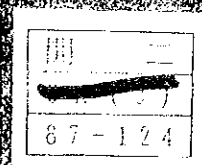


中華人民共和國
天津市地下水資源開發計劃調查
(黃庄窪地區)

主 報 告 書
要 約 版

1987年12月

國際協力事業



中 華 人 民 共 和 国

天 津 市 地 下 水 源 開 発 計 画 調 査
(黄 庄 窪 地 区)

主 報 告 書

要 約 版

JICA LIBRARY



1041448[0]

1987 年 12 月

国 際 協 力 事 業 団

国際協力事業団		
受入 月日	'88. 3. 2	105
		61.8
登録No. 17263		SDS

天津市地下水源開発計画調査 主報告書

要 約 版

目 次

まとめ

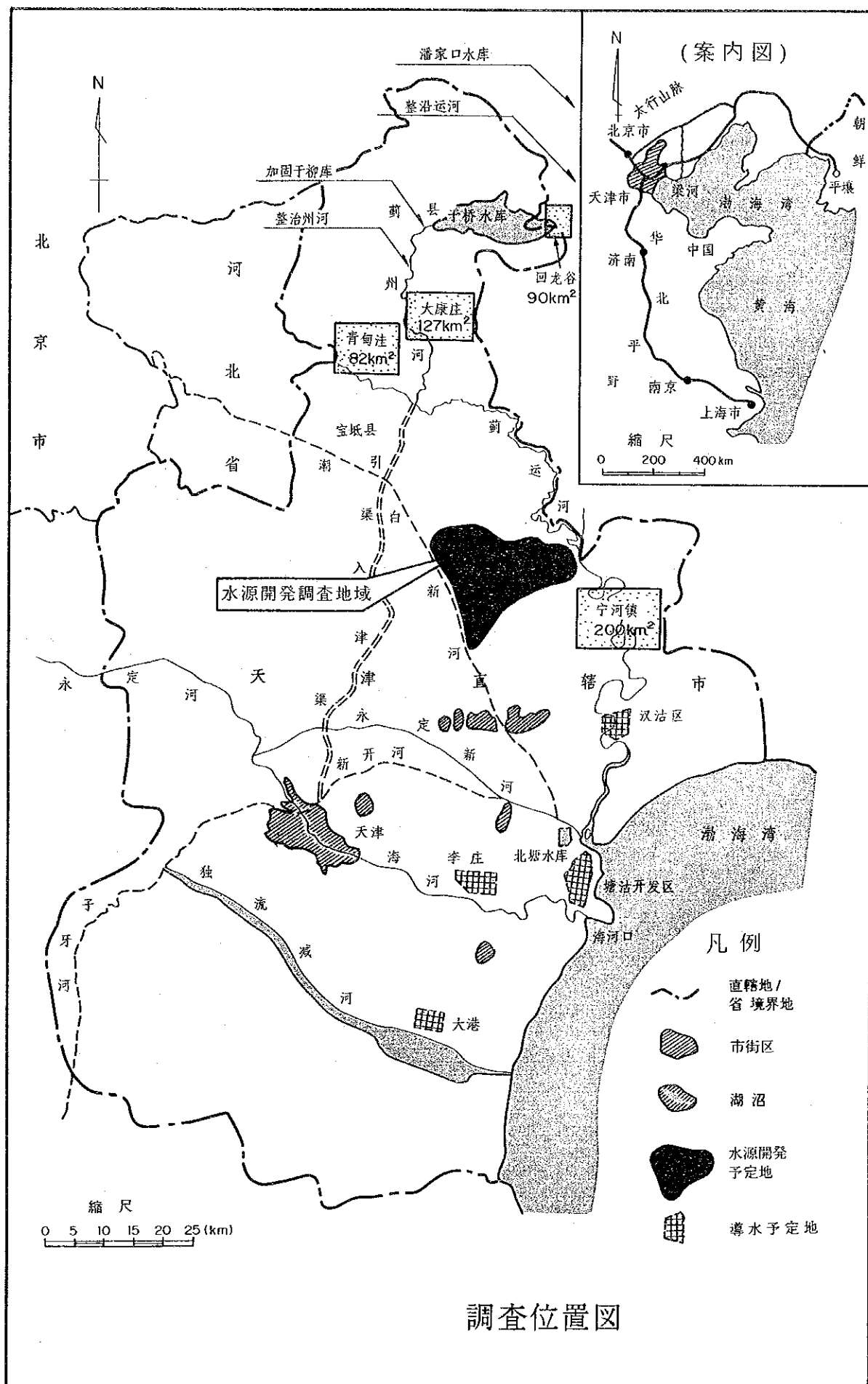
	頁
第1章 序 論 -----	1
1.1 はじめに -----	1
1.2 調査の背景と目的 -----	1
1.3 調査方法と調査工程 -----	5
1.3.1 調査方法 -----	5
1.3.2 調査工程 -----	5
1.4 調査体制と組織 -----	6
第2章 調査地域の概要 -----	8
2.1 位置と地形 -----	8
2.2 気候 -----	8
2.3 土地利用 -----	8
2.4 人口実態 -----	9
2.5 地下水利用 -----	9
2.6 導水計画地域 -----	10
第3章 水文地質構造 -----	11
3.1 帯水層区分 -----	11
3.2 帯水層の性質 -----	12
3.2.1 第Ⅰ帯水層 -----	12
3.2.2 第Ⅱ帯水層 -----	12

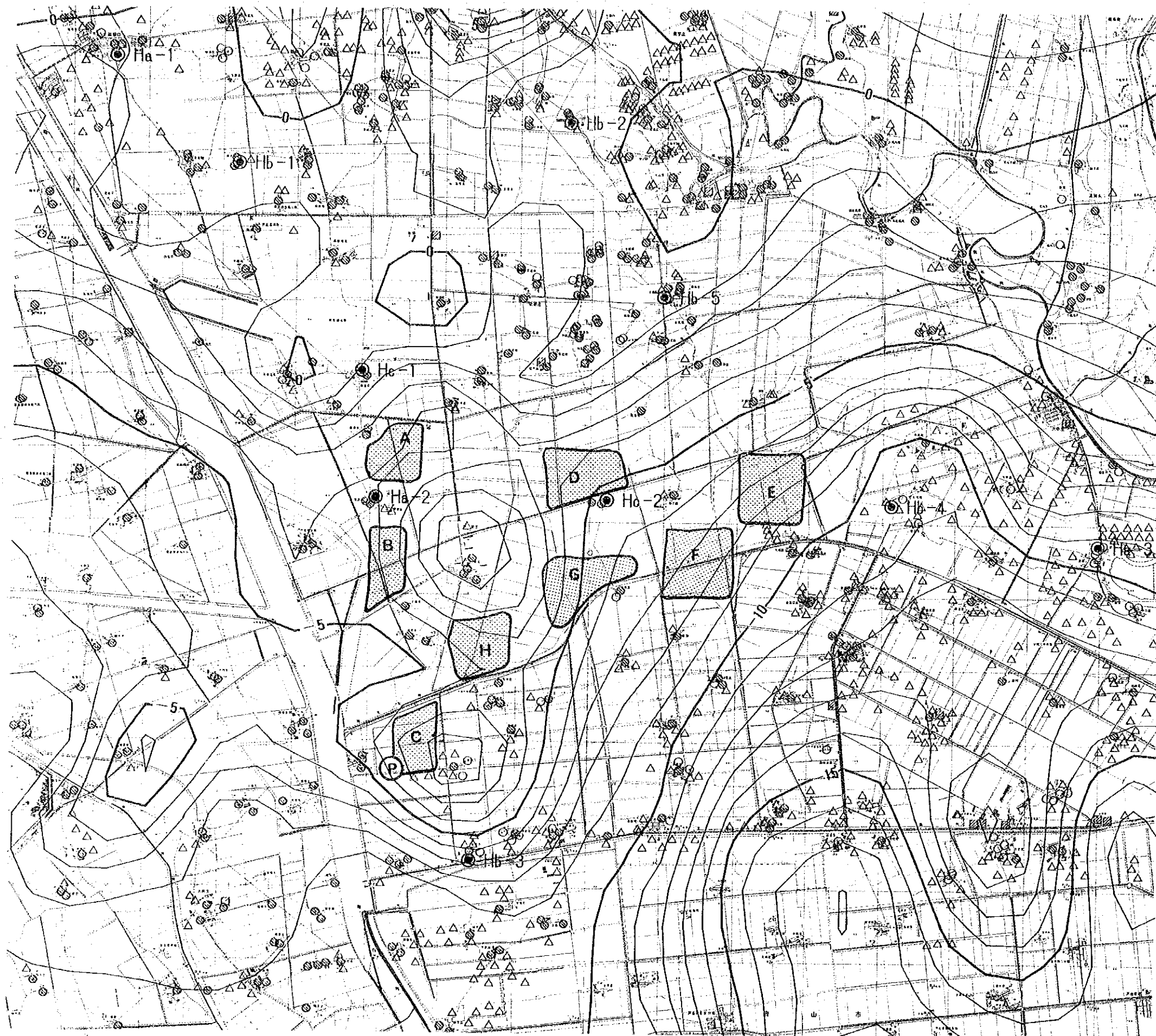
	頁
3.2.3 第Ⅲ帯水層	13
3.3 地下水の流動と水位変動	13
3.3.1 第Ⅰ帯水層	13
3.3.2 第Ⅱ帯水層	13
3.3.3 第Ⅲ帯水層	14
3.4 水質	15
3.4.1 水文地質構造との関連	15
3.4.2 塩水化について	16
3.4.3 水道原水としての適否	16
第4章 地下水賦存量の評価と開発計画	17
4.1 評価の手法	17
4.2 地下水涵養量と灌漑用地下水利用量の評価	17
4.3 地下水動態変化の復元と将来予測	17
4.3.1 地下水動態変化の復元	17
4.3.2 地下水動態変化の将来予測	18
4.4 地下水開発区と最適取水	19
4.4.1 開発量決定上の制約	19
4.4.2 開発対象帯水層の決定	19
4.4.3 開発可能量	19
4.4.4 地盤沈下と問題点	20
4.5 標準生産井戸の設定	20
第5章 導水計画構想	22
5.1 天津市水需給の現況及び将来予測	22
5.2 天津市水道給水施設の現況	22

	頁
5.3 施設基本計画 -----	23
5.3.1 全体計画 -----	23
5.3.2 取水施設計画 -----	23
5.3.3 ポンプ施設計画 -----	23
5.3.4 導水施設計画 -----	24
5.4 概算事業費の算出 -----	24
5.5 導水計画案の比較と評価 -----	25
 第6章 今後の課題 -----	 28
6.1 環境影響予測と対策 -----	28
6.1.1 周辺の地下水位降下 -----	28
6.1.2 地盤沈下 -----	29
6.1.3 地下水の塩水化 -----	30
6.1.4 地下水の人工涵養 -----	31
6.2 モニタリング体制 -----	31

報 告 書 の 構 成

- 1) 主報告書
- 2) 主報告書要約版
- 3) 付属報告書 (I)
 - －地下水探査・物理探査編
 - －井戸試掘編
 - －水文地質編
 - －水 質 編
- 4) 付属報告書 (II)
 - －地下水評価シミュレーション編
 - －導水計画構想編
- 5) 付属資料集





凡 例

新設調査井

●Ha-1 新設調査井の位置及び番号
(全 10ヶ所)

既設井の種類と分布

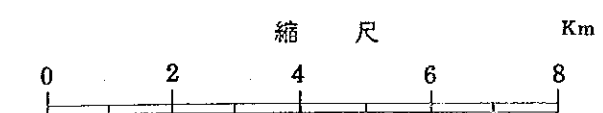
- △ 農業用井戸
- ⊙ 飲用・生活用井戸
- 農業用及び飲・生活用兼用の井戸
- ▨ その他(工業用含む)の井戸

地下水位

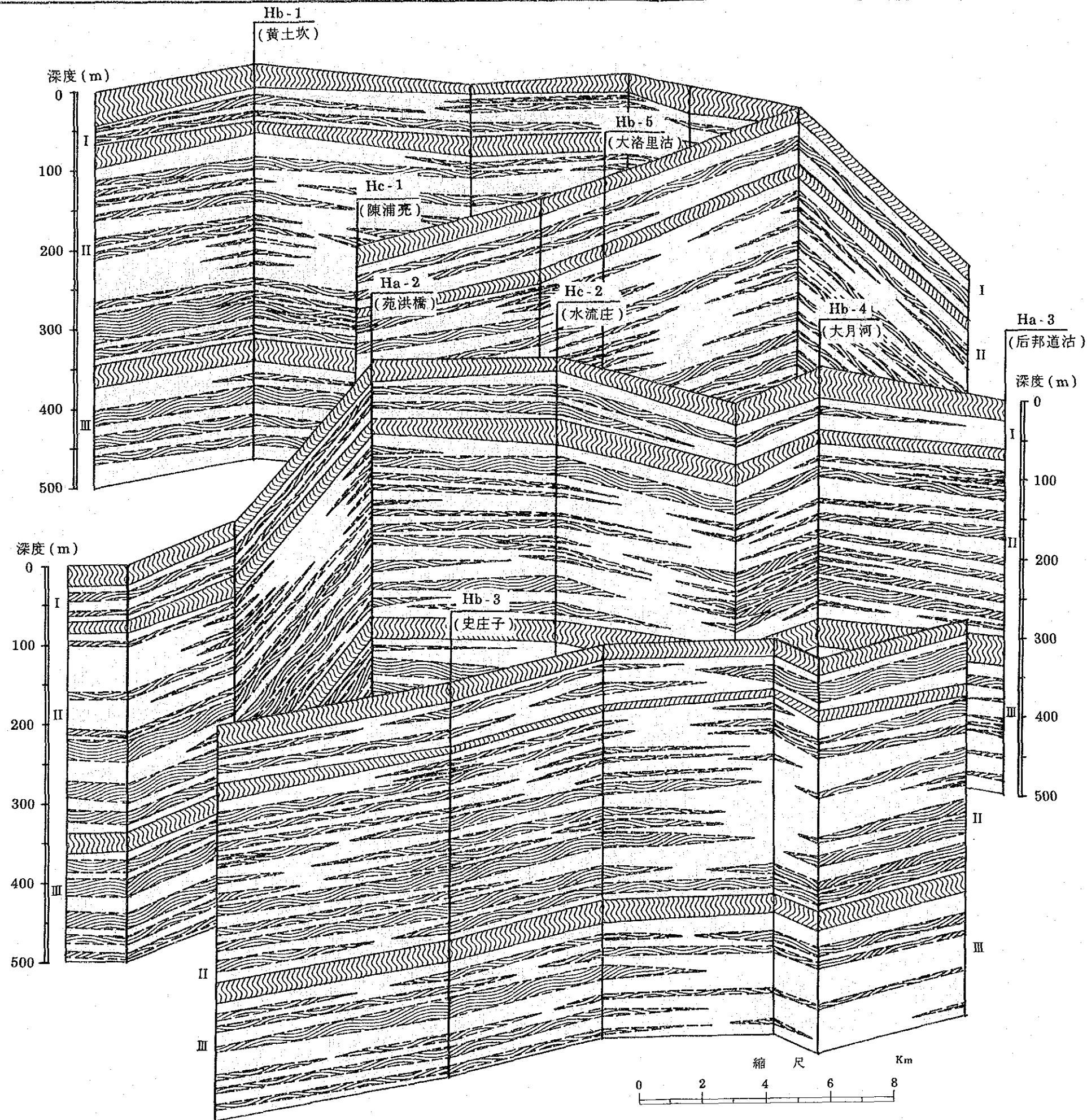
—10— 地下水位等高線(標高 m)
(1986年 6月、第Ⅱ帯水層)

水源開発計画

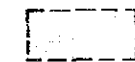
- ▨ A~H 水源開発地域
- ⒫ 導水ポンプ場



中華人民共和國			
天津市地下水源開発計画調査			
水文地質と開発計画			図番
			1987年 12月
製図	校正	JICA 国際協力事業団	



凡 例



砂質土



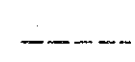
粘性土



難透水層



帶水層境界



地層境界

I

第 I 帶水層

II

第 II 帶水層

III

第 III 帶水層

中華人民共和國
天津市地下水源開發計画調査

水文地質構造パネルダイヤグラム

図番

1987年12月

製図

校正

JICA

国際協力事業団

ま と め

はじめに

- 1) この報告書は、1985年11月より、1987年12月まで、3ヶ年度にわたって行われた天津市黄庄窪地域（約800km²）での地下水開発調査の結果をとりまとめ、今後の開発の方向を示したものである。
- 2) 調査は物理探査から井戸試掘、水文地質、水質に至る一連の地下水調査を含み、それらの結果を総合解析した後、水収支シミュレーションモデル計算によって地下水開発量を算出した。さらに地下水開発に伴う地盤沈下を予測し、最適な取水配置計画を明らかにした。最後に上水源として利用するため、開発地から4つの受益候補地に至る導水案について施設基本計画をたて、概算事業費を算出して評価を行った。

本調査は国際協力事業団の6つの分野にわたる専門家によって行われたが、中国側では天津市科学技術委員会が受け入れ機関となり、同地質鉱産局が実施機関となって調査を遂行した。

天津市の水需給予測と調査の背景

- 3) 天津市（全人口 796万人、1984年）の生活用水、工業用水と農業用水を含めた1990年の総需要量は、1984年の約 1.5倍の約 11.95億m³（327万m³/日）と予想され、2000年には更に 2.1倍の 16.44億m³（450万m³/日）になる見込みである。それに対する供給量は、水源開発と節水処置がなされた場合でも、それぞれの年で1.47億m³と3.89億m³の不足が生ずると予測されている。1990年の水源開発の内訳は、地表水（引滦入津）4.13億m³、黄河引水 3.8億m³、地下水 1.0億m³、その他（污水再処理など）1.55億m³が計画されている。

このうち、黄庄窪地域の地下水開発量は 0.5億m³/年が計画され、地下水開発計画水量の半分を占める。

- 4) 上記の状況を背景とし、1985年6月に中国政府と、国際協力事業団の間で合意に達した実施細則では、「日本側は 1990年を目標とした天津市の生活用水改善に資するため、天津市地下水源地黄庄窪地区における地下水源開発基本計画を策定する。」と定められ、この基本方針に従って当調査は行われた。

地下水開発可能量算定の条件

- 5) 地下水開発可能量は、1987年7月に地質鉱産局が提示し、調査団が合意した次の条件に従って算定された。
- (i) 開発期間は 1988年より 30年間とする。
 - (ii) 水収支基準年は年間降水量の2つの組み合わせとする。それは(平水年)・(平水年)・(平水年)・(1/4確率渇水年)と(平水年)・(平水年)・(平水年)・(1/10確率渇水年)の2ケースである。
 - (iii) 地下水開発量の算定は；
 - a. 第1条件：30年間の累積地盤沈下量を1.5mとし
第2条件：地下水位降下量を地表面下60mとした場合のケースと
 - b. 年間開発量を 5000万 m^3 とした場合の累積地盤沈下量と地下水位降下量を推定するケースとする。

計算結果と開発計画

- 6) 上記地域に含まれる、開発対象地域(約 300 km^2)に於て、1988年より 32年間にわたり、年間5000万 m^3 (137,000 m^3 /日または1.5855 m^3 /秒)の地下水を開発した場合、開発地区に於ける地下水位は最も低下したところで標高マイナス 40m(地面より約 45mの深さ)に達すると予測される(現在の水位は標高マイナス 5m前後にある)。これに井戸損失を加えると、実際の井戸内における水位降下は地面下 60mに達すると考えられる。
- その時の地盤沈下量は、32年間の累積で最大 40cm程度と予測される。これはいずれも中国側が提示した許容限度内にある。なお開発の対象となるのは第Ⅱ帯水層(深さ約 90~330m)である。
- 7) 地下水開発地区は、事前調査団と中国側で、1985年6月に合意された計画対象領域(約 300 km^2)とし、8地区を選定した。一地区に 11~12本の井戸(深さ 350m)を掘り一本当たり 1500 m^3 /日(17.4 m^3 /秒)の揚水をする計画とした。井戸の総数は約91本となる。生活用水として水質に問題はない。

導水計画構想

- 8) 中国側は開発地下水を管路により、天津市南東部にある4つの工業地区（漢沽、塘沽、李庄、大港）に導水し主として生活用水として利用する構想を提示している。導水延長が一番近い漢沽地区で41kmから遠い大港地区で75kmに及び、4地区内の生活用水の供給の現況と将来の需要量の予測は、それぞれ異なっている。
- 9) 中国側の提示案に従い、調査団は水道給水施設の現況を調査し、施設基本計画を策定した。概算事業費は取水施設費から導水施設費までを含んで合計1.21億元（48.4億円）から、1.78億元（71.2億円）となる。この差は導水延長の長短の差である。これを開発水量当りの導水管端末に於ける金額にすると、7,632万元/m³/秒（30.5億円/m³/秒）から11,227万元/m³/秒（44.9億円/m³/秒）となる。
- 10) 4地区の導水計画案は、概算事業費による経済性の比較のみならず、生活用水の重要性、必要性をより明らかにして、優先度を判定し、また4案の折衷案や、分岐案なども考えたうえで評価する必要がある。

今後の課題

- 11) 当地域の地下水開発に伴って、周辺地域に分布する既存井戸（主として農業用水、生活用水）の地下水位降下や取水困難などの影響が発生することが予測される。また浅層の化石塩水による水質汚染の恐れもある。

したがって、地下水源を持続的に有効に活用するためには地下水開発事業と共に、

- ① 現況のより正確な把握 ② 環境基準の作成 ③ 監視機構の設置 ④ より広域な地下水盆管理の段階を踏んだ、適切な施策が実施される必要がある。

第1章 序 論

1.1 はじめに

この報告書は、1985年11月より1987年11月まで、3ヶ年度にわたって行われた天津市黄庄窪地域（約800km²）での地下水開発調査の結果をとりまとめ、開発の方向を示したものである。

調査は物理探査から井戸試掘、水文地質、水質に至る一連の地下水調査を含み、それらの結果を総合解析した後、水収支シミュレーションモデル計算によって地下水開発量を算出した。さらに地下水開発に伴う地盤沈下を予測し、最適な取水配置計画を明らかにした。最後に上水源として利用するため、開発地から受益候補地に至る導水計画について予察的な企業化調査をした。

本調査は国際協力事業団の6つの分野にわたる専門家によって行われたが、中国側では天津市科学技術委員会が受け入れ機関となり、同地質鉱産局が実施機関となって調査を遂行した。

1.2 調査の背景と目的

天津市街地区の1984年の水需要は、年間で生活用水1.39億m³、工業用水4.22億m³、農業用水2.39億m³で合計8.00億m³（219万m³/日）になる（表1.2.1）。

これに対する天津の水源は大別すると1983年までは海河からの取水と、深井戸700本による地下水の採取で各々4.6～5.6億m³/年、1.38億m³/年を得ていた。これに、北の滦河からの引水工事が1983年11月に完成して、4.13億m³/年（約13.1m³/秒）の導水が成され、合計約11.1億m³/年の給水が可能になった。しかし、引滦入津水路は実際には全長234kmにおよぶ長距離輸送のため、土水路より地下への浸透と水面からの蒸発を合わせると損失は約30～40%に達すると言われ、また特に滦河は水量が年間を通じて安定せず干ばつの影響を受けやすい欠点がある。更に天津市街区での地下水の過剰開発は地下水位の低下とこれに伴う地盤沈下（1959～1982年間で最大2m）をもたらしている。

また、天津市街地区（1984年）の人口は437万人で一日当たりの一人の生活用水使用量は87ℓであるが、1990年には人口502万人に対して生活用水使用量は146ℓ/日/人を目標

としている。

表1.2.1 天津市の水需給 (億 m^3)

年	1984	1990	2000
城鎮人口	437万人	502万人	610万人
全市人口	796万人	856万人	< 950万人
供給水量	8.00億 m^3 (219万 m^3 /日)	10.48億 m^3 (287万 m^3 /日)	12.55億 m^3 (334万 m^3 /日)
地下水 引滦入津	} 4.49(56.1)	0(0)	0(0)
		4.13(39.4)	4.13(32.9)
黄河引水	—	3.8(36.3)	3.8(30.3)
地下水	3.09(38.6)	1.0 (9.5)	1.0 (8.0)
その他	0.42 (5.3)	1.55(14.8)	3.62(28.8)
需要水量	8.00億 m^3 (219万 m^3 /日)	11.95億 m^3 (327万 m^3 /日)	16.44億 m^3 (450万 m^3 /日)
生活用水	1.39(17.4)	2.68(232.4)	4.12(25.1)
工業用水	4.22(52.8)	5.56 (46.5)	7.91(48.1)
農業用水	2.39(29.8)	3.44 (28.8)	3.86(23.5)
その他	—	0.27 (2.3)	0.55 (3.3)
差	0(%)	-1.47億 m^3 (%) (40万 m^3 /日)	-3.89億 m^3 (%) (107万 m^3 /日)

天津市科学技術委員会提供資料より抜粋。開発及節水措置を採用した場合の数字。

生活用水、工業用水と農業用水を含めた1990年の総需要量は1984年の約1.5倍となる約11.95億 m^3 と予想され、2000年には更に約2.1倍になる見込みである。開発と節水措置が採用された場合でも、それぞれ1.47億 m^3 と3.89億 m^3 の不足が生ずることが予測されている。この水を補うために新たに大規模で安定した表流水を黄河から導水する計画があるが、技術的な困難さと投資額の巨大さで近年中に実現することは不可能と考えられている。

上述の生活用水の不足を短期間に解決し、将来の大規模表流水導水計画実現までの安定供給対策として、天津市北方の5ヶ所に地下水水源候補地が選ばれ、その内今回の調査対象として、黄庄窪地区を中心とした地域での地下水開発が中国側から提案された。1985年6月には中国政府と国際協力事業団の間で、協力の内容と範囲が合意に達し、実施細則で次のように定められた。

協力の内容及び範囲

(1) 日本側は1990年を目標とした天津市の生活用水改善に資するため、天津市地下水源地「黄庄窪」地区(300km²)における地下水開発基本計画を策定する。

(2) 日本側は本調査の期間中、調査に参画する中国側の専門家に対し調査業務を通じ、技術移転を行う。

注) 調査地域については、黄庄窪地区(約300km²)は計画対象領域、それを含む周辺域(約800km²)は調査対象領域と再定義することで、国際協力事業団と中国側で1986年7月に合意した。

現在のところ中国側は黄庄窪地区で開発される地下水を各生産井から管路で直接臨海工業地区に送水し、利用することを考えており、次の4つの送水予定地がある。

- 1) 漢沽地区
- 2) 塘沽開発区
- 3) 李庄
- 4) 大港

中国側では黄庄窪地区においては、これまで27ヶ所の試掘井または調査井を掘削しており地区内の水文地質図と地質断面図が作成されている。

各調査のとりまとめ方はかなり高い水準で実施されており、スタッフの技術力も充分ある。いっぽう調査機器の不足、地下水の定量的評価方法についての実践不足、更に地下水管理計画も確立されていないので日本の効率的な技術協力を必要としている。

以上の背景を基に、今回の調査は黄庄窪地区における地下水開発の可能性を、総合的な水文地質解析によって水収支モデルを構築し、コンピューターシミュレーションを実施して、適正な地下水開発規模を設定し、1990年を目標とした地下水開発基本計画を策定することを目的としている。

同時に日本側は本調査の期間中、調査に参画する中国側専門家に対し調査業務を通じ技術移転を行うものとする。

1.3 調査方法と工程

1.3.1 調査方法

1985年11月より開始され、3ヶ年度にわたって行われた調査の項目と、その基本的手法は下記のとおりである。調査は中国での現地調査と日本国内での解析作業に分れ、下記に示す全体作業の流れに沿って各専門家による作業が行われた。

- a) 基本資料の整備
- b) 地下水物理探査
- c) 揚水井・観測井掘削
- d) 地下水位観測
- e) 既存井戸の現況調査
- f) 水質分析
- g) 水文地質解析
- h) 地下水開発可能量の算定
- i) 生産井の配置計画
- j) 導水計画に関する助言

1.3.2 調査工程

各調査は下記に示す工程で進められた。

- a) 1985年度の調査は1985年11月9日より1986年2月3日まで行われた。この間各方面にわたる既存資料の収集、現地調査と聴聞による必要資機材の抽出、V L F 物理探査、渇水期の一斉測水調査を行った。なお中国側の揚水井、観測井の掘削作業は年度末の1986年3月より、黒狼口 (Ha-1) と后邦道沽 (Ha-3) での観測井における岩芯採集が開始された。
- b) 1986年度は前年度に行った資料収集と、その解析作業の成果及び各種調査の技術

仕様書を踏まえて、各種の現地作業が進捗した年である。その内容は次のとおりである。

- 1) 揚水井と観測井の掘削やそれに付随する必要な調査（各種の検層や揚水試験）を実施し、23本の掘削を完了した。
- 2) 水文地質、電気探査、水質など各部門の現地調査、資料収集を行い、水文地質構造や地下水位変動を解明した。
- 3) 導水計画構想に必要な資料を収集し、中国側と認識を共通にするため各部門の専門家と協議し、4つの導水予定地への導水路と供給地の状況を明らかにした。
- 4) 揚水井、観測井の掘削や地下水、気象に関する収集資料を電子計算機にデータベースとして整理し、水収支シミュレーション計算の準備をした。
- 5) 掘削機を初めとする各種の日本側携行調査資機材の取扱について、現地作業を通して中国側に技術移転をした。

c) 1987年度は、前年度までの成果に基づいて、地下水賦存量評価のため、水収支シミュレーション計算を行い、最終報告書を取りまとめるソフトウェアを主体とした年であった。この間の主たる検討対象は次のとおりであった。

- 1) 新規の地下水源開発に伴う地下水動態の変化を予測
- 2) 地下水動態の変化に伴う地盤沈下発生の有無及び発生した場合のその規模の予測
- 3) 最適取水計画
- 4) 導水計画の策定と事業費の積算に基づく4案の比較・評価

1.4 調査体制と組織

1985年11月より1987年12月まで約25ヶ月間行われた調査実施の基本方針は、1985年6月に国際協力事業団と天津市科学技術委員会の間で合意された実施細則にあるとおり、現地調査の実施主体は中国側であり、解析及び設計については、中国側と調査団が共同で

技術移転をしながら実施した。

上記目的の遂行のため、国際協力事業団は団長のほか6つの分野にわたる専門家からなる調査団を構成した。その氏名、担当分野及び稼働月数は次のとおりである。

氏 名	担 当	中 国 内	日本国内
宮本 昇	総 括	2.8	2.0
辻 和毅	副総括/水文地質	7.0	4.3
斉藤 庸	地下評価シミュレーション	8.5	3.3
鈴木忠男	地下水探査/物理探査	6.0	0
吉武長栄	さく井指導	3.5	0
柳田泰邦	積算/施設計画	1.5	1.2
井手明彦	水 質	1.0	0.5
		30.3	11.3

中国での現地調査は30.3M/M、日本での解析作業は11.3M/Mであった。これに対し、中国側は、天津市科学技術委員会が受け入れ機関となり、同地質鉱産局が実施機関となって調査を遂行した。また導水計画構想に関しては、科学技術委員会が主体となって各機関にまたがるプロジェクト班を編成した。その機関は同建設委員会、同規画局、同水利局、同抗旱打井弁公室及び同地質鉱産局であった。

第2章 調査地域の概要

2.1 位置と地形

当調査の対象地域が属する天津直轄市（面積11,200km²）は、広大な沖積平野である華北平野の北端、北京の南東約120kmに位置し、東は渤海湾に面している。調査対象地域は天津市街地の北東約50km、北緯39°30′、東経117°30′付近の約800km²（東西約30km、南北約27km）にわたる地域であり、その南端は海岸より約35kmの距離にある。

調査地域の標高は海拔3.1～6.6mと低く、北側の燕山山脈から流下する潮白河、薊运河やそれらの派川の氾濫原の末端に当たる。調査地域の大部分は、比較的近年まで潮白河の派川導流川と別の派川である箭杆河の合流する付近に在った、黄庄窪と呼ばれる湛水域であったが、1971年潮白新河の河川改修により、黄庄窪は干陸されて耕地となった。調査地域には、蛇行する自然河川の他に、縦横に運河が開削され農業用水が引水、排水されている。

調査地域の北、約50kmには燕山山脈が東西に走り、その標高は最高1000m前後である。

2.2 気候

調査地域は、乾季と雨季が明瞭に別れ、また冬季が氷点下となる亜寒帯海洋式気候帯に区分される。月平均気温は7月に最高（25.7～25.8℃）、1月に最低（-5.7～-5.9℃）を記録し、年間平均は11.1℃である。年平均降水量は約595～626mmで、内陸に向かうほど多くなっている。6月から9月にかけて年降水量の82～83%が集中する。

2.3 土地利用

調査地域はほぼ全域が農業地帯に含まれる。その利用形態にはいくつかの特徴がある。(1)東～南東地域には圧倒的に水田が多い。これは農業用井戸が数多いことと符合している。(2)中央の、1970年代当初まで湛水していた黄庄窪地域には未利用の荒地や牧場が多い。(3)他地域はトウモロコシ（玉米）、高粱、小麦を主とする畑作地域である。北部に小麦が多く、東部と西部はトウモロコシと高粱を主としている。

2.4 人口実態

調査地域は宝抵県の南半分と、寧河県北部及び玉田県の西南端を含んでいる。調査地域内の総人口は約140,000人、人口密度は132人/km²である。人口は調査地域北部の八門城、槌洵庄と南部の東棘坨、大唐庄に多く、中央部に少ない。

2.5 地下水利用

調査地域は地下水利用が盛んな地域である。それは表流水は水質が悪いため地下水が唯一の生活水源として利用されていること、4月～7月の稲作や畑作の灌漑期に、不安定な表流水の補完水源として、あるいは独立した唯一の農業用水源として利用されていることによる。既存資料と現地調査の結果、井戸の総数は約1100孔に達し、ほぼ1.2孔/km²の密度になる。

井戸は調査地域北部と、南～南東部にかけて多く分布し、中央部には少ない。井戸は150～200mの深さのものが最も多く、北東部で浅く、南西と西にゆくに従って深くなる傾向がある。その深度は平均で136mから251mに増加する。用途は農業用が58%と圧倒的に多く、次いで生活用が34%を占める。農業と生活用の兼用のものが5%であるから、農業用と生活用で97%を占め、当地域の地下水利用形態を明瞭に示している。

揚水期間は4月から7月に集中している。一日の揚水時間は早朝から半日ぐらいとされているが、揚水ポンプの電気事情が必ずしも満足できる状態でないため、実際には少ないのかもしれない。この点に、本地域の揚水量を正確に把握できない原因がある。一井戸当たりの揚水量は10～15ℓ/秒のものが多く、3.5～7haの畑地あるいは水田を灌漑している。生活用の井戸は10ℓ/秒前後の揚水をしており、ほぼ集落に1～2本の割合で分布している。早朝に1～2時間揚水して、タンクに貯水して利用している。

当調査地域における地下水利用量はおおよそ $25 \times 10^6 \sim 30 \times 10^6 \text{ m}^3$ /年前後ではないかと思われる。

2.6 導水計画地域

現在のところ、中国側は、黄庄窪で開発される地下水を4つの工業地区（漢沽地区、塘沽開発区、李庄、大港）のいずれかに送水して利用することを考えている。

この地区はいずれも調査地域の南部にあり、導水延長は最も近い漢沽区で41km、最も遠い大港で75kmになる。このうち大港は既に黄庄窪の北部対壘水庫から約106kmの送水管によって地下水の供給を受けているが、他の地区にはそのような長距離の導水施設は無い。

第3章 水文地質構造

3.1 帯水層区分

調査地域の地質構造は、大きく二つに区分される。ひとつは燕山山脈を構成する古い地質時代に形成された固結した岩石であり、不透水性基盤をなしている。二つはその上位に不整合関係で重なり、帯水層を含む弱～未固結の砂層、粘性土層の頻互層である。地表面から基盤岩に達する深さは、調査地域の西端で行われたボーリングによって882mで確認されている。電気探査でも700～1000mの深さに存在することが推定されている。

深さ500mまでの地質は、砂層（極細砂～細砂が大半）と粘土、シルト（シルトが優勢）の頻互層より構成され、その単層の厚さは、砂層で0.8～20m、粘土、シルト層で0.4～35mになる。この頻互層は、2つの粘性土が優勢な地層群によって大きく3つに区分され、3層の帯水層構造が認められる。この帯水層は上位から第Ⅰ帯水層、第Ⅱ帯水層及び第Ⅲ帯水層と名付けた。粘性土の優勢な地層群は、地表より連続する浅層のものを加え、上位から第Ⅰ難透水層、第Ⅱ難透水層及び第Ⅲ難透水層とした。第Ⅰ帯水層は地表面下10～45mの厚さの第Ⅰ難透水層と、深度60～90mから70～110m間に連続する第Ⅱ難透水層に挟まれ、弱い濃度の化石塩水を含んでいる。第Ⅱ帯水層は、上記の第Ⅱ難透水層と深さ350m前後に連続する、厚さ30～50mの第Ⅲ難透水層に挟まれ、調査地域で最も有力な帯水層で水質も良好である。第Ⅲ帯水層は第Ⅲ難透水層の下底より深い所に存在する帯水層で、深度500mの試錐では、その下底は確認されていない。

コア（岩芯）標本を用いた古地磁気、有孔虫、花粉の分析によれば、調査地域では第三紀と第四紀の境界（約170万年前）は深さ380m前後にあると考えられる。深さ100m以浅には第四紀末の海進が化石分析からも裏付けられる。これら一連の堆積岩類は、日本では房総半島から東京低地の地下にかけて分布する下総層群～有楽町層や、大阪低地の地下に分布する大阪層群に対比される。

3.2 帯水層の性質

3.2.1 第Ⅰ帯水層

帯水層厚は40～60m前後あるが、間にレンズ状の粘土、シルト層を挟んでいる。帯水層は中～細砂を種とするが、東部では粗砂が挟在する。本層の地下水は濃度の薄い塩水を含み、その電導度は2000 $\mu\text{S}/\text{m}$ 、一部では4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上となる。また水温は一般に10℃以下で下位に比べ大幅に低く、明らかに下位の地下水とは隔離されている。塩水は第四紀末海進時の化石塩水が残留したものと思われ、調査地域の北～北西部に当たる内陸側には存在しない。

本層は水質の点から、将来地下水開発の対象とならない。

第Ⅰ帯水層の水理常数については、400m²/日ほどの透水量係数が苑洪橋で算出されているが、帯水層厚は地域差が大きく、特に東～北部では厚くなっているため、大き目に評価する必要がある。

3.2.2 第Ⅱ帯水層

本層は第Ⅱ難透水層と深さ350m前後に連続する厚さ30～50の第Ⅲ難透水層に挟まれる被圧帯水層で、調査地域で最も有力な帯水層である。西側では全般に粘性土層が優勢で、砂層が連続しない所があるが、東部は砂層優勢で、粒度も粗くなる。本層はまた深度方向にも粒度の変化がみられ、深度200～250mまでの上半部が粒度が粗く、中～細砂であるのに対し下半分は細～極細砂層となる。以上のことから、透水量係数は東部で大きく、なおかつ上半分で大きいという、大きな傾向があると考えられる。水温は15～20℃の範囲にある。

既存井戸の大部分は本層の上半部から取水しており、調査地域に広く分布するため、本層が将来開発された場合には地下水位降下や極端な場合には井戸枯れなどの影響が発生することが予想される。

本層は、その能力や水質の点から将来の開発対象となる帯水層と考えられる。

透水量係数はおおむね1000～4000m²/日の範囲に入るようであるが、地下水位等高線の形状から巨視的に見ると一部ではこれより小さい値もあるように思われる。透水係数は

1×10^{-2} cm/秒のオーダーである。難透水層の透水係数については土質試験によって $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/秒オーダーの値が得られている。貯留係数は、全般には $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$ オーダーの妥当な値を示している。

3.2.3 第Ⅲ帯水層

本層は深さ350m前後に連続する第Ⅲ難透水層によって、上位の第Ⅱ帯水層から区分される被圧帯水層である。本層は西部では砂層の割合が少ないが、東部では粒度が粗くなっており、一部では礫岩も存在する。この傾向は第Ⅱ帯水層と同じである。本層の地下水は第Ⅱ帯水層とは水質も異なり、水温も25～26℃とかなり高く、隔離された地下水であることを示している。本層の水理常数は今回の調査によって150～300m²/日の透水量係数が得られているが、仕上がり井戸の深度が足りない点や井戸洗浄不足などを勘案すれば少し大き目に評価する必要がある。

本層は帯水層の能力も東部地域を除いて小さく、工事費も大きくなることから、将来特に開発対象層とするのは適当でないと考えられる。また水質も PHが飲用水の標準を越えて高い点も問題がある。

3.3 地下水の流動と水位変動

3.3.1 第Ⅰ帯水層

地下水位は東北部で地表面下1～3m、南部で2～3mと浅い。地域内に縦横に開削された運河や河川の水位に影響され、水位変動は小さい。巨視点には現地盤の起伏に調和して北ないし北東から南西ないしは南に向かう流動をしていると考えられる。大部分は第Ⅰ難透水層を賦圧層とする被圧水であるが、同層が薄い南東部では不圧水となっているようである。

3.3.2 第Ⅱ帯水層

揚水の影響の少ない時期では、地下水位等高線はほぼ東西に走り、北部から南部に低

くなっている。北部で地面下4m前後（標高0m）、南部で同15m前後（標高-12m）となる。全域が第Ⅱ帯水層を賦圧層とする被圧地下水である。

豊水期（6～9月）には第Ⅰ帯水層に比べ、全般的に5～6m低い地下水位を示すが、北部にゆくほどその差は小さくなるようである。

一方、揚水中には状況が一変する。揚水による局地的な地下水位降下の影響が、特に南部と北部で現われ、動水勾配が急になったり、水位等高線が閉じる目玉が出現する。

しかし全般的な流動方向は北から南で、中央部での平均動水勾配は揚水の影響の少ない時期に比べ1/1100と2倍ほど急になる。水位標高は南端で-15mに達する。

第Ⅱ帯水層の地下水位の経年変化は古いもので1973年から観測されている。1973年からの長期変動をみると、1981年春までは、横ばいか、変動があっても1～2m前後の季節変動を繰り返し、一年で元の水位に回復している。しかし1981年夏以降揚水のパターンが急変したようで5～10mもの急激な水位降下が生じ、季節変動幅も大きく、元の水位に回復しないまま、漸次降下する傾向を見せている。これは1981年が20年確率の渇水年（年間降水量358mm）に相当する干ばつであり、1982～83年も同様に渇水年であったことから、地表からの涵養が減少すると共に、主として表流水不足を補完するため灌漑用井戸による揚水が増加したためであろう。だが、1984年秋以降になると、全域的に回復に転じ、1986年半ばには、1981年以前の地下水位に近いところまで回復している。

3.3.3 第Ⅲ帯水層

本層の地下水位に関する情報は限られているため、広域的な流動の形態は把握できない。全般的な傾向として、北～北西部から南～南東に向かう地下水流動が考えられる。

本層の地下水位の経年変化に関しては、本調査によって掘削された三本の観測井による記録のみである。期間が一年に満たないため、季節変動の全貌は把握されていないが、黒狼口では1986年7月に低く、冬季に高くなる傾向を見せており、第Ⅱ帯水層からの揚水影響が出ているように思われる。

3.4 水質

3.4.1 水文地質構造との関連

調査地域の水質区分によれば、調査地域の深度100m以浅の第Ⅰ帯水層（特に深度10m程度）は、Ⅲ非炭酸カルシウム型、もしくはⅣ准炭酸ナトリウム型に属し、第四紀末にあった海進期による海水の残留の影響を受けており、地下水源としては適していない。深度160～340mの第Ⅱ帯水層はⅡ炭酸ナトリウム型に属しているが、よりⅠ炭酸カルシウム型に近い水質を示し、この深度の帯水層は地下水源としては最も望ましいと考えられる。同じ第Ⅱ帯水層でも深度が220～370mになると、地下水の化学的進化が進んでいる。深度430～470mの第Ⅲ帯水層は、Ⅱ炭酸ナトリウム型に属するものの、 CO_3^{2-} が25～35mg/lと高く、そのためPHが9以上となり、地下水の流動、涵養量も少なく地下水源の開発には、適さない帯水層と考えられる。水質面からは、地下水源の開発対象として望ましい帯水層は、第Ⅱ帯水層と考えられる。

深度別のパターンダイアグラムをみると、同一地点の深度別の水質特性には、差異がなく、概ね似かよった形状を示した。このことは、第Ⅱ帯水層、第Ⅲ帯水層を構成する地層の成分が、比較的近似しているためと考えられる。しかしながら、連続揚水試験水と現位置試験水では、パターンダイアグラムの形状に差異が認められた。このことは、同一地点で深度別の現位置試験水の水質が似かよっていても、揚水量が大きい場合には、帯水層の上下に存在する加圧層の影響が出てくるためと考えられる。

次に既設井戸、揚水井の水質調査項目のうち、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} の7項目の水質調査結果に基づいて、濃度相関マトリックスを作成した。既設井戸間、揚水井間の相関は全体的に小さく（一部の揚水井間には、比較的大きい相関も認められたが）この結果は調査地域において離れた区間の地層の層序を対比することは困難で、水平方向に地層の連続性を追跡するのは困難であるという水文地質構造の特徴と概ね調和する結果と考えられる。

このような連続性の乏しい地点における地下水は、帯水層の上下の粘土層からの溶出、イオン交換などの働きが大きいと考えられる。また井戸間の距離も数kmとかなり離れている。これが深度的には、同一帯水層と考えられる地点間で、水質組成が異なる理由であろうと考えられる。揚水井の深度別の濃度相関マトリックスの相関値は大きい値を示

した。これは、垂直区分における深度別のパターンダイアグラムの形状が似ているという結果を裏づけるものである。

以上のことから、調査地域の地下水の涵養は、水平方向の流れによるものより、上下間の漏水による方が大きいと考えられる。しかし現位置試料の採取は確実さに欠けるため、分析値の解析には注意を要する。

3.4.2 塩水化について

調査地域の深度100m以浅は、残留海水による影響をうけていることが分かった。

その範囲は、調査地域の南半分に及んでいるが、 Cl^- 濃度は、調査地域の北部にいくにしたがって、小さくなっており、海水の影響は調査地域の北部地域が北限と考えられる。塩水化による汚染されている最深度は、既設井戸で180mであるが、残留塩水は浅層より来ているものと思われ第Ⅱ帯水層は、海水の影響は受けていない。

3.4.3 水道原水としての適否

一部（2本）の井戸を除いたすべて中国の生活飲用水質基準を満足しており、水道原水として特に問題とはならない。一部の井戸で大腸菌群数、一般細菌が基準を上回るのは、採取時に問題があったためと思われる。

当地域の地下水源としてはキイダイアグラムで、Ⅱ炭酸ナトリウム型に属する深度200～300mの第Ⅱ帯水層が最も適当である。

また、この帯水層の地下水は、生活用水（飲料水）として支障のない水質であることも明らかとなった。しかしながら、このⅡ炭酸ナトリウム型に属する地下水は、日本においては地盤沈下を生じやすい水質区分であることがわかっており、調査地域においても、適正量を越えた揚水を行うと、上下の粘土層からの漏水による地盤沈下、さらには Cl^- の混入による Cl^- 濃度の増加などが生じる可能性も考えられる。

第4章 地下水賦存量の評価と開発計画

4.1 評価の手法

新規地下水源の適正な開発規模を決定するため行った地下水シミュレーションは、大きく分けて次の3項目で構成される。

- ① 準三次元多層帯水層系モデルを用いた地下水動態の将来予測
- ② 垂直二次元多層帯水層系モデルによる地盤沈下量の予測
- ③ 最適化手法を用いた開発可能量の決定

4.2 地下水涵養量と地下水利用量の評価

上記の解析を行うには、水文地質的環境の把握が不可欠であり、特に解析対象領域での地下水涵養量（地表水の浸透量）及び農業用・生活用既設井戸群からの揚水量を知る必要がある。普通、既設井戸からの地下水利用量は実態調査を通して行うが、本調査地域の場合これが事実上不可能であったため、タンクモデルで地下水涵養量を試算する際に農業用既存井戸からの揚水量も合わせて評価した。なお、生活用既設井からの揚水量は、供給人口などを考慮の上、一定値（ $50\text{m}^3/\text{日}\cdot\text{井}$ ）を設定した。解析対象地域（約 840km^2 ）内での試算・集計結果は、地表から第Ⅰ帯水層への涵養量が $2,100\sim 4,500\text{万m}^3/\text{年}$ （ $27\text{mm}/\text{年}\sim 54\text{mm}/\text{年}$ ）、既設井からの揚水量が $1,400\sim 4,500\text{万m}^3/\text{年}$ である（1980～1987年）。

4.3 地下水動態変化の復元と将来予測

4.3.1 地下水動態変化の復元

地下水シミュレーションを用いて将来予測を行う場合、まずそのシミュレーションモデルの内挿検定が必要である。今回の調査では、地下水位観測資料や既設井のさく井実績が比較的明らかな1980～1987年を内挿検定期間とした。地下水位の変動記録によれば、

1980年以前と1981年以降は調査地の地下水の流況に著しい変化が認められるため、モデルの内挿検定は、1980年末の地下水位を定常的な計算で復元しようとする第1段階、1981年以降の地下水位を非定常計算で復元しようとする第2段階とに分けた。

次に地下水動態の将来予測を行う際の水文環境を設定した。涵養量については、水文基準年を年間雨量から平水年（1976年）、1/4渇水年（1981年）及び1/10渇水年（1983年）を定め、タンクモデルで求められたそれぞれの年の地下浸透量を地下水涵養量とした。一方、既設井からの揚水量であるが、顕著な地下水位低下が確認されている1981年以降をタンクモデルで計算した結果を見ると、1981年の揚水量が最大と求まったため、先の各水文基準年に相当する揚水量として、1980年（平水年相当）の量、1981年の75%（1/4渇水年相当）の量及び同年の90%（1/10渇水年相当）の量を設定することにした。

準三次元多層帯水層系シミュレーションモデルは、水平二次元流を4節点アイソパラメトリック要素を用いた有限要素法で数値離散化し、帯水層間の漏水は垂直一次元流としてモデルの中に組み込んだ。また非定常計算は時間項をクランク・ニコルソン法で差分化して行った。

準三次元多層帯水層系モデルの準備が完成し、境界条件・水文パラメーターの準備が整った後、先に述べた順序で内挿検定を行い、モデル（パラメーター）を固定した。なお、内挿検定では特に第Ⅱ帯水層の地下水位変動履歴の復元に力点を置いた（第Ⅰ帯水層は塩水化のため開発対象にならないし、第Ⅲ帯水層の水位観測資料は極めて少ない）ため、第Ⅰ帯水層の水位は全て一定水頭とする結果となった。このため、当準三次元モデルの計算には、地表からの地下水涵養量を用いる必要がなくなった。

4.3.2 地下水動態変化の将来予測

固定された準三次元モデルを用いれば、最適取水の検討が可能になる。すなわち、同モデルで定常計算を行えば地下水位と揚水量に関する連立方程式が求まる事になり、この、いわば全解析領域に関する連立方程式を、ある開発対象点に関する部分的な連立方程式に変形することが可能である。開発対象点に関する（部分的な）連立方程式を、地下水位と開発量に制約を与え、線型計画法で解くことが本調査で述べる最適取水である。

準三次元モデル及び垂直二次元多層帯水層系モデルによる将来予測に用いる基本的な水文環境は第4項に述べたが、この組み合わせ方は次の2ケースである。

第Ⅰケース：最初の3年間を平水年相当の涵養量・揚水量とし、次の1年を1/4渇水年相当の涵養量・揚水量とする。この組み合わせを1サイクルとし、非定常計算ではこれを8回繰り返す。

第Ⅱケース：第Ⅰケースの4年に1回の過酷な条件を1/10渇水年相当量におきかえる。なお、非定常計算の予測開始年は1988年とする。

4.4 地下水開発区と最適取水

4.4.1 開発量決定上の制約

最適取水の検討のため、準三次元モデルで定常計算を行う場合には、第8項の数値をそのまま使用することはできない。よって、第Ⅰ、第Ⅱ両ケースとも、1サイクル（4年間）の揚水量を日平均量に換算して用いることになる。次に、既存井戸の分布や道路・運河・村落の分布を考慮の上、新規水源開発地点（39点）を決定し、各開発点での制約を、

① 許容限界水位：標高-40m

② 開発期待量：3,500m³/日・点（約5,000万m³/年・全開発点）

として線型計画法（シンプレックス法）で最適解を求めた。この結果、2つのケースともシンプレックスの収束が確認され、結局年間5,000万m³の地下水源開発は可能という結論に達した。

4.4.2 開発対象帯水層の決定

開発対象層を第Ⅱ及び第Ⅲ帯水層の2層としても第Ⅱ帯水層のみとしても、許容限界水位内で取水可能な量に大差ない。よって掘削の経済性などを考慮の上、開発対象層は第Ⅱ帯水層に限定した。

4.4.3 開発可能量

上述のように、最適取水の検討は、既設井からの揚水量に日平均量を用いて行ってい

るが、実際の揚水形態は季節的に著しく偏っている。したがって、非定常計算によって、新規水源開発後の地下水位変化を確認する必要がある。第8項に述べた、2つのケースでそれぞれ8サイクル（32年間）の非定常計算を行った結果、既設井から最大の揚水がある6月時（灌漑期）でも第Ⅱ帯水層の地下水位は標高-40mを下回ることがないことが確認された。

新規水源開発後の地下水動態を準三次元モデルでモニターした時、第Ⅰ帯水層からの漏水が、第Ⅱ帯水層で消費される地下水の量の約8割に達することが判明した。第Ⅰ帯水層の地下水が化石塩分を溶存することを考慮すれば、将来的には第Ⅱ帯水層の地下水の塩分濃度上昇が危惧される。ただし漏水の際、帯水層である砂層中の通過時間の遅いこと、塩素イオンは両帯水層間にある難透水層（粘性土）中に吸着される可能性が高いことなど希望的観測を与える事実も多いが、開発後に残される問題の1つである。

4.4.4 地盤沈下と問題点

地下水汚染（塩水化）に加え、もう1つ大きな問題は、新規水源開発後の地盤沈下である。この検討は、垂直二次元多層帯水層系モデルを用いて行っている。準三次元モデルと同様な境界条件、水文環境でモデルを固定した後、このモデルを用いて、第8項の2ケースについて地盤沈下量を予測した（計算断面には3断面設定）結果、32年間の累積沈下量の最大はたかだか40cmであるとの結論を得た。

多岐にわたる解析を積み重ねた作業であるが、それゆえ上記の結果を得るまで多くの仮定が必要であった。調査地域の複雑な地下水利用事情を考慮した場合、新規地下水源開発後の地下水動態の変化が多分に複雑なものになることは当然予想できる。このため、地下水位及び地盤沈下のモニタリングが重要であり、モニタリングの結果とシミュレーション予測の結果に大きな隔たりが生じた場合には、地下水シミュレーションモデルの修正も考えるべきである。

4.5 標準生産井戸の設定

前節までに述べた計算手法によって、明らかになった地下水開発量を実際に取水するためには生産井戸を掘削する。生産井戸は掘削工事の工程、材料や揚水ポンプの調達、

掘削技術者の慣れなどを考慮すると、標準化された仕様とすることが実用上望ましい。これを標準生産井戸と呼び、対象は開発地区内に限るものとする。標準生産井戸を設定する上での基本的条件は次のとおりである。

- 1) 取水対象は第Ⅱ帯水層のみとする。したがって掘削深度は第Ⅲ難透水層上面（深さ320～330m）に砂だまり（10m）と余裕（10m）を加えたものとし、合計で340～350mとなる。掘削中には井芯傾斜を測定し、孔を垂直に保持するよう努める。
- 2) 標準生産井戸の揚水量は1,500m³/日（17.4ℓ/秒）とする。
- 3) 揚水ポンプを挿入する口径10インチの鋼管の深さは約60mとする。
- 4) スクリーンはできる限り、多くの砂層区間に設置するが、第Ⅱ難透水層の下面（深さ90～100m）から50m区間は塩水化防止の安全対策として鋼管のみとする。したがってスクリーン設置区間は深さ140～150mより深さ320～330m間（厚さ180m）の砂層とする。その長さは合計で約70～80mである。
- 5) 深さ60m以深より孔底までは内径8インチとし、10インチ鋼管とは異径管で接合する。
- 6) 最終掘削口径は孔底まで15.5インチとし、深度が増す毎に口径を小さくする、段掘りはしない。これは砂利の充填を確実にするためである。充填砂利は帯水層（細砂層を主とする）からの排砂防止に極めて重要であり、径2～5mmの円～垂円礫とする。
- 7) スクリーンは開孔率15%前後の鋼管ベース巻線型とする。
- 8) 中国側で現在スクリーンの外周に巻いているシュロは、使用しない。井戸の仕上げ洗浄はエアリフトとスワビングを併用し、各スクリーンの位置毎に下位のものから実施する。

第5章 導水計画構想

5.1 天津市水需給の現況及び将来予測

本調査の目的のひとつは、天津市の生活用水など水需要の現状を把握し将来を予測するとともに、需要量に対する供給量の現状及び将来を明確にすることにある。水需要の状況を市街地区の生活用水必要量についてみると、1984年に1.39億 m^3 （1人当たり使用水量は約87 t /人・日）であったのが、今後節水努力を行ったとしても、1990年に2.68億 m^3 （約146 t /人・日）、2000年には4.12億 m^3 （185 t /人・日）に増加すると予測されている。これは、調査団が現地調査中に入手した、1985年で約114 t /人・日という数値から換算・比較しても適当と判断出来るものである。これに対し、将来の給水量には、引滦入津からの4.13億 m^3 /年は確実と考えられる。しかしながら、他の供給水源として提案されている黄河引水の3.8億 m^3 /年、地下水や汚水処理水の再利用などは、その開発・保証率の信頼性に疑問が残るところである。今、天津市街地区の生活環境向上が著しい中、当然生活用水必要水量は、先の予想を越えて増加することも考えられ、これを補うための対策の1つとして、当黄庄窪地下水源開発の重要性と緊急性が大きくクローズアップされるものである。

5.2 天津市水道給水施設の現況

天津市の水道施設状況を整理すると、1982年5月に完成した引滦入津によって、天津市の水供給施設が生まれ変わったといえる。薊県の東にある干橋水庫は容量約15億 m^3 を有し、天津市街地へ年10億 m^3 の放流能力を有する。しかしながらこの下流約40kmに渡る州河整治は大部分が現況河川を利用した土水路のため、用水の蒸発及び浸透が著しく、その量は放流水の約3割～4割を占めているということである。

尔王庄水庫は容量約4500万 m^3 を有する中間貯水池で、各目的地への分配機能と天津市街地の非常時の貯留用水池としての目的を持つ重要な施設である。通常用水は、ここから工業、農業、生活、その他の用水として用途毎に分水されて利用されている。

天津市区には、宜興埠泵站（ポンプ場）をへて、浄水施設が馬庄、芥園、新開、凌庄と5ヶ所あり、そこから市内へ給水されている。

この他、塘沽区には、北塘水庫（容量約1000万 m^3 ）をへて、浄水施設が水源五廠（第五浄水場）の他、計画中を含めて2ヶ所ある。

以上、これらポンプ場や浄水場の施設能力あるいは技術力に問題はない。

5.3 施設基本計画

5.3.1 全体計画

黄庄窪地区で開発される地下水源に期待する導水候補地として、漢沽区（第1案）、塘沽開発区（第2案）、李庄（第3案）、大港（第4案）の4地区が天津市から提案された。またそれら4地区への基本的導水予定ルートも同時に示された。したがって、その各々の導水予定地区と導水ルート上の要点地区の現地調査を行い、整理した。予定地区はいずれも天津市の重要な工業地区であり、今後工業の進展に伴って、そこに生活する人々の用水確保が必要と訴えている。導水ルートは潮白新河に添って南下し、各予定地に至るルートとなっているがこれは最短距離に近いルートであり、経済的ルートと判断出来る。

5.3.2 取水施設計画

黄庄窪地下水源開発地域で揚水可能な原水は、地域の諸条件を考慮して決定した8開発地区から取水し、それぞれの地区でいったん貯留する。その後、基本的に2つの系統に分けて黄庄窪導水ポンプ場まで、送水する方式とする。取水・送水方式を1本化することも考えられるが、各々の井戸や、各地区の揚水状況の変化に柔軟に対処できる方式を選定した方が、広い用地を有する当地区の場合有効と判断する。

5.3.3 ポンプ施設計画

井戸ポンプは、深井戸用水中ポンプとし、各地区の貯水池まで送水する能力を有する施設とする。各地区の送水ポンプ場と、黄庄窪導水ポンプ場には、別々に貯水池を設ける。ポンプは比較的短距離（3.0km～10km）用の送水ポンプと、長距離（41km～75km）送

水用の導水ポンプとが必要になるが土地が平坦なため、実揚程より、管路の摩擦水頭が大きい値（約8.0m～87m）となる。

ポンプ機種は横軸・両吸込うず巻きポンプが適する。導水ポンプの場合、各4地区までの送水延長が約41km～75kmと長いため、全揚程が約73m～133.6mと大きくなる。したがって、ウォーターハンマーの検討を行うと、第1案～第4案共に、ポンプ運転を非常停止した場合、管路全域に負圧が発生して管破損の危険があるため、その対策として、フライホイールを取付け、回転部の慣性効果を大きくする必要がある。その場合、第1案、第2案、第3案は、フライホイールのみで対処可能であるが、第4案は不可能であり、あわせて、ワンウェイサージタンクを設けることにすると、そのサージタンクの容量は概略計算で、4ヶ所計約3400m³必要と算出される。この容量は非常に大きな値であり、实际的ではない。このため、第4案のみ、多少不経済ではあるが、中間部に中継ポンプ場を設ける方式とした。

5.3.4 導水施設計画

導水管には、天津市側としてプレストレストコンクリートパイプの使用を考えている。施工性が劣ることや異形管を使用する場合の柔軟性に乏しいなどの欠点を十分考慮する必要はあるが、管路埋設部の土質条件などの諸条件に対処できるし、経済的にも有利である。ただし、導水ルート上にある潮白新河や永定新河など、河川横断部は施工性などを考慮して、鋼管を使用することにする。なお、導水管径は、日量約137,000m³/日を送水可能にするため内径1200mm（流速約1.5m/秒）が必要である。

5.4 概算事業費の算出

以上の開発計画に基づく概算事業費は、天津市から入手した単価－既存施設から換算－を基に積算することができる。取水施設費から導水施設費までの合計で、第1案約12,141万元、第2案12,549万元、第3案13,492万元、第4案17,865万元となる。この費用差は、導水延長の長短の差であり、したがって導水予定地の水需要の状況とは関係ない。

5.5 導水計画案の比較と評価

導水計画案4案に対する比較検討と評価は、経済性以外の要因が加わって困難な作業であるが、今回の調査の範囲内で次のようにまとめられる。漢沽区の場合、経済性や導水計画上の対応性は他の3案より優れているものの、生活用水が直ちに不足するような緊急性は感じられない。しかし、導水供給以外の水源は考えられず、例えば同地区内の地下水の新規開発は塩水化の問題が発生する可能性が大きい。塘沽開発区は経済性や導水計画上の対応性は第2位である。発展している開発区として要求度が高く、緊急性もあり優先度は第2位と考えられる。問題は、他の各種水源と当地下水源との関係が不明なことである。李庄の場合、経済性では優先度は第3位となる。工場の規模や操業開始の時期など、将来計画がまだ明確でなく、緊急性に乏しい。また、他水源との関係も不明な点が4案中で最も多い。大港は長距離送水のためにポンプ圧送では不経済となり、経済性からは優先度は最下位となる。しかし、現在操業中の工場に従事する人々の新規の生活用水源として、その必要性・緊急性は一番高いと評価できる。

これからの実施に当たっては、概算事業費による経済性の比較のみならず、4案それぞれの生活用水の緊急必要性をより明らかにして優先度の判定をすることが肝要と思われる。

当黄窪地区から新規に地下水源開発を行う必要性、重要性は天津市の水需要・給水バランス表から明確にされた。したがって、今後順調に開発計画が進み、開発事業が完成していくことが望まれる。

こうした事情を踏まえ、導水計画構想を具体化する際の提言が必要となろう。その第一は導水計画案4案の評価・比較並びに選定であるが、概算工事費の比較に見る経済的な優劣は、たんに予定地までの導水距離の長短の結果から生じたもので、真に最適な導水計画案がどれかを判断するのはむずかしい。このため各予定地での工場などの開発計画スケジュールと、当地下水源の今後の開発スケジュールとを比較検討し、両者が適合する予定地を選定するのが良策と考えられる。

また、導水予定地を1ヶ所に限定せず、例えば、第1案の漢沽区と第2案の塘沽開発区へ導水する計画とし、途中から分水する方法、あるいは第3案の李庄と第4案の大港への導水は、両地区が同一ルート上の地点であることから、まず李庄まで導水し、さらに必要水量を大港まで送水する方法も考えられる。後者の場合、第4案の中間部に必要

とした中継ポンプ場は不要となる。また、現在、第4案の大港へは、宝抵県東部の対拳水廠から、鋼管（径1200mm）で地下水が送水され、使用されているが、この管の送水能力には余裕があると考えられているため、大港の水使用状況にもよるが（工事のため断水がどの程度の時間可能かなど）、既存の送水管を使用することも1つの方法と考える。

提言の第二は導水管種選定にかんしてである。プレストレストコンクリート管を使用する計画とした場合、ウォーターハンマー現象の検討で示したように、長距離送水のため管路に大きな負圧が発生する。これは、フライホイールの取り付けで対処できるが、一般的に長距離で大きな負圧がかかる場合は、管種選定において現場施工条件などを十分に考慮する必要があり、その点では、プレストレストコンクリート管より鋼管が有利であることから、今後十分な比較検討が必要と考える。

表5.5.1 比較検討評価表

項目 予定地	管 径 延 長 程 度	現 状 (工業種別・人口・給水状況等)	将来計画及び必要水量 (工業種別・人口・給水状況等)	概算事業費(円)	比 較 検 討	評 価
(第一案) 濱沽区	径1200mm 41km 73m	・天津市の重要な化学工業地区である。 ・面積約13km ² 、2地区に分かれ、新地区は主に住宅地で1977年に完成された。約5万人。旧地区も5万人で工場主体である。 ・用水源は深井戸で新地区、井戸8本、ポンプ場4ヶ所(深さ約300m)、旧地区は12ヶ所で井戸20本である。 ・年間1000万~2000万m ³ を使用している。 ・工場では一部 運河の水を使用することもあり。	・大工場の建設を予定しており、水が必要。 ・化学工場、紡織工場、機械、ラジオ、建築材料工場 ・住宅地及び工場用地の面積の拡大を考えている。 ・黄庄窪からの水に期待している。	120,140,100	・経済性や導水計画上の対応性は他の3案より格段に優れている。 ・生活用水としての緊急性は感じられない。	・経済性からは第1位。 ・緊急性は第3位と考えられるが、他に水源が考えられない。
(第二案) 塘沽開発区	径1200mm 42km 74.8m	・天津市、郊外業務地区、1984年に開発開始、総面積33km ² 、3地区に分け3段階開発中。 ・第一段階(1990年目標) ・総人口 50,000人 ・工業、生活区 計 4.55km ² ・工業生産高 20~24万円/年 ・給水専一 尔王庄から 合計 60,000m ³ /日 (内、工業用45,000m ³ /日)	・第二段階 ・総人口 約180,000人 (従業員120,000人) ・工業区、生活区 計 15km ² ・工業生産高 90万円/年 ・必要水量 200,000m ³ /日 ・第三段階-2015年位、完成目標 ・開発地・ト 1.0km ² /年、と計画 ・必要水量、未定(予想不可能)	124,221,250	・経済性や導水計画上の対応性は第2位である。 ・現状、将来共に既に開発区として、発展しているが、塘沽区(旧区)に計画中の浄水場Q=60,000m ³ /日で対応不可能が疑問である。 ・北塘水庫(Q=1000万m ³)の水の有効利用は不可能か。	・経済性からは第2位。 ・開発区としての要求度は高い。 ・緊急性からは第2位と考えられるが、他の水源との関係が不明。
(第三案) 李 庄 (工業区)	径1200mm 49km 87.3m	・経済開発区 ・鋼管工場(鋼材、米国、西ドイツから輸入)が完成予定。 ・鋼製煉工場(日本、カダ、フランス等の設備)を計画中である。 (2~3km ²)	・尔王庄が黄庄窪からの取水を考えている。 ・天津市工業開発主要地区であり、約25km ² ・年間必要水量約2000~2500万m ³	133,648,750	・経済性や導水計画上の対応性は第3位である。 ・現状、将来共に既に開発区として、発展しているが、塘沽区(旧区)の水は使用できないか。 ・計画中の工場の完成予定年度が不明である。	・経済性からは第3位。 ・緊急性及び他の水源との関係が他の3案より明らかでない。
(第四案) 大 港	径1200mm 75km 133.6m ÷2=67m	・中国石油化学工業総公司工場 ・油類、化学繊維等を製造中 ・生活人口 100,000人 (内 労働者 20,000人)(既住宅含) ・給水量→宝坻、対岸水源から 約50,000m ³ /日(1981通水) ・水質良好にて浄水施設無し	・種々化学工業関連企業の発展を計画中である。(石油と天然ガスを原料とした大、中型連合工場) ・化学繊維部門、水質要求が高い。 (塩素含有量35mg/l以下) ・黄庄窪への水質、量に期待している。	177,577,500	・経済性や導水計画上の対応性は第4位である。 ・長距離故にポンプ圧送上、不経済である。 ・既存の対岸水源からの能力増加は不可能が疑問である。 ・水質、水量に対する必要性は十分に感じられた。	・経済性からは第4位。 ・緊急性からは第1位と考えられる。

第6章 今後の課題

6.1 環境影響予測と対策

6.1.1 周辺の地下水位降下

本調査地域における開発地区は、1986年8月調査団と中国側で合意された計画対象地域（約300km²）から選定された。この際の選定基準は、1)既設井戸への影響ができる限り少ない 2)集落からできるだけ遠く、土地利用上からも問題が少ない 3)集水や導水に有利な、運河や幹線道路に沿った地域とするなどであり、これらを比較検討して、8地域を選定した。

最大の水位降下は開発地域東部で発生しその深さは標高-40m（地面下約45m）と予測される。現況の水位は1986年6月で標高-1mから-6m（地面下6～11m）、1986年9月で標高-2mから-5m（地面下7～10m）にあるから、水位降下は39～34mほどである。井戸内の水位は、水理常数に従った理論的水位降下（帯水層損失）のほかに、井戸損失による水位降下を加える必要がある。今回掘削した揚水井の井戸損失は13～45%の間にある。入念な洗浄によって損失はもっと小さくなると思われるので、これを20%と見積れば井戸内における実際の水位降下は次頁の表のようになる。

年 月	地下水位 標高(m)	地面下 水位(m)	予測水位 降下(m)	井戸損失(m)	全水位 降下量(m)
1986.6	-1~-6	6~11	39~34	8~7	47~41
1986.9 1986.12 }	-2~-5	7~10	39~34	8~7	47~41

この値は中国側の許容限度内にある。

次に新規の地下水開発による地下水位降下の予測を1985年12月と1986年6月の現況水位との差分の形で示すと、水位降下は当然のことながら開発地区を中心とした概略同心形を示している。最大の降下量は、12月に農業用地下水の取水がなく地下水位が全般に高くなる関係で、開発地域東部で37mと予測されるが、降下域の広がりには農業用地下水の利

用が盛んになる6月の方が大きくなっている。この水位降下の影響は、既設井戸の構造や揚水ポンプの種類や規模によって現れ方が異なる。

6.1.2 地盤沈下

地下水位の低下に伴う地盤沈下は、よく知られているように、種々の被害を発生させる。周辺地域に比べて相対的に標高の低い地域の発生と拡大によって、排水不良、浸水被害が増大する。これは湿田化や農作地の水没、河川（運河）水の逆流などを引き起こす。また道路や堤防など公共施設に被害が発生する。集落にあっては、建物の基礎や井戸の抜け上がりなどを社会的損失を招く。

日本の地盤沈下地域での観測記録や解析を参照する限りでは、巨視的に見た場合、開発地区において新規に $137,000\text{m}^3/\text{日}$ （ $5000\text{万m}^3/\text{年}$ ）の地下水を開発した場合、現況水位から最大 37m の水位降下があり、累計の地盤沈下は最大で 40cm という予測は、妥当な値であろうと考えられる。

天津市街区では深度 $60\text{m}\sim 200\text{m}$ 区間の第Ⅱ帯水層が主たる帯水層となっており、圧密収縮はこの帯水層に挟まれる粘性土で発生しているとされている。その沈下の形状は、ほぼ第Ⅱ帯水層の水位降下分布（最大海面下 60m ）で決っており、1959年から1982年までの累積沈下量は最大で 2m に達している。揚水量の集計値が明らかでないので、本調査地域と比較することはできないが、上記の形状から地層はほぼ水平であること、調査地域に比べ、第四紀における海侵の度合いが強く、圧密収縮が発生するような粘性土の割合が大きいことなどから地下水位降下量に対する地盤沈下量は当地域より大きな値となることは十分考えられる。

日本における地盤沈下対策は、国の段階では、1956年に制定された「工業用水法」、1962年に制定された「建築用地下水の採取の規制に関する法律」（略してビル用水法）がある。両法には適用される地域（都道府県単位）が指定されており、前者が10都道府県、後者が4都道府県となっている。また地方自治体でもそれぞれ地下水採取規制に関する条例や要綱を定めている。各地域ではこれらの法律や条例に従い採取量の削減が図られ、地盤沈下などの障害の進行の緩和に役立ってきた。

しかし、これらの規制は、1) 地域や規制の対象となる用途が限定されていること 2) 障害が発生する前の予防策とはなっていないこと 3) 代替水源の確保などの対策と必ず

しも一体となっていないことなどの問題点が指摘されている。

当地域の場合、地盤沈下をある程度許容しても地下水開発を進めるのであれば、予測される地盤沈下地域では、将来どのように土地利用が進められるのか方針を事前に決めておく必要がある。また水質の良い地下水を上水源として優先的に利用するのであれば、影響を受ける農業用井戸を表流水に転換することもある程度考えられるべきであろう。

6.1.3 地下水の塩水化

一般に地下水の塩水化と呼ばれる現象の塩の起源には三種類がある。それは 1) 海水の侵入 2) 化石塩水の侵入 3) 人工的汚染水の侵入である。一般に塩水化と呼ばれているものは 1) を指しており、臨海部における地下水の過剰採取によって海水が内陸側に侵入し、飲用不適、工業用水の水質悪化、農作物への被害が生じる。日本の海岸平野では、程度の差はあれ、多くの所で塩水化は発生している。当調査地域では第Ⅰ難透水層と第Ⅰ帯水層に弱い塩水が認められ、前者の塩素(Cl)濃度は最高1800ppm、後者は1500ppm程度である。海水のCl⁻濃度は19,000ppmであるから、海水の1/10ほどの塩分を含んでいる。ちなみに世界の水道水の水質基準ではClは200~300ppmである。

この塩分は今回調査の結果、現在の海水の侵入によるものではなく、化石塩水であると考えられる。しかしながら、1) その供給源は無限にある訳ではないこと、2) 浸出しにくい水文地質構造があること、3) 第Ⅱ帯水層に漏水する場合にも、第Ⅱ難透水層と帯水層に頻互層で挟まれる難透水層を通過するため塩素イオンが吸着されることは第Ⅱ帯水層へ塩水が侵入することを遅滞させる要因となる。一方、1981年夏ころから1984年に第Ⅱ帯水層の地下水位が寧河県に於て1980年以前の水位に比べ最高18m(地面下24m)降下した時には、第Ⅰ帯水層から第Ⅱ帯水層へ漏水があったと思われるが、第Ⅱ帯水層から揚水する井戸が塩水化し使用不能になったという報告例は無い。このことは、上記の推察を支持する事象であろう。

しかしながら、地下水頭差によって生ずる漏水に伴う化石塩水の浸透や拡散の問題を濃度分布と時間の関係で解く手法はまだ開発されていない。したがって当地域の地下水の塩水化について厳密な答を準備できる段階ではないので、楽観的に考えることは慎まなければならない。

6.1.4 地下水の人工涵養

地下水の人工涵養は地下に浸透する地表水の量を人工的に増加させ、また直接地下に注入することによって地下水を有効に利用することがねらいである。その方法は大きく拡水法と井戸注入法に別れる。拡水法は浸透池、河床、水田、地下埋管などを利用して地表（または地表近く）から地下水涵養を促進する方法である。井戸注入法は地下に掘り込んだ井戸から直接水を注入する方法である。

当調査地域は、地表から深さ10～45mまで透水性の低い粘性土層（第Ⅰ難透水層）が堆積し、その下位に主として細砂からなる第Ⅰ帯水層がある。またタンクモデルによるシミュレーションでは地表からの垂直涵養（降水や灌漑水による）は平水年で日平均0.1mmと極めて小さい。さらに第Ⅰ帯水層の地下水位は地面下1～3mと浅く、被圧状態にある。

以上の条件から考えると、拡水法による地下水の人工涵養に適した水文地質条件とはいえない。ただ調査地域の中央から南部にかけて、浅層の粘性土は最大1500～1800ppmのCl（塩素）を含んでおり、第Ⅰ帯水層の水質改善を計る目的で粘性土中の塩分の濾過・洗い出しを促進するため、トレンチや運河を開削して地表水を流すことは効果があると思われる。現在既に地域内に縦横に開削されている運河はこの点で大きな働きをしていると考えられる。

日本では注入井戸による地下水涵養実験が各地で試行錯誤的に行われてきた。この結果は、いずれの場合にもストレーナーの目詰まりが程度の差こそあれ発生し、比注入量（注入量/注入井内水位上昇量）は指数関数的に減少している。目詰まりの原因は主として水質に関係し、空気泡、酸化鉄、懸濁物質（SS）、微生物などが考えられている。

当調査地域では實際上注入水として河川（運河）水が考えられるが、この水質と帯水層が細砂を主体とすることを考慮すれば、目詰まりの防止は極めて困難であると予想される。したがって当地域での井戸注入法による人工涵養は効果が大きいとは思われない。

6.2 モニタリング体制

前節で述べたように、地下水を開発することによって種々の影響が引き起こされる可能性がある。このため地下水の開発前と開発後における地下水の動態と関連する分野の

変化は注意深く監視されなければならない。

まず地下水を揚水することによって、自然的、社会的、経済的に好ましからざる影響を発生させないように、地域ごとの環境基準を作ることが求められる。その後地下水資源を持続的に活用するために、その基準の許容する範囲内で地下水が利用されているかどうかを監視する機構（モニタリングシステム）が設置されなければならない。

このためには、経済的にも費用がかかり、技術的にも難しい面があり、関係機関や行政側及び地元の深い理解が不可欠である。

また地域全体を統一して管理できる体制を作るためには、地下水資源の利用が、できるだけ私権の範囲外にあることが望ましい。この点中国の法律制度では地下水資源に限らず、地下に存在する資源は国有となっており、統一して管理できる体制ができている。

調査地域は、これから開発しようとする段階にあるから、モニタリングシステムの設立は、

I) 現況のより正確な把握

- 地下水利用量の実態
- 井戸の現況調査
- 地下水位観測網の充実
- 第 I 帯水層の残留塩水域の把握
- 地下水開発前の水準測量網の設定
- 表流河川水、運河水量の把握

II) 環境基準の作成

III) 監視機構の設置

- 定期的な水準測量
- 地盤沈下観測井の設置
- 一定基準以上の井戸の揚水量の集計
- 電気伝導度の測定

IV) より広域な地下水盆管理への発展

の4つの段階に分けて、進められるべきであろう。

