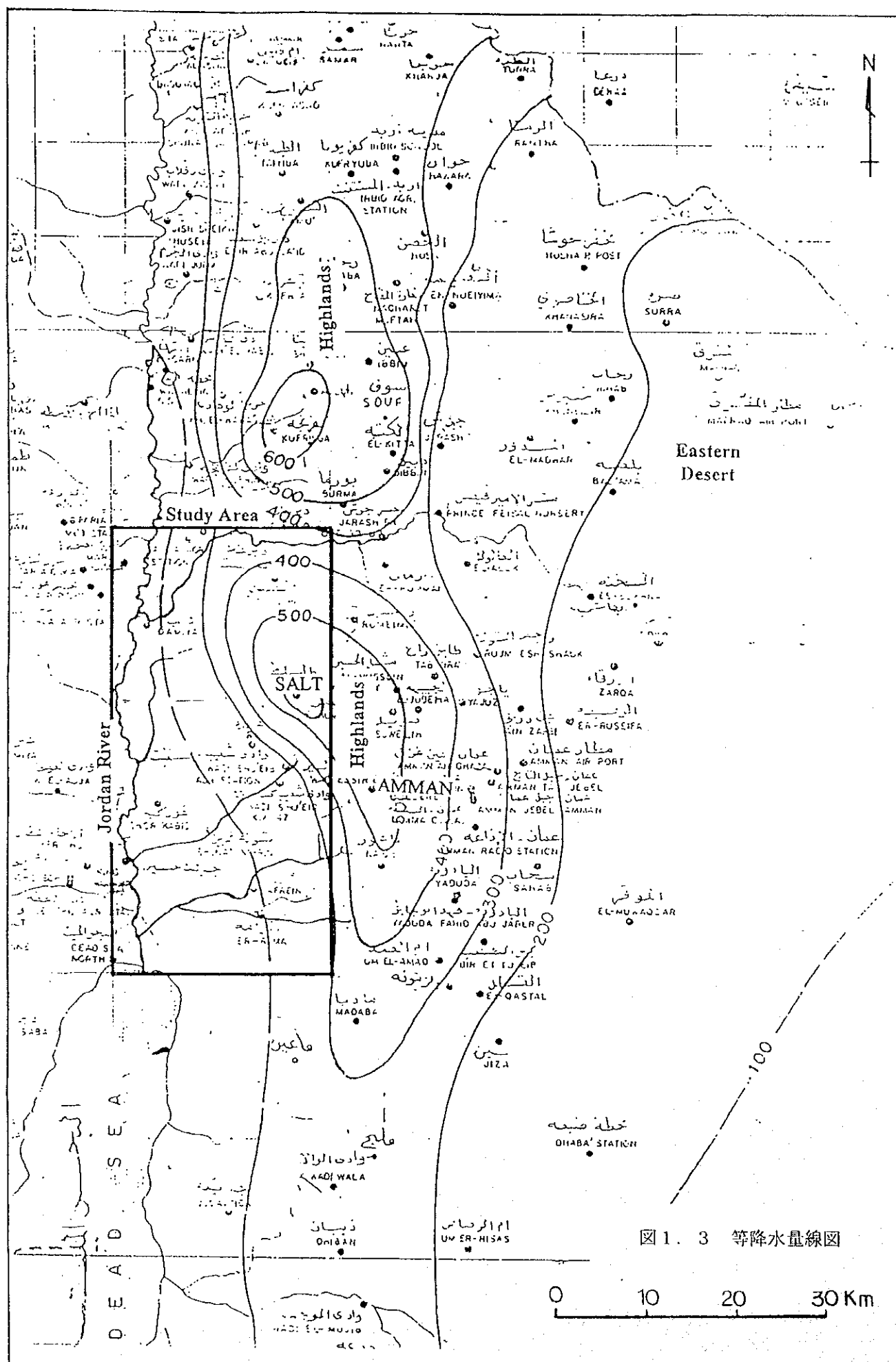


图 1. 3 等降水量线图

(2) 水文地質調査

本調査で実施した水文地質調査の内容は以下の通りである。

<u>調査項目</u>	<u>調査数量</u>
① 航空写真判読	約1,000km ² , (写真縮尺=1/30,000)
② 物理探査	
－電気探査	30点 (AB/2=300m)
－電磁探査	11測線, 1039測点
③ 水文観測	27測定
④ 水質分析	116 試料, 年代測定含む
⑤ 既存井戸調査	170 井戸
⑥ 試掘調査	6 本, 総掘進長1,803m
(検層, 短期揚水試験, 長期揚水試験含む)	

水文地質調査地点は、水文地質図に示してある。水文地質調査の詳細についてはメインレポート及びサポーティングレポートを参照されたい。図1. 4に試掘調査井戸の地質柱状図を示す。(位置は図1. 6参照)

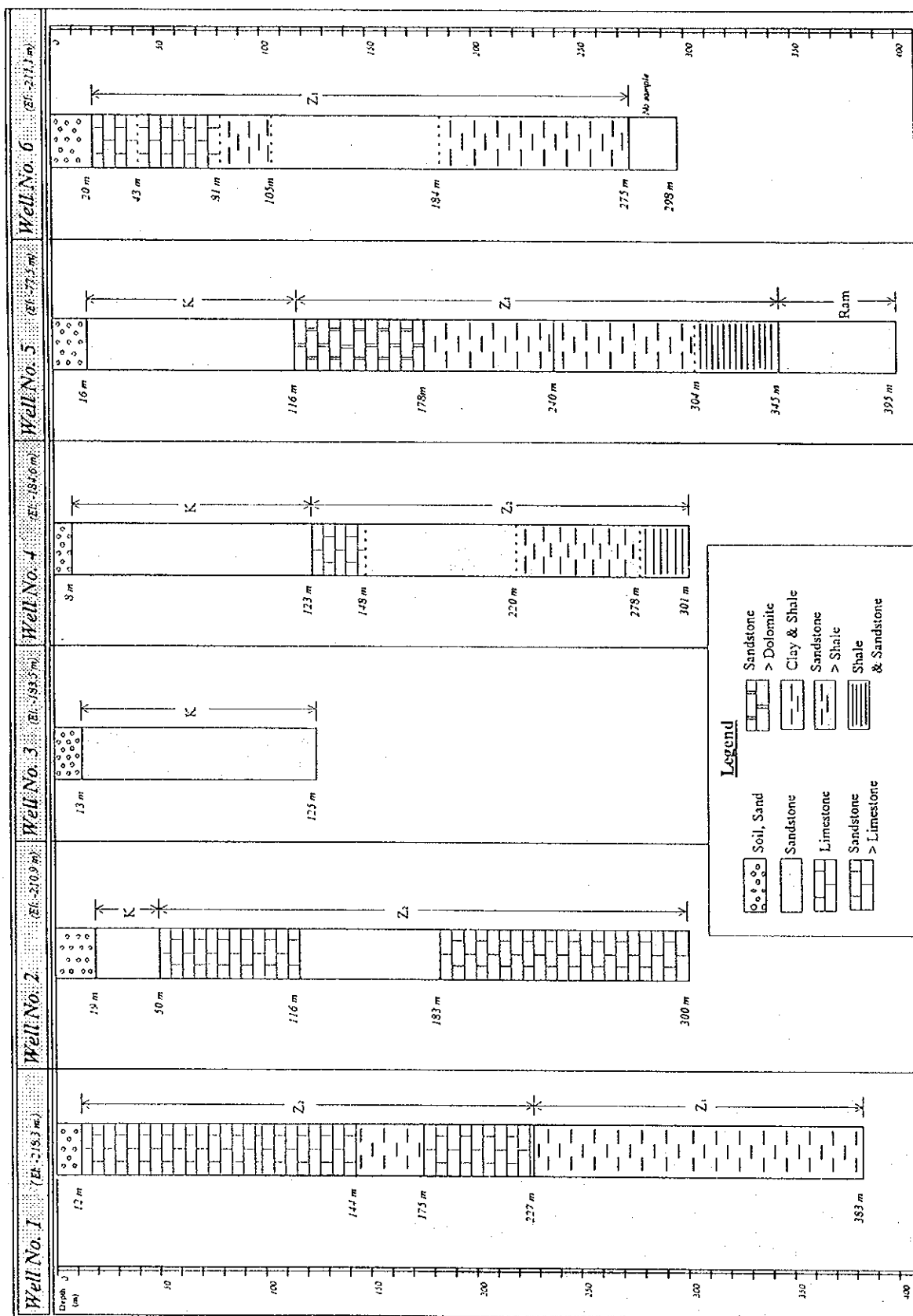


図 1. 4 試掘調査井戸の地質柱状図

(3) 地下汽水収支解析

水収支計算は、本調査で実施した流量観測結果、およびJVA, WAJの収集した既往資料に基づき実施した。表流水の流域境界を考慮し、水収支計算のため調査地域を北から南にかけて次の4地域に分割した。

- A地域 — ザルカ川流域
- B地域 — ワジ・メラハ流域
- C地域 — ワジ・メラハからワジ・ヒスバンにかけての流域
- D地域 — 死海とワジ・ヒスバンにかけての流域

これらの地域の分割を図1. 5に示す。

一般に水収支は次の式で表される。

$$Q = G + E + S$$

ここで、Q：帯水層へ流入する地下水量（調査地域外よりの流入）

G：川やワジへの地下水の流出量（最終的にはヨルダン川へ流入）

E：蒸発量

S：泉からの地下水の流出量

以上の項目の他にヨルダン川へ流入する水として、次の項目が挙げられる。

- 灌漑用水の余剰水
- 灌漑用水の地下浸透水
- キング・アダブラ水路からの漏水
- 西岸からの流入

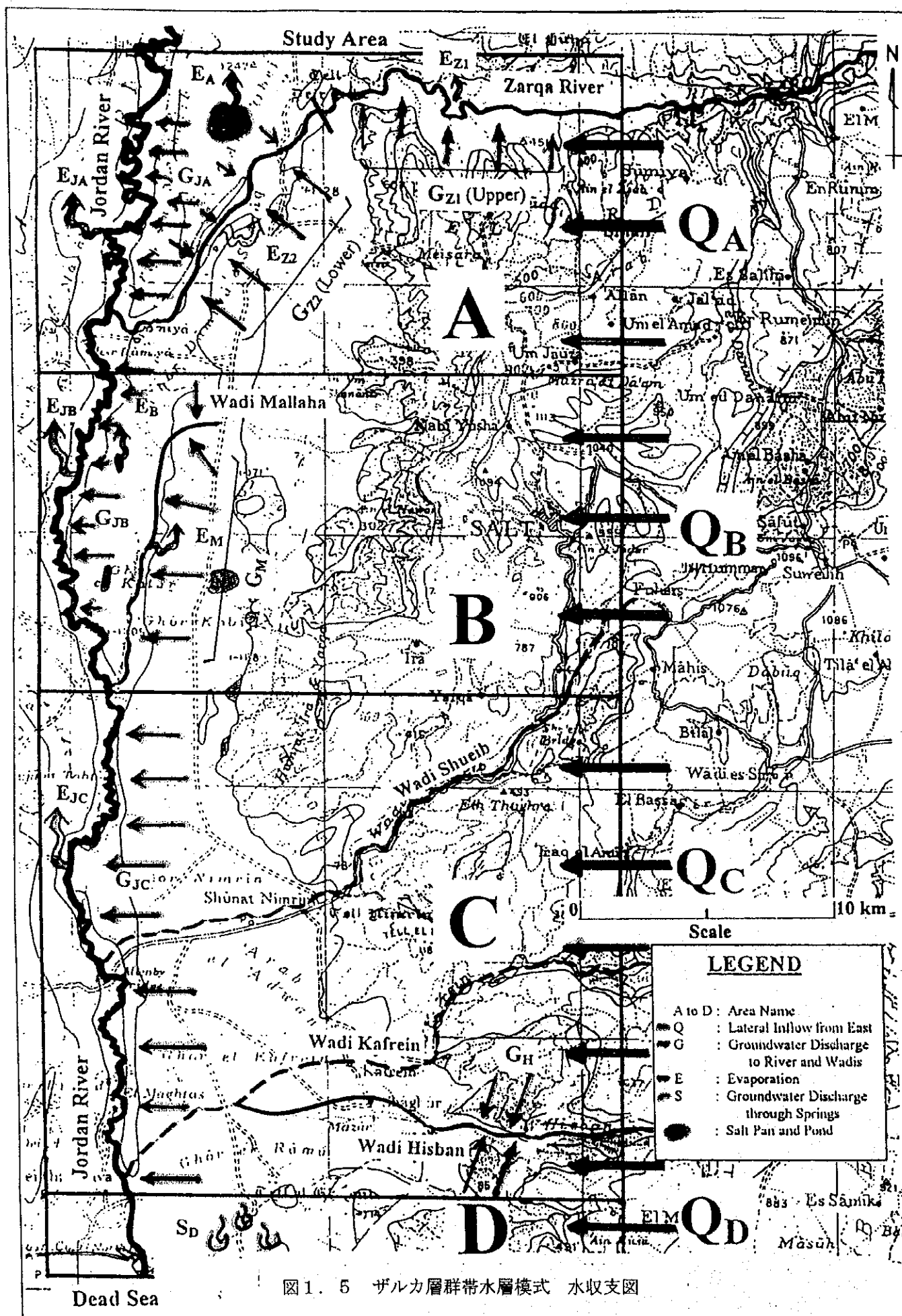
これらの流入を定量化するため、本調査を通じ追加資料の収集を行い、これらに基づき、ヨルダン川東岸からのヨルダン川へ流出する地下水量を推定した。調査地域では、東岸にザルカ層群が広く分布しており、このためC地域を除き、このようにして算定されたヨルダン川への地下水流入量は、ザルカ層群帯水層よりもたらされているものと推定された。

上記の計算の結果、調査地域内へのザルカ層群帯水層の地下汽水流入量は表1. 1に示す様に約120MCM/年と推定された（地域の区分は図1. 5を参照）。

表1. 1 調査地域内へのザルカ層群の地下汽水推定流入量（MCM/年）

地 域	A	B	C *	D	合 計
ザルカ層群帯水層からの地下汽水 流入量（MCM/年）	40.8	8.4	70	2.6	121.8

*) 地下水シミュレーションより推定（6の（3）参照）



(4) 地下汽水水質

1) 水質分析項目

試掘調査井の長期揚水試験に伴い、月毎に各井戸から採水し、水質分析を行った。分析項目は下記のとおりであった。

- ・ 一般項目 (24項目)

水温、pH、電気伝導度、TDS、濁度、SDI、Na、K、Ca、Mg、Fe、Mn、NH₄、Al、Cl、SO₄、HCO₃、NO₃、SiO₂、有機物、H₂S、一般細菌、大腸菌、F

- ・ 重金属類 (13項目)

Pb、Se、As、Cr、CN、Cd、Hg、Sb、Ag、Cu、Zn、Ni、Ba

2) 水質特徴

観測井のNo.3を除く5本の調査井からは、ザルカ帯水層の水が出ており、それら分析結果は、調査区域内各地区における地下汽水の水質を示している。即ち、

No.1: 北部 (デル・アラ地区)

No.2、No.4: 中部 (ムアディ、バッサト・ファラス地区)

No.5、No.6: 南部 (カフレイン地区)

各地区の地下汽水水質の概要は、次のようである。

a) 北部

No.1井戸の水質データが示すように、北部地区の地下汽水の塩分濃度 (TDS) は7,500 mg/L程度である。塩分の組成を考えると、陽イオンについて、1価のNaが約半分 (meq/Lとして) の量を占め、次は2価のCa、Mgの順で、水の総硬度は2500mg/L前後 (CaCO₃として) との計算値である。陰イオンの濃度は、Cl>SO₄>HCO₃の順になっている。

その他、汽水淡水化处理に関連する項目について、鉄分 (Fe) が10mg/L、シリカ (SiO₂) が20mg/L、SDI (汚れ指数) が5.9の程度である。

上述した水質に対して、逆浸透等膜を用いて淡水化处理を行う際、懸濁物除去、鉄分の酸化等、スケール生成の防止のための前処理が必要である。

b) 中部

No.2とNo.4井戸の塩分濃度は9500mg/Lを超えている。このような水は、ほぼ汽水の限界濃度 (～10,000mg/L) に近いので、淡水化处理に必要なエネルギーが高く、水価が高価になることから、利用の価値が低いと考えられる。

c) 南部

No.5とNo.6井戸の水は、TDS=5000～5500mg/Lと比較的低い塩分濃度を示している。塩分の組成について、1価イオンのNaとClの濃度は陽、陰イオンそれぞれの60% (meq/Lとして) を占めているので、塩分濃度が低い、NaCl濃度は北部のNo.1井戸と同程度に

なっている（3,000mg/L前後）。2価のCa、Mgイオン濃度は北部より低くて、水の硬度が1,500mg/L程度である。

北部の汽水は、 SO_4 濃度が HCO_3 （重炭酸）よりはるかに高いが（34.3対17.2meq/L）、南部の汽水は、逆に HCO_3 濃度が SO_4 より高くなっている（20対11meq/L）。 HCO_3 はアルカリ度物質であるので、水のpH調整に際して、 HCO_3 濃度にほぼ相当する量の酸を消費する必要がある。

水の汚れ指数SDIは4以下で、膜処理に比較的有利な水質になっているが、水の硬度を考えると、スケール防止が中心になる前処理がなお必要である。

水質分析結果の詳細を、サポーテング・レポートに示す。

d) 総合評価

上述した3地区における地下汽水の水質と、淡水化施設建設費、淡水化処理の容易さ、水価等を考慮して、地下汽水を開発する順位は南部が最初で、北部がその後と判断する。中部地区の地下汽水は、塩分濃度が非常に高く、開発利用の価値が低いと思われる。

5. 水文地質解析

(1) 調査地域の水文地質構造

1) 帯水層

調査地域の水文地質は次の4帯水層、1難透水層および不透水性基盤より構成される。

地質時代	地層名	水文地質区分
第四紀	ジョルダンバレー層群	帯水層
白亜紀	クルノブ砂岩層	帯水層
白亜紀／ジュラ紀	泥灰岩／頁岩層	難透水層
ジュラ紀	ザルカ層群	帯水層
ジュラ紀	頁岩層	不透水層
カンブリア紀	ラム砂岩層	帯水層

図1. 6の水文地質図に示すように、ジョルダン溪谷にはジョルダンバレー層群が分布し、東の斜面部には下位よりザルカ層群、クルノブ砂岩層および第三紀の地層が分布する。

本調査の対象はザルカ層群中の地下汽水であり、ザルカ層群は上位のクルノブ砂岩層と西のジョルダンバレー層群と水理的に連続していると考えられる。従って、ザルカ層群、クルノブ砂岩層、ジョルダンバレー層群の3帯水層並びにザルカ層群とクルノブ砂岩層の境界部に挟在される難透水層である泥灰岩／頁岩層について概要を述べる。

ザルカ層群の下部にあるラム砂岩層については、わずか2本の試験井戸が部分的に本層を貫いただけであるため、これについて、詳しく議論をすることはできない。ここでは、今回の試掘調査で得られたデータのみを示すものとする。

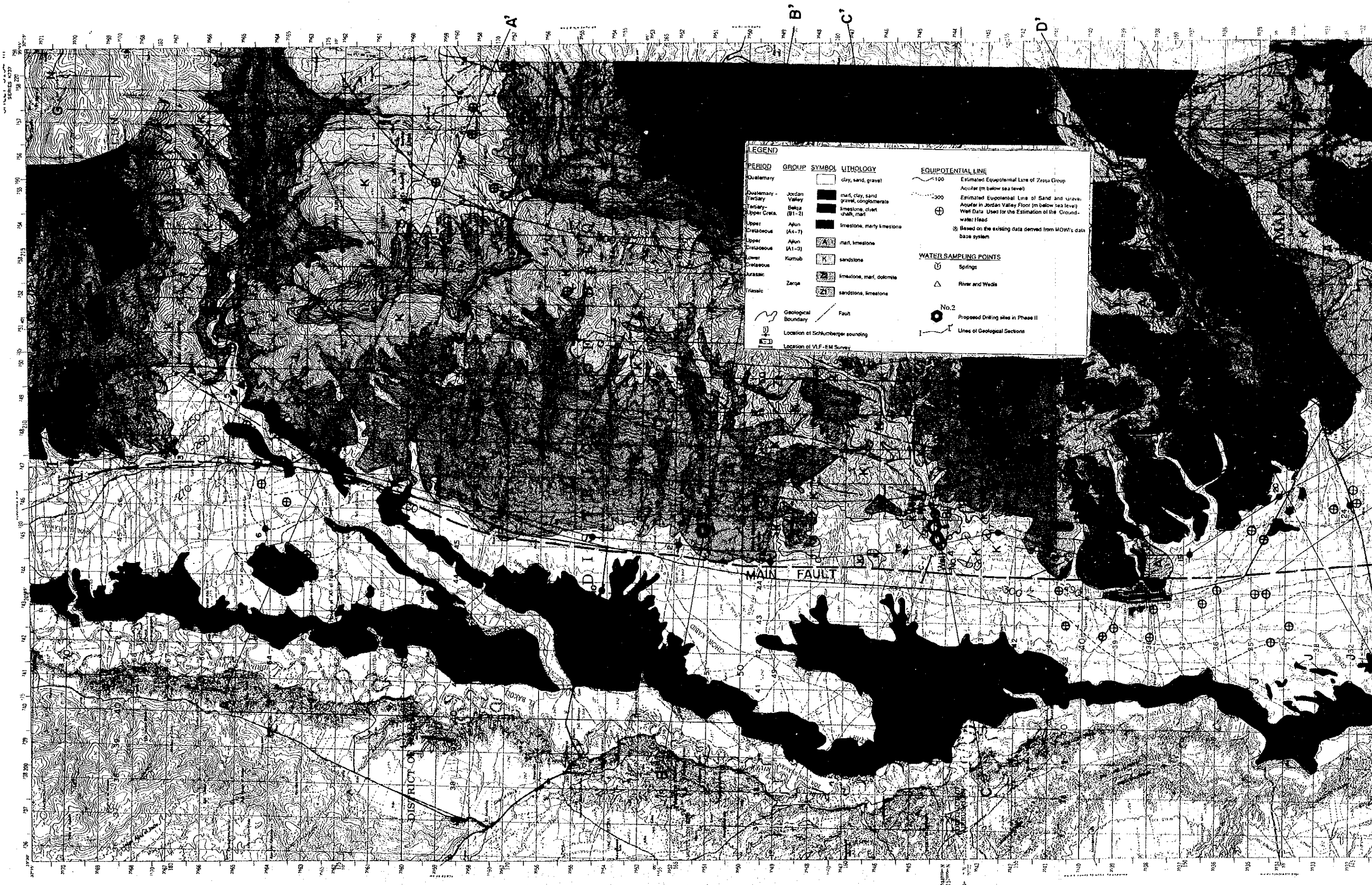
a) ラム砂岩帯水層

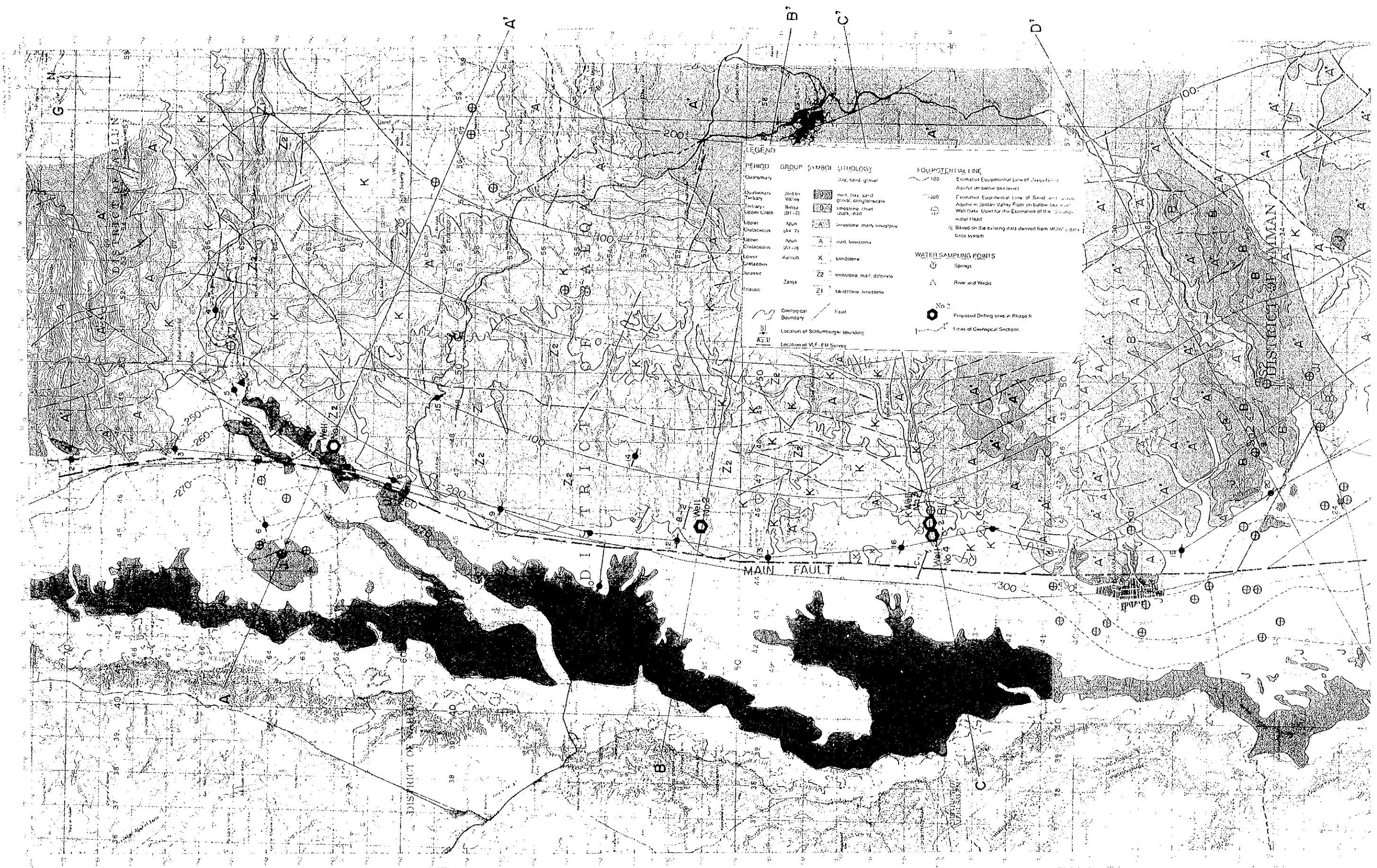
調査地域の南部で2本の試験井戸（井戸No.5, No.6）がラム砂岩帯水層に到達し、大量の自噴がこの帯水層で認められた。

ラム砂岩は非常にもろく、緩く固結した中粒～粗粒、白色、アルコース質、多孔質な砂岩より成り黒色の頁岩を含む。試験井戸掘削結果から、ラム砂岩帯水層はザルカ層群帯水層よりも水圧が高く、透水性も高いものと推察される。今回の試掘調査で得られたラム砂岩帯水層の水理定数は以下の通りである。

表1. 2 ラム砂岩帯水層の水理定数

井戸番号	層 準	透水量係数 ($\text{m}^2/\text{日}$)	透水係数 ($\text{m}/\text{日}$)	貯留係数
No. 5	R	205～262	4.1～ 5.2	$4 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-4}$
No. 6	R	120～369	5.2～16.0	1×10^{-3}





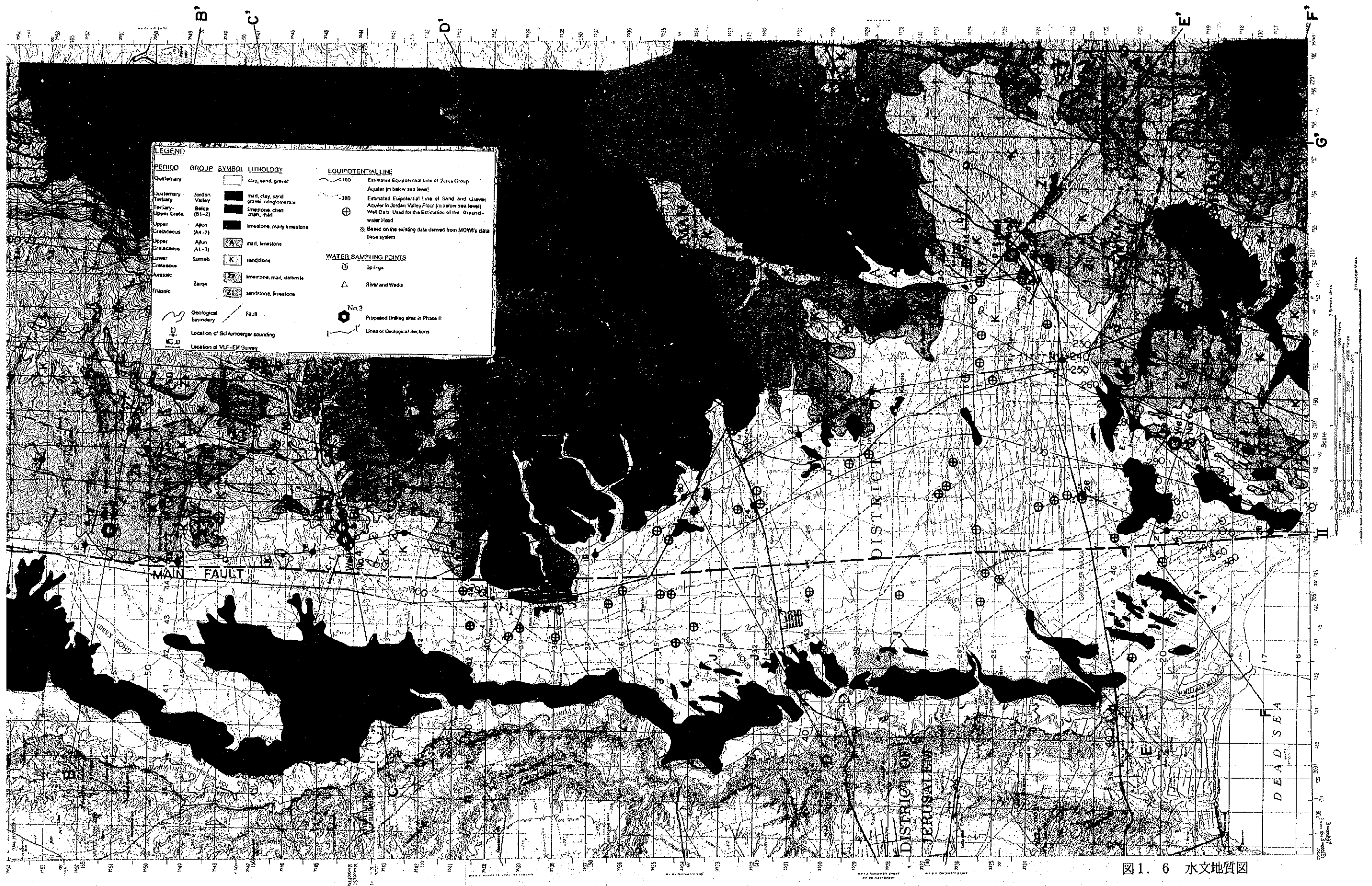


图 1. 6 水文地质图

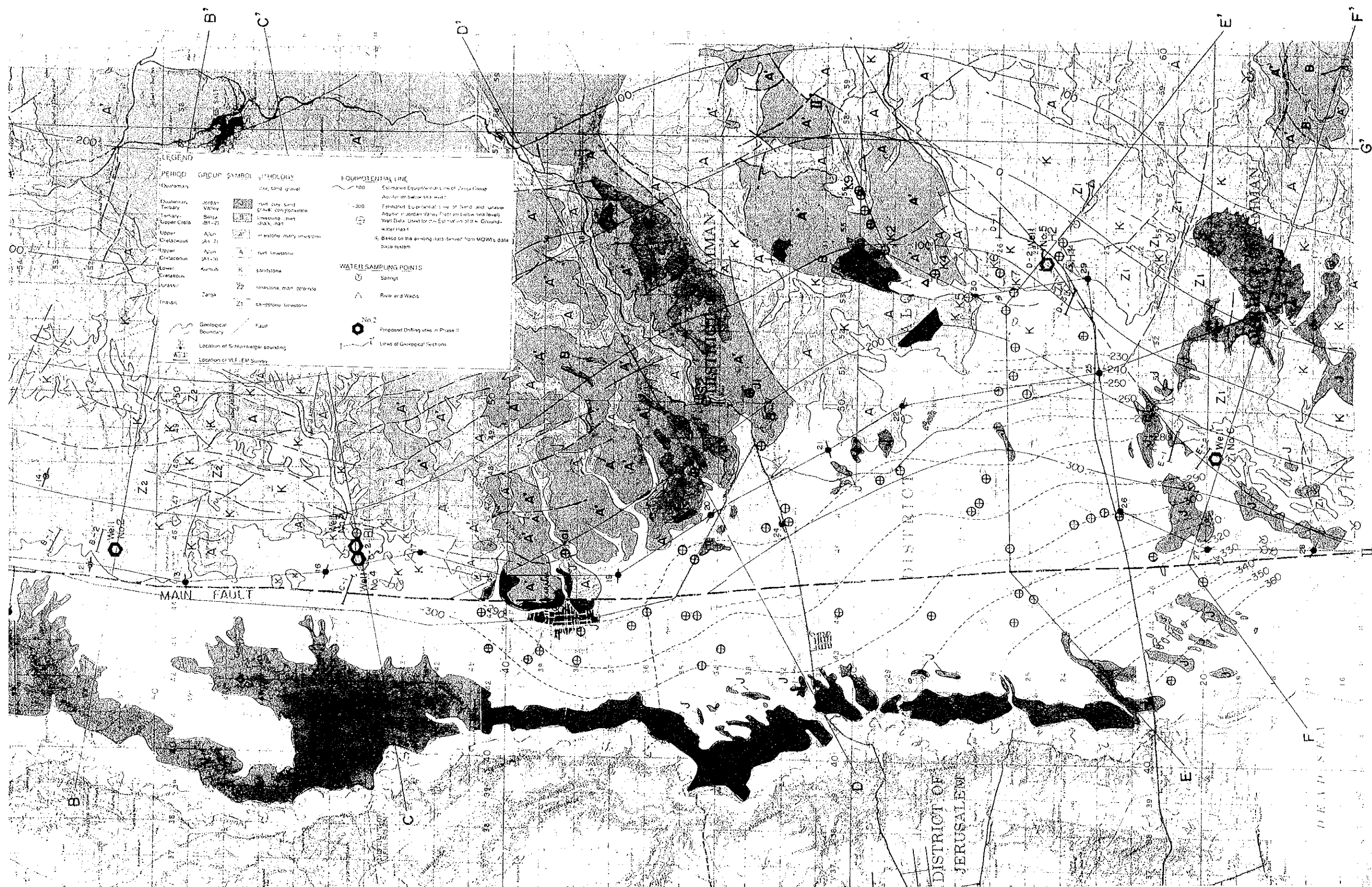


图1. 6 水文地质图

b) ザルカ層群帯水層

ザルカ層群は、砂岩、頁岩、苦灰岩より成る下部ザルカ層群 (Z_1) と頁岩、砂岩、泥灰岩を挟在する苦灰岩より成る上部ザルカ層群 (Z_2) に分けられる。両層は水理的に連続しており、単一の帯水層と考えられる。

ザルカ層群の層厚は北部地域では600mであるが、南部地域では約300m程度と薄くなる。

ザルカ層群の水理定数を表 1. 3 に示す。

表 1. 3 ザルカ層群帯水層の水理定数

井戸番号	層準	透水量係数 ($\text{m}^2/\text{日}$)	透水係数 ($\text{m}/\text{日}$)	貯留係数
No. 1	Z_2	70~157	0.3~0.7	1×10^{-2}
No. 2	Z_2	120~142	0.5~0.6	$1 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$
No. 4	Z_2	100	0.8	1×10^{-3}
ヒスパンNo. 1	Z_1	2,157	21.6	1×10^{-3}

c) 泥灰岩／頁岩層

泥灰岩／頁岩層はザルカ層群とクルノブ砂岩層を隔てる難透水層 (Aquitard) で、その層厚は25mから50mである。本層は上下の帯水層を水理的に完全に分離してはおらず、相方からの漏水が発生していると考えられる。

今回掘削した試験井で実施した揚水試験 (コンビネーション井戸揚水試験) では、泥灰岩／頁岩層の漏水係数として $0.7 \times 10^{-4} / \text{日}$ の値が得られている。

d) クルノブ砂岩層

泥灰岩／頁岩層の上位に分布するクルノブ砂岩層 (K) は、赤褐色～赤紫色を呈する細粒～中粒の砂岩層である。

クルノブ砂岩層の層厚は200mから250mであり、調査地域北部および南部では削剥され欠如している。

クルノブ砂岩の水理定数としては、今回の調査で次のような値が得られている。

表 1. 4 クルノブ砂岩層の水理定数

井戸番号	層準	透水量係数 ($\text{m}^2/\text{日}$)	透水係数 ($\text{m}/\text{日}$)	貯留係数
No. 4	K	110~120	1.0~1.1	2×10^{-3}

e) ジョルダンバレー層群

ジョルダンバレー層群は、地溝帯であるジョルダン溪谷の谷底に埋積する第四紀の堆積物であり、東側の斜面部に分布するザルカ層群、クルノブ砂岩層とは断層で接する。

ジョルダンバレー層群の層厚は非常に厚いとされ、調査地域の南に位置する死海の南部で掘削されたボーリング調査では、その層厚は3,000m以上と報告されている。

ジョルダンバレー層群の比浸出量は、既往資料から100m³/日～300m³/日と推測される。

2) 構造

航空写真判読および地質調査の結果、調査地域には数多くの断層が通っているものの、ジョルダン溪谷とその東側の斜面を画する主断層（Main Fault）を除き、調査地域には大規模な変位を生じさせている断層は存在せず、これらの最大落差は20m程度であることが判明した。従って、地下水の流動を大きく阻止するような断層は存在せず、各帯水層は水平方向に連続していると考えられる。

ザルカ層群、クルノブ砂岩層を含む東側斜面に分布する地層は3°～10°の傾斜でジョルダン溪谷に向かい傾斜しており、斜面の上部ではその傾斜は緩くなる傾向がある。

調査地域の南側を西流するワジ・カフレイン沿いには東北東－西南西に走る大規模な向斜構造が認められる。

3) 地下水面

水文地質図に示すようにザルカ層群帯水層の地下水面は、東側の高地から西側のジョルダン溪谷へと傾斜しており、その傾斜は調査地域内で約3%程度と推定される。

ザルカ層群帯水層の地下水面には、ザルカ川およびワジ・カフレイン沿いに谷（窪み）が認められる。ザルカ川沿いの地下水面の谷は、ザルカ層群帯水層の地下汽水がザルカ川へと流入しているため形成されたものであり、流量観測の結果、単位キロメートル当り0.1/秒の地下汽水がザルカ川へ流入していることが判明した。前述の如く、ワジ・カフレイン沿いには大規模な向斜構造が認められ、この向斜軸沿いに断層が通っていることが予想された。断層は高透水性ゾーン（いわゆる水道）を形成する 경우가多く、ワジ・カフレイン沿いの地下水面の谷は、このような高透水性ゾーンに沿って地下汽水が流出することにより形成されたものと推察される。

ザルカ層群帯水層の地下汽水の水位は、斜面の裾部では地表面より高く被圧している場合が多いが、斜面の中腹以高では不圧状態である。被圧圧力の高い地域は調査地域の南側のワジ・ヒスバン下流域に認められ、その最大被圧水頭は地表から70m程度であろうと予想された。

(2) 水文地質化学

1) 地下汽水水質分布

塩分濃度分布図(図1. 7)に示すように、ザルカ層群帯水層の地下汽水塩分濃度は、調査地域中央部で最も高く、南部で低くなる傾向を示す。最も濃分濃度の高い地域ではTDS値で10,000mg/Lに近い値を示し、最も濃分濃度の低い地域では5,000mg/L程度の値を示す。

塩分濃度の高い地域は透水性の低い地域とほぼ一致し、塩分濃度の低い地域は透水性の高い地域とほぼ一致する。このことから、高塩分濃度の地下汽水是流速が遅く地下水が停滞する地域に分布し、逆に塩分濃度の低い地下汽水是、流速が速い地域に分布していると考えられる。

一方、地下汽水の主要イオン構成に着目すると(塩分濃度分布図中のヘキサダイアグラム参照)、調査地域の北と南つまり高塩分濃度地域と低塩分濃度地域の間には、明らかな主要イオン構成に相違が認められる。このことは、北の高塩分濃度地下汽水と、南の低塩分濃度の地下汽水では、その流動経路や涵養源が異なることを示唆するものである。

2) 地下汽水の年代

炭素13および炭素14の分析を地下水の年代を測定する目的で実施した。その結果、クルノブ砂岩帯水層の地下水の年代は6,200年から7,200年前、ザルカ層群帯水層およびラム砂岩帯水層の地下水の年代は15,000年から22,000年前であるとの結果が得られた。

このように、クルノブ砂岩帯水層の地下水とザルカ層群帯水層およびラム砂岩帯水層の地下水の間には明らかな年代の差が認められ、ザルカ層群帯水層の地下水は非常に古い地下水であると結論づけられる。従って、ザルカ層群帯水層は、もし有ったとしても、地表からの新しい水の涵養は極めてわずかであると言える。また、ザルカ層群帯水層の地下水とラム砂岩帯水層の地下水がほぼ同じ年代であるということに注目する必要がある。このことは、両帯水層の地下水が同じ起源である可能性を示唆するものである。

また、ザルカ層群帯水層の地下水とラム砂岩帯水層の地下水につき、それらの起源を推定するため安定同位体である酸素18と重水素の分析を行った。その結果両帯水層の地下水は“Global Water Line”上にプロットされることが判明した。ジョルダンにおいては、多くの場合20,000年程度前に涵養された古い地下水は、この線上にプロットされることが報告されている。この発見は、両帯水層が非常に古くかつ同じ起源に由来することを裏付けるものである。

(3) 水文地質モデル

1) 水文地質モデル

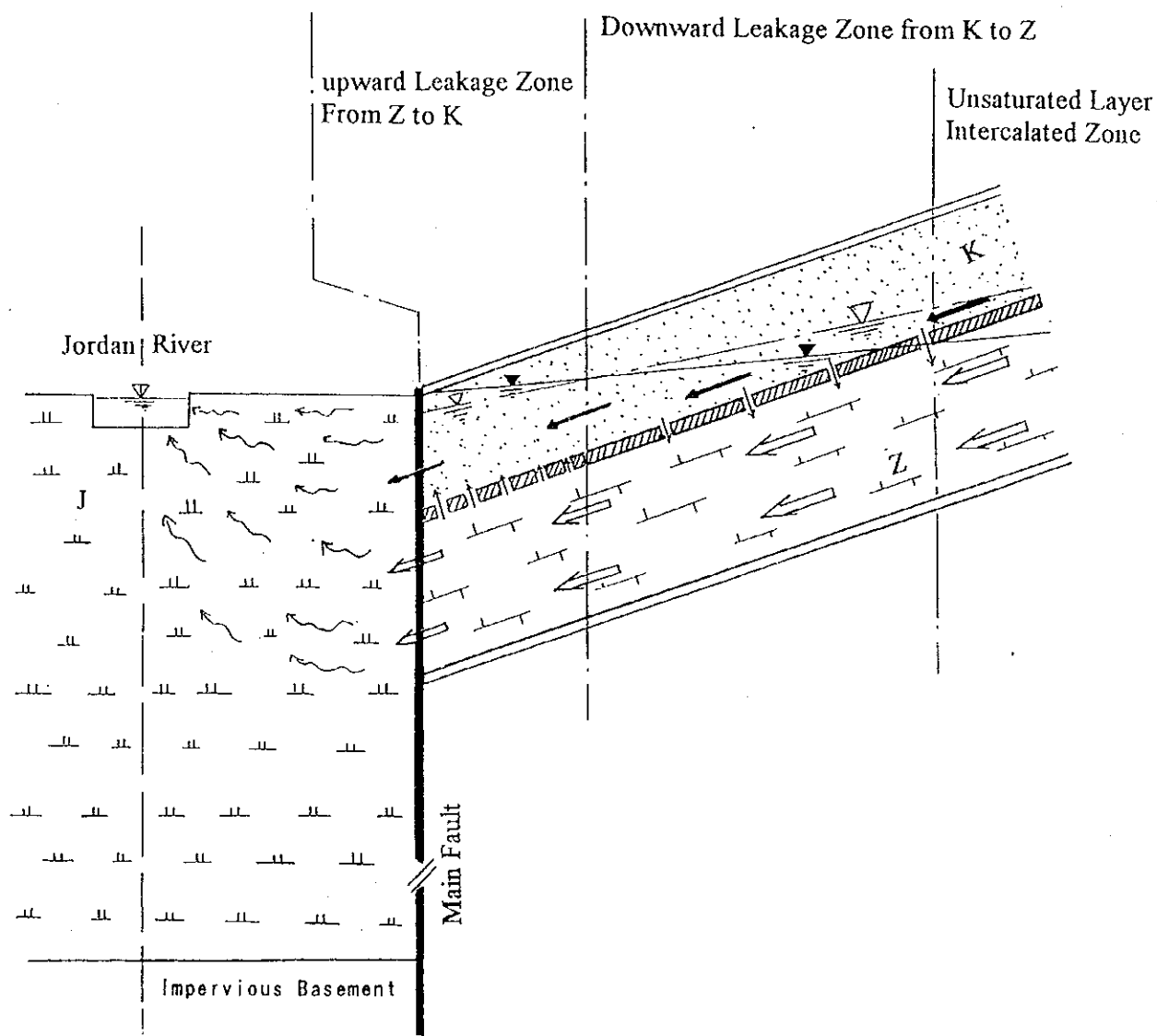
水文地質解析結果に基づき、図1. 8に示すような傾斜した2帯水層（クルノブ砂岩帯水層及びザルカ層群帯水層）がその下端で透水性の低い層にプラグされるモデルを想定した。このモデルでは、2層の帯水層は泥灰岩質層（難透水層）により水理的に連結している。2層の帯水層を流れる地下水はプラグ層（ジョルダンバレー層群帯水層）に浸透し、最終的にジョルダン川へと流出する。

2) 涵養システム

5の(2)で述べたように、ザルカ層群帯水層の地下水は非常に古く、もし有ったとしても、地表からの涵養は極めてわずかである。このため、水文地質モデルでは地表からのザルカ層群帯水層への涵養を無視した。

ザルカ層群帯水層は循環性の帯水層とは見なされないが、現在調査地域へ流入している地下水の量は、地質学的な時間スケールを考えた場合、ここ数百年程度で変化するものではないと考えられる。

ラム砂岩帯水層に関する情報は非常に限られており、ザルカ層群帯水層との実際の水のやりとりを評価することはできない。このため、水文地質モデルでは両帯水層間の涵養、流出を考慮しないものとした。



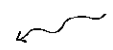
LEGEND

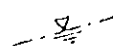
 Jordan Valley Group (Plug Layer)

 Kurnub Sandstone Aquifer

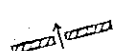
 Zerqa Group Aquifer

 Marly Layer (Leaky Aquitard)

 Seepage Flow in Jordan Valley Gr

 Piezometric Surface of K Aquifer

 Piezometric Surface of Z aquifer

 Leakage Flow through Aquitard

 Seepage Flow in Kurnub Sandstone Aquifer

 Seepage Flow in Zerqa Group Aquifer

図 1. 8 調査地域の水文地質模式モデル

6. 地下水シミュレーション

(1) 地下水シミュレーションの手順

調査地域の地下汽水開発可能性を評価するため、一連の地下水シミュレーションを実施した。地下水シミュレーション手法としては、今回の調査では広域の地下水流動を取り扱うことから、準三次元浸透流解析を行うこととし、また他の帯水層への影響を考慮に入れる必要があることから、シミュレーションプログラムとして“MODFLOW”を使用することとした。

地下水シミュレーションによる地下汽水開発可能性評価の手順を以下に示す。

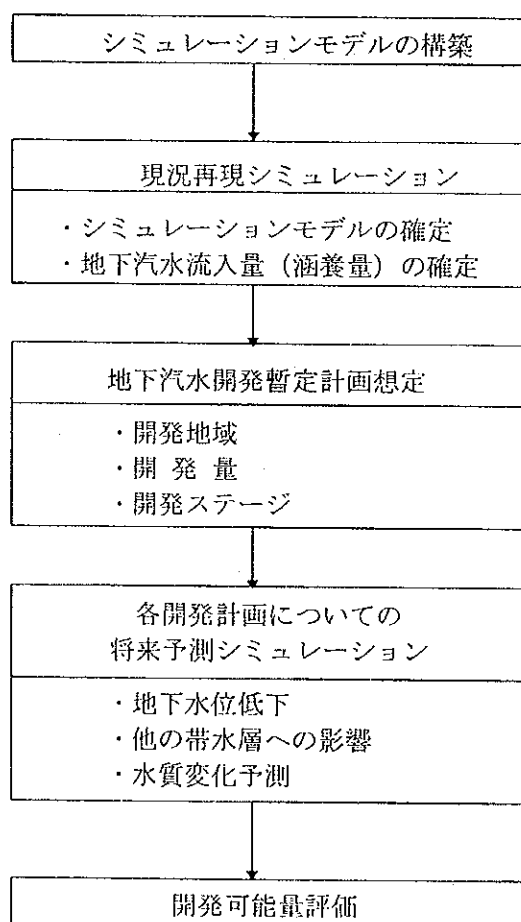
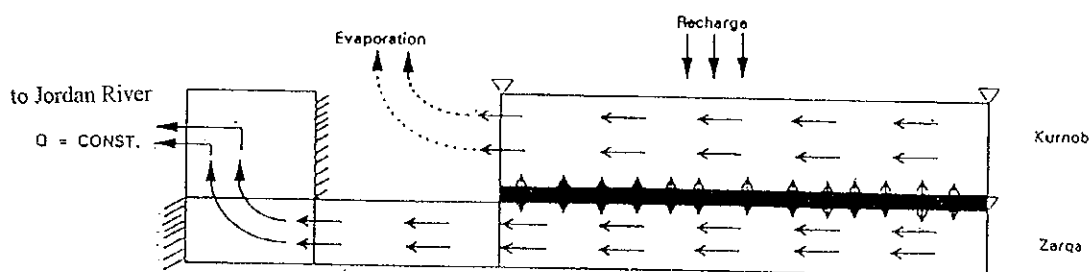
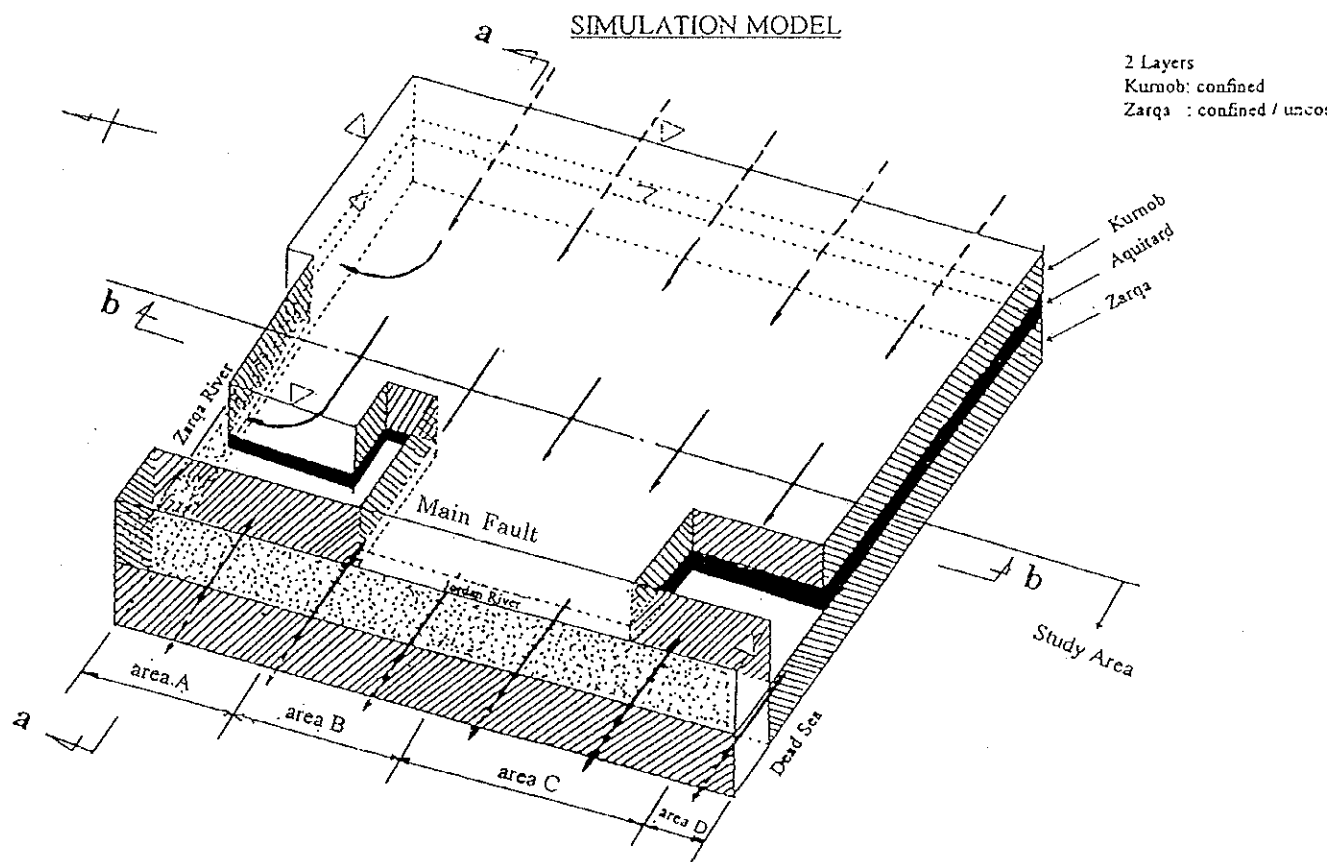


図1. 9 地下水シミュレーションの流れ

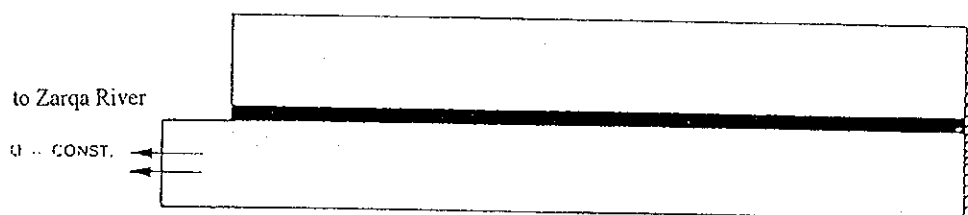
(2) シミュレーションモデル

シミュレーション領域としては、水位降下の広域的広がりを確認するため、調査地域を含む東西約50km、南北約60kmの地域を設定した。

境界条件としては、ジョルダン川を西側の水位一定境界とし、ザルカ川を北側の水位一定境界とした。また東側および南側では遠方に水位一定境界を設定した。



Section "a"



Section "b"

Boundary Condition	
	head constant
	no Flow
	flow constant (present simulation) head constant (future simulation)

図 1. 10 シミュレーションモデル

帯水層の構成は、シミュレーションモデル図に示すように、斜面部ではザルカ層群帯水層、クルノブ砂岩帯水層および両帯水層を隔てる泥灰岩／頁岩層の3層構造を設定し、東側のジョルダン溪谷部では、これらの地層と斜面の裾を通るMain Faultで接するジョルダンバレー層群帯水層を設定した。

シミュレーションに用いる水理定数としては5の(1)で述べた各層の水理定数を初期値として採用した。

(3) 現況再現シミュレーション

現況のザルカ層群帯水層の地下水面形状（水文地質図参照）を再現するため、透水量係数および漏水係数の分布を水文地質構造を基に推定し、シミュレーションを試行した。シミュレーションの試行回数は約300回である。

これらの試行を通し、現況の地下水面を最も良く再現できる水文地質構造、透水量係数分布、漏水係数分布、地下汽水流入量をもって、最終のシミュレーションモデルとし、これを将来予測シミュレーションに用いた。

現況再現シミュレーションによって推定される調査地域におけるザルカ層群帯水層中の地下汽水流入量（通過量）は、次の表に示す通りである。また、現況再現シミュレーションによって再現されたザルカ層群帯水層の地下水位コンターを図1.11に示す。

表1.5 調査地域における地下汽水流入量

	A地域	B地域	C地域	D地域	合 計
地下汽水流入量 (MCM/年)	40.8	8.4	70	2.6	121.8

この表に示すように、調査地域には年間約1億2千万立方メートルの地下汽水が流入していると想定される。

(4) 開発後の将来予測シミュレーション

現況再現シミュレーションで確定されたシミュレーションモデルを用いて、幾つかの開発計画を想定し、これらにつき地下汽水水位の低下および上位の淡水帯水層であるクルノブ砂岩帯水層に対する影響を予測した。

1) 地下汽水開発計画の想定

a) 開発地域

表1.5に示すように、地下汽水の流入量の多い地域は、A地域およびC地域である。従って、地下汽水開発地域をA地域およびC地域とした。

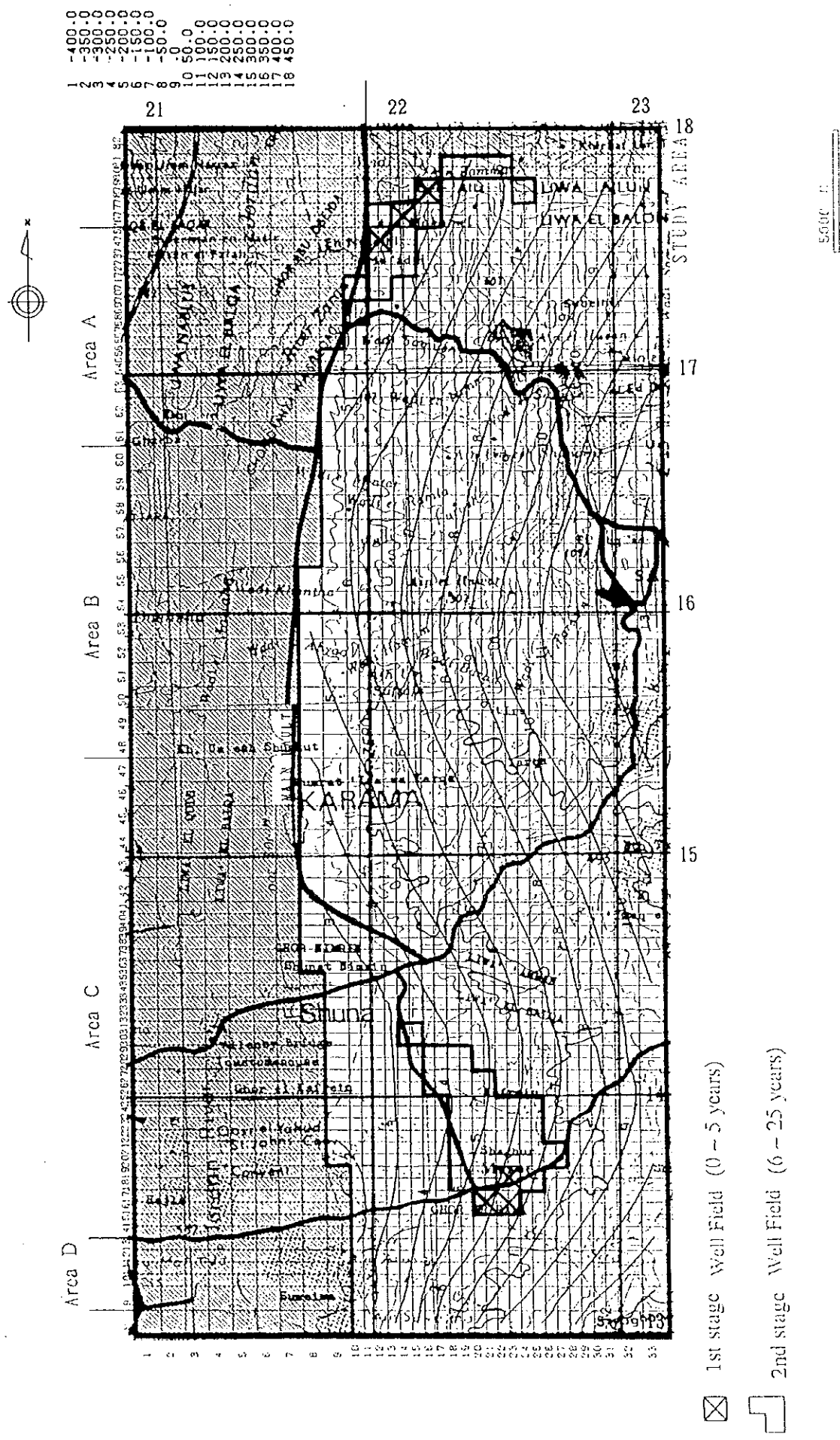


図 1. 1 1 ギルカ層群帯水層再現地下水水位コンター図

両地域での生産井配置位置は、水文地質条件の他に井戸掘削のための地形条件、送水管路工事のための施工条件等を考慮し、図1. 11に示すように設定した。

b)開発水量

開発水量としては、次の4ケースを想定した。

表1. 6 将来予測シミュレーションに用いた想定地下汽水開発水量

ケース	開 発 水 量		
	A 地 域	C 地 域	合 計
ケース1	20MCM/年 (50%)	30MCM/年 (40%)	50MCM/年 (45%)
ケース2	25MCM/年 (60%)	40MCM/年 (60%)	65MCM/年 (60%)
ケース3	30MCM/年 (70%)	45MCM/年 (70%)	75MCM/年 (70%)
ケース4	35MCM/年 (80%)	55MCM/年 (80%)	90MCM/年 (80%)

注：() 内の値は全地下汽水流入量に対する開発水量のパーセンテージである。

全地下汽水流入量……………A地域：40MCM/年

C地域：70MCM/年

c)開発ステージ

地下汽水淡水化開発実施期間（プロジェクトライフ）としては25年間を想定した。また、各ケースの開発では、当初の5年間は淡水化施設の実際の効率や稼動状況および実際の地下汽水水位低下の状況を確認する目的で小規模な開発とするものとし、その開発量はA地域およびC地域でそれぞれ6MCM/年（両地域合計12MCM/年）とした。その後、各ケースの地下汽水量を20年間開発するものとして予測シミュレーションを実施した。

2) 将来予測シミュレーション結果

前記の各計画で地下汽水を開発した場合の、25年後の地下汽水の最大水位低下量および淡水帯水層（クルノブ砂岩帯水層）の最大水位低下量を次の表に示す。

表1. 7 将来予測シミュレーション結果（25年後）

ケース	地 域	地下汽水水位 1) 最大低下量 (m)	淡水帯水層地下水位 2) 最大低下量 (m)
ケース1	A	- 20	影響無し
	C	- 80	-20m
ケース2	A	- 30	影響無し
	C	-110	-30m
ケース3	A	- 40	影響無し
	C	-120	-40m
ケース4	A	- 50	影響無し
	C	-160	-50m

1)ザルカ層群帯水層

2)クルノブ砂岩帯水層

7. 地下汽水最大開発可能量及び水質

(1) 地下汽水最大開発可能量評価基準

一般に地下水の開発可能量を評価する場合、次の2つの面での規制が考えられる。

i. 環境面での規制……………・既存井戸への水位低下の影響

- ・ 泉や小河川の枯渇
- ・ 地盤沈下
- ・ その他

ii. 開発面での規制……………・水位低下量（揚水効率の低下）

- ・ 水質の変化
- ・ その他

本調査地域について見た場合、1) ザルカ層群帯水層およびクルノブ砂岩帯水層から取水している既設生産井は調査地域内に存在しない、2) ザルカ層群の地下汽水を開発した場合、泉や河川の流量は低減するであろうが、泉は汽水であり利用されておらず、また河川への地下汽水の流入が減少するので水質の改善となる、3) 取水帯水層およびその影響帯水帯は岩盤であるので、地盤沈下は発生しない等の理由より、地下汽水の開発を規制する環境面の問題は発生しないものと考えられる。

開発面での規制を考えると、淡水化事業の場合原水の水質の変化が非常に重要になってくるが、次の(3)で述べるように開発に伴い地下汽水の水質（塩分濃度）は大きくは変化しないであろうとの予測結果が得られている。

以上の理由から、地下汽水水位の低下量を地下汽水最大開発可能量の評価の基準とした。一般に井戸内水位が地表より80m～100m以上低下すると、井戸の取水効率が急激に低下すると言われている。このことから、地下汽水開発に伴う低下許容量は地表より80mとする。

(2) 地下汽水最大開発可能量評価

生産井内の地表からの水位低下量を求める場合、開発地域内では地下汽水が高い自噴圧を有していること、および生産井内の地下水位は周辺の地下水位より低くなることを考慮しなければならない。今回実施した一連の揚水試験の結果から、生産井の計画揚水量は3,000m³/日程度が妥当であろうと判断され、その場合の周辺水位からの生産井内水位の降下量は長期揚水試験の結果から、30m程度と予想された。

以上のことを考慮し、各開発ケース毎の生産井の地表からの最大水位低下量を次の表に示す。

表 1. 8 生産井の地表からの最大水位低下量予測結果 (25年後)

ケース	地 域	A 最大水位 低下量 (m)	B 最大水位低下量地点 における自噴水頭 (m)	C 生産井内 水位降下量 (m)	D 地表からの 生産井内水位 (m)
ケース 1	A	- 20	0	-30	- 50
	C	- 80	+70	-30	- 40
ケース 2	A	- 30	0	-30	- 60
	C	-110	+70	-30	- 70
ケース 3	A	- 40	0	-30	- 70
	C	-120	+70	-30	- 80
ケース 4	A	- 50	0	-30	- 80
	C	-160	+70	-30	-120

注) $D = A + B + C$

この表に示したように、生産井の地表からの最大水位低下量が80m程度になる計画はケース3である。従って、ケース3の計画が調査地域における地下汽水最大開発可能量を示すものであり、その量は75MCM/年（A地域：30MCM/年、C地域：45MCM/年）である。図 I - 7.1にケース3の予想水位低下量（25年後）を示す。

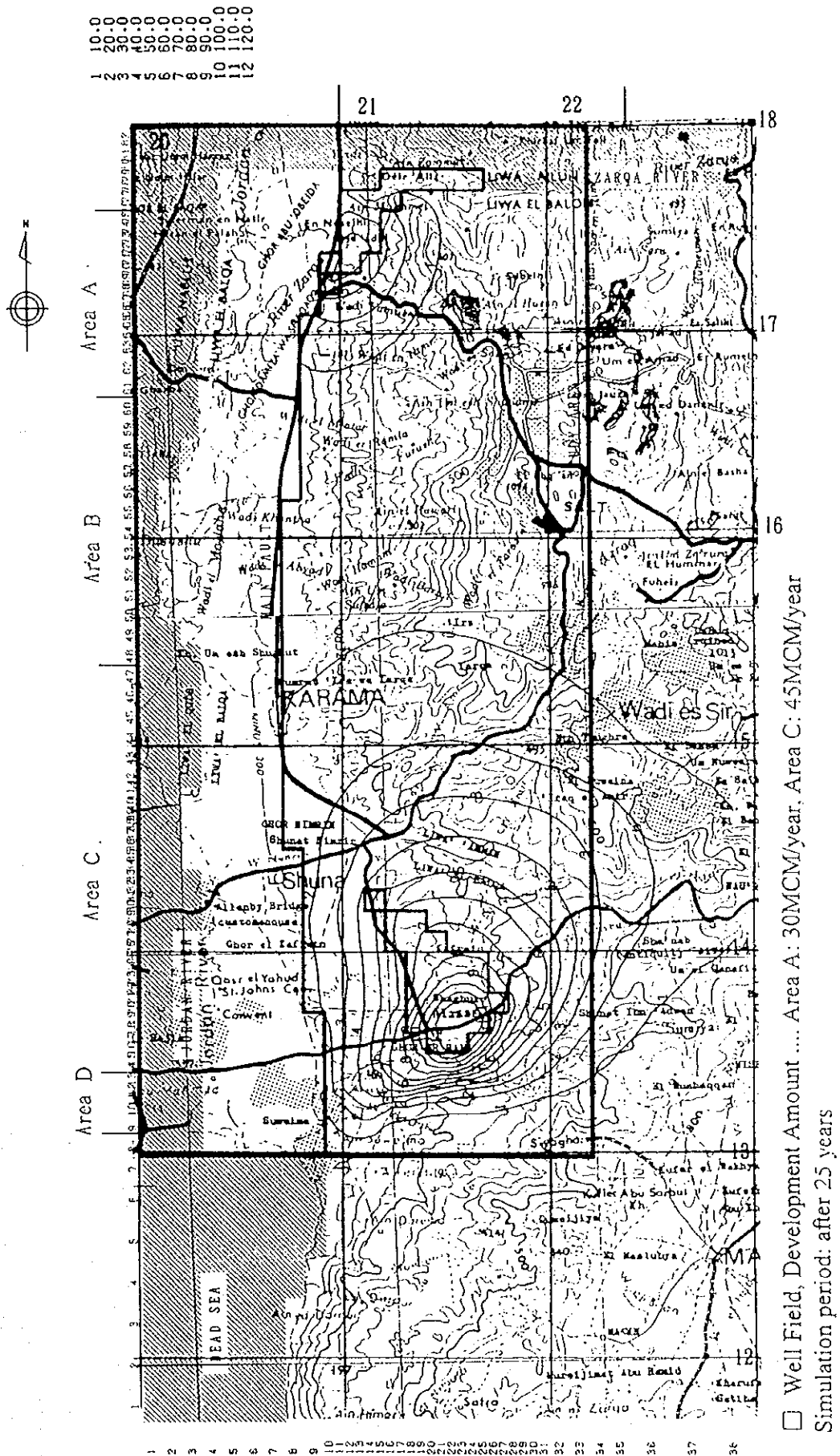
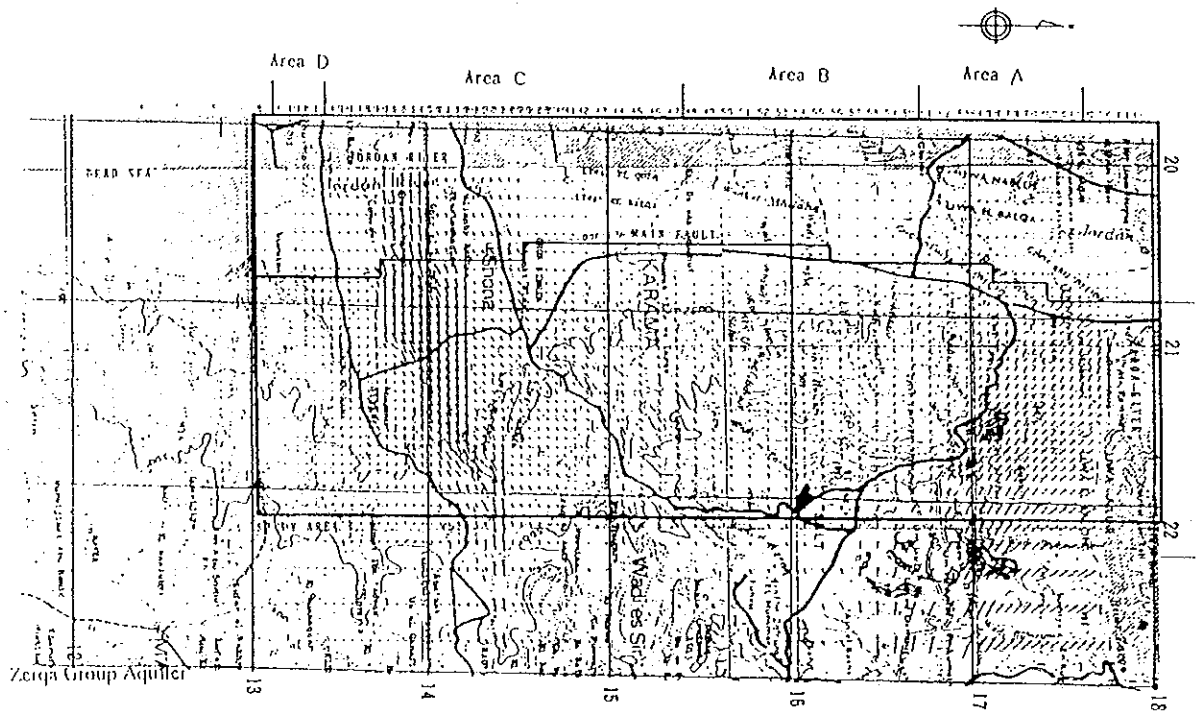
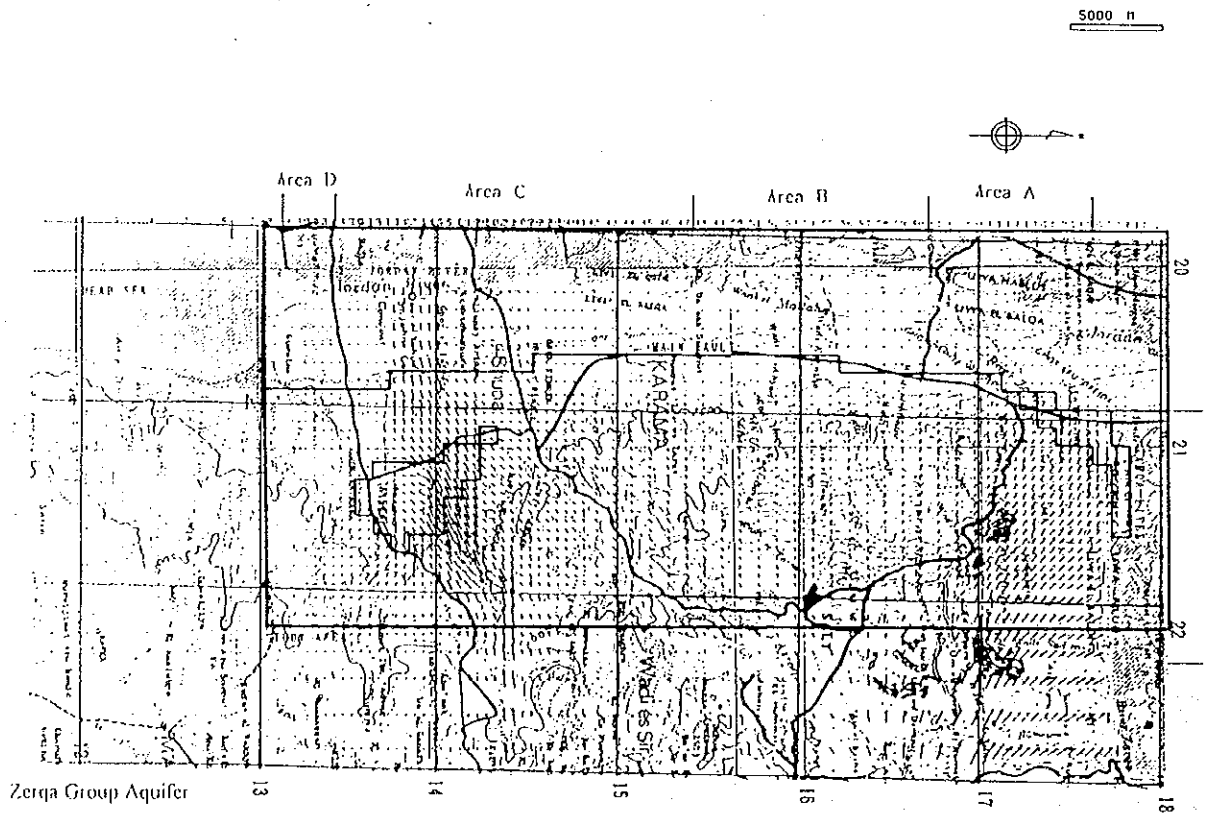


図 1. 1 2 計画ケース 3 における開発 25 年後のザルカ層群帯水層の水位低下量

MODFLOW < CASE3 75MCM >



(a) 開発前の現況流束ベクトル



(b) ケース 3 における 25 年後の予測流束ベクトル

図 1. 13 開発前と開発後（25 年後）の流束ベクトル変化

(3) 地下汽水水質変化

地下汽水開発前の現況流束ベクトル図と、ケース3における25年後の予測流束ベクトル図を比較すると（図1. 13参照）、地下汽水の塩分濃度の高いB地域（図1. 7に示す塩分濃度分布参照）から地下汽水開発地域であるA地域およびD地域への地下汽水の流れはほとんど変化していない。このため、C地域からの高濃度の地下汽水の引き込みによる水質の変化（高濃度化）は発生しないものと予想される。

一方、開発による地下汽水の水位低下により、上層の淡水帯水層であるクルノブ砂岩帯水層からの漏水が促進される。ケース3の開発の場合、シミュレーションの結果から開発25年後には淡水（TDS値で500mg/Lであろうと推定される）の流入量が開発前より約12MCM/年増えることが予想されている。

以上のことから、地下汽水開発によりザルカ層群の地下汽水の塩分濃度が高くなることは無く、むしろ塩分濃度が低くなる傾向にあると予想されるが、その変化は大きくは無いと想定される。