### 4－1－2　電気探査

電気探査法は、地下水探査の１方法として一般的に用いられている方法であるが、地層中の帯水層と不透水層の比抵抗値にかなり差があるという普遍的事実と、探査の対象の多くが成層構造を有する地層であると言う理由から、一般には比抵抗法が用いられている。

地層の比抵抗値は一般に次の要素で左右される。

1）地層の鉱物組成

2）鉱物の結晶度

3）地層の構成物質の固結度

4）地層の間隙率

5）地層中の水の量と比抵抗値

バンコク周辺地区における平均探査深度２００ｍ迄の地層の鉱物組成と鉱物の結晶度については大差がないと考えられるので、地層の比抵抗値は固結度と間隙率および地層中の水の量と比抵抗値に支配されると考えられよう。

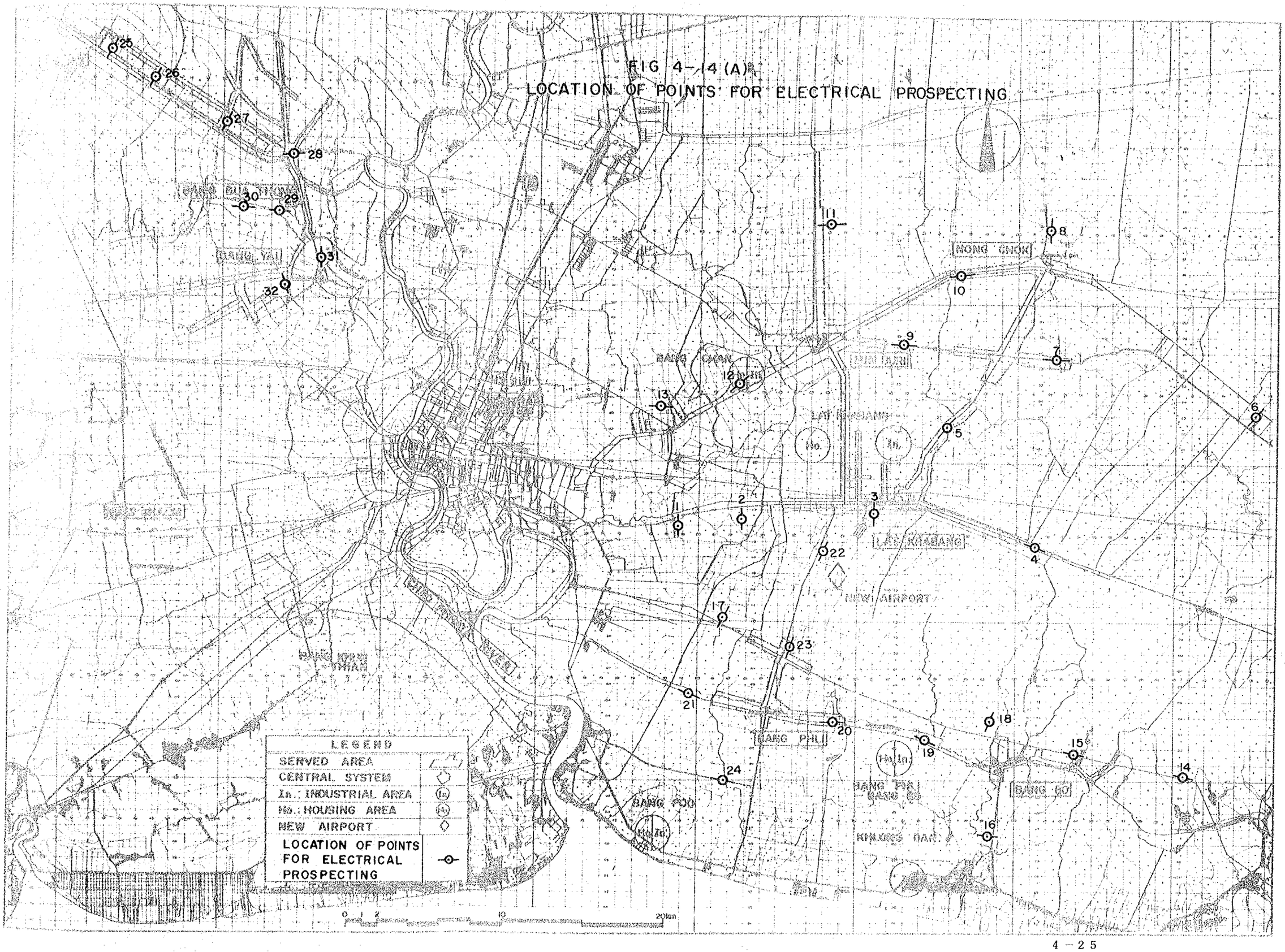
電気探査の測定結果は標準曲線法と直視法で解析される。標準曲線法は実測された見掛比抵抗値から地層の比抵抗値を求めるために用いられる方法である。この方法で得られた地層の境界は個別の帯水層の境界と異り、地層のもつ電気的性質の区別によって決定される。一方、各地層の深度分布を求めるためには、直視法によって上昇カーブの場合を砂礫、下降カーブの場合を粘土層としてその境界が設定される。

バンコク周辺地区で実施された電気探査の測定位置は図４－１４に示す通りであり、その結果は、標準曲線法によって図４－１５のような比抵抗柱状図として表現される。バンコク周辺地区の地層の深度２００ｍ迄の電気的性質による区別の特徴は、上部層が低い層比抵抗値をもち、下部層が高いという傾向をもつことである。その境界は深度５０ｍ付近に表われる場合と１００ｍ前後に表われる場合がある。５０ｍ付近の境界はバンコク帯水層とパパデン帯水層間の境界を示し、１００ｍのものはパパデン帯水層とナコンラング帯水層の境界を示すものであろう。深度１００ｍ～２００ｍ迄の層比抵抗値の分布は図４－１４のようになっており、Chao Phraya河右岸、左岸とも北部地区の比抵抗値は低い。

さらに左岸地区の南部海岸部地帯の値も低いという結果が得られた。

比較的高い層比抵抗値をもつ地域はSai Noi からBang Yai にかけての地域とBang Phli からBang Bo にかけての国道３４号線に沿った地域であった。

FIG 4-14 (A)
LOCATION OF POINTS FOR ELECTRICAL PROSPECTING



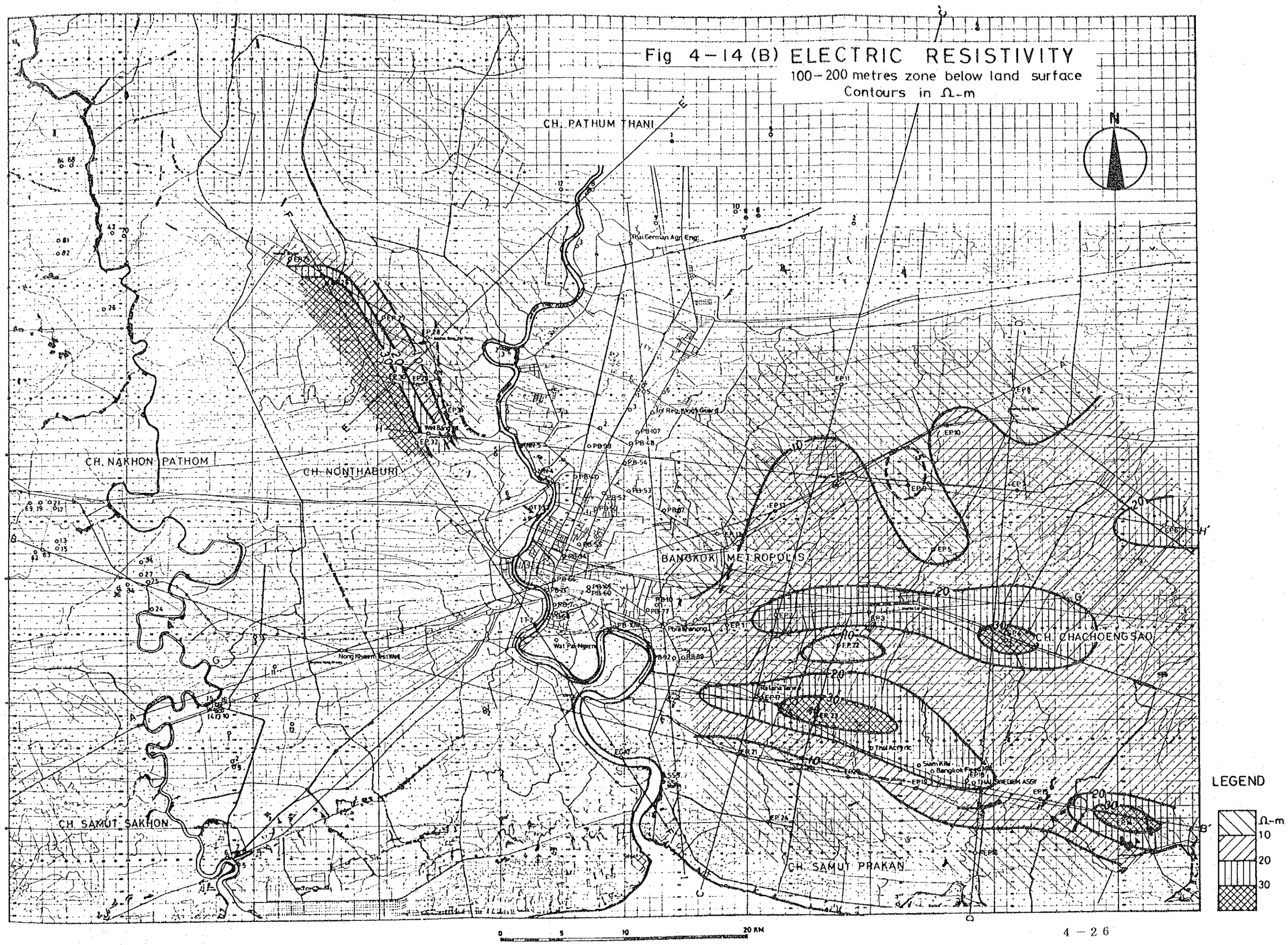
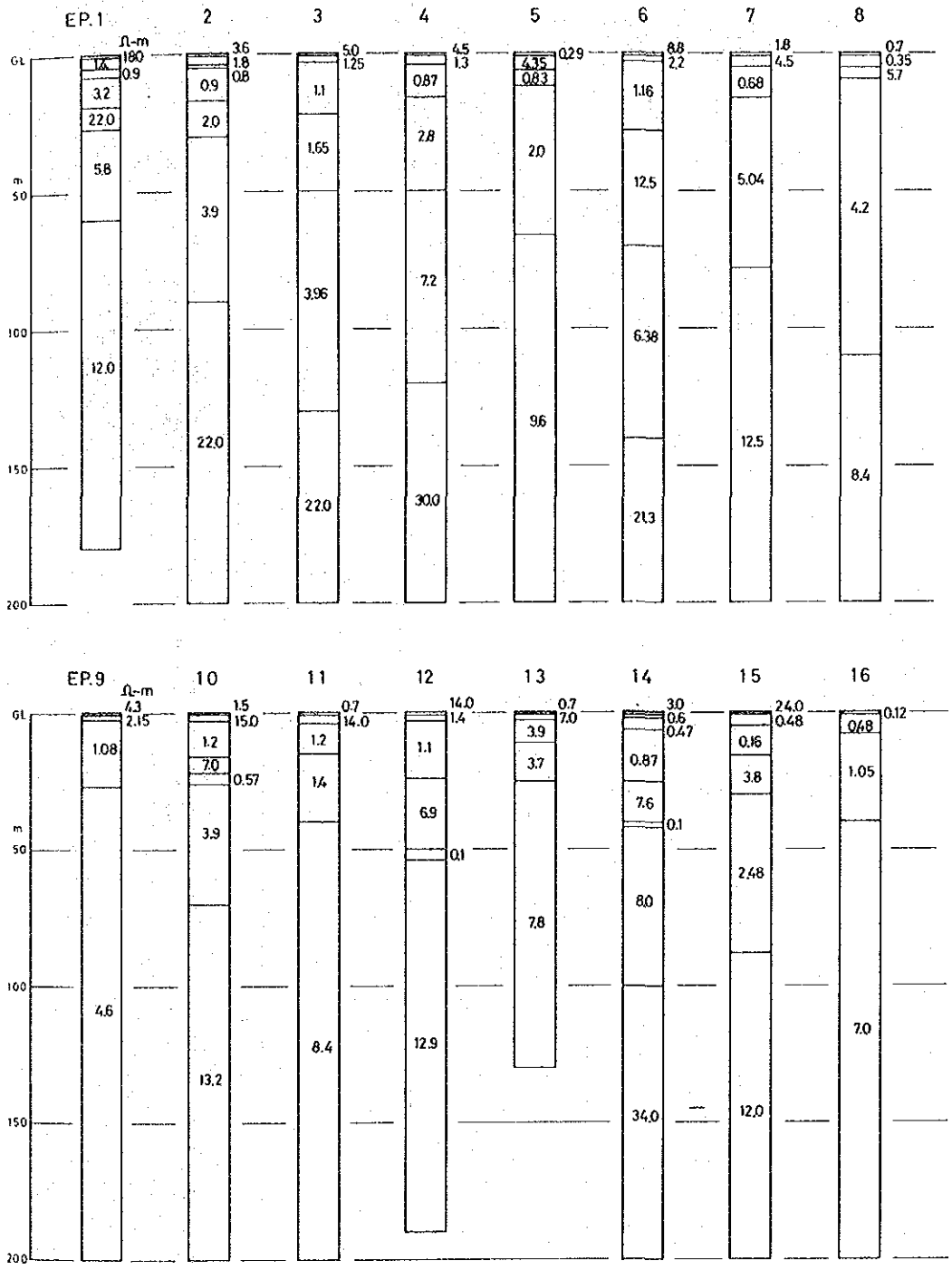
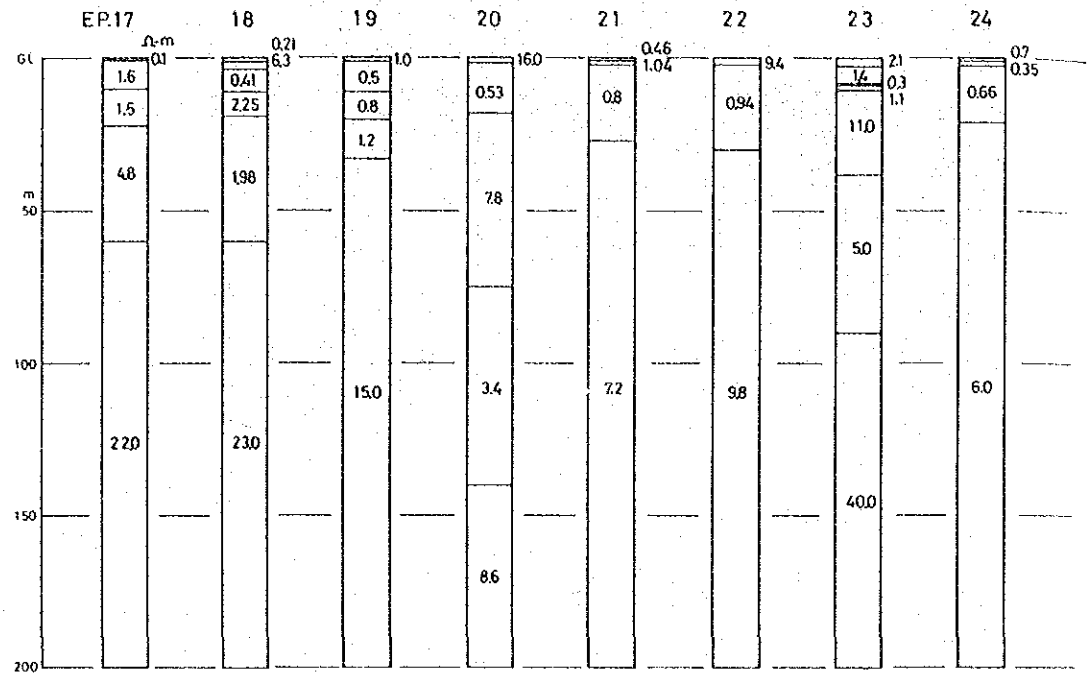


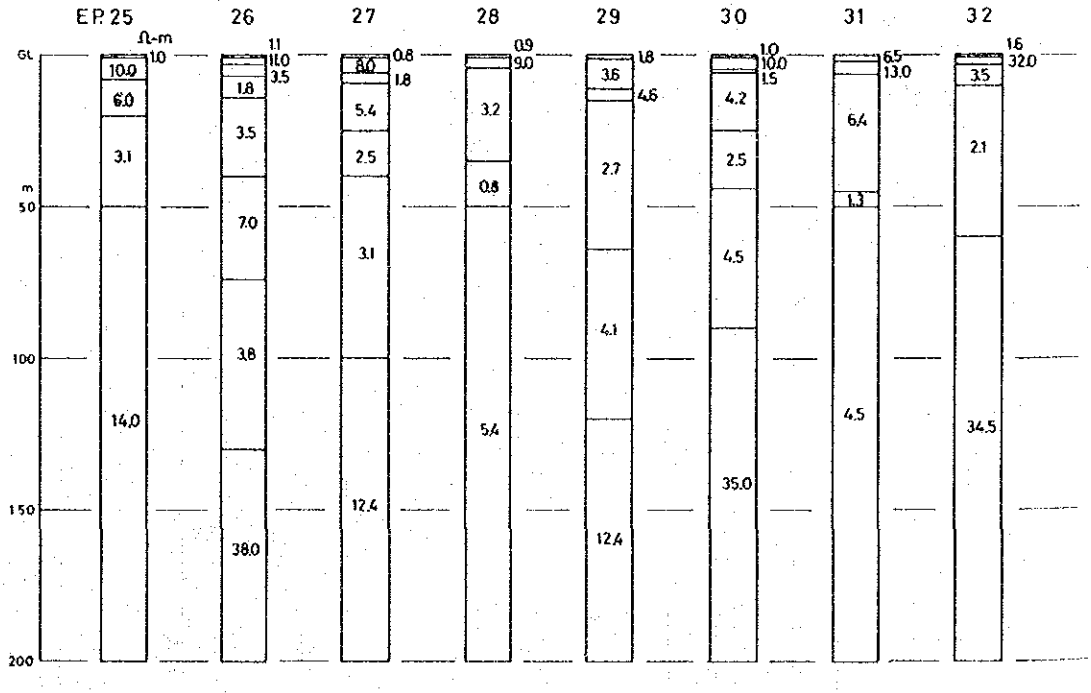
Fig 4-14 (B) ELECTRIC RESISTIVITY
100-200 metres zone below land surface
Contours in Ω-m
N
CH. PATHUM THANI
CH. NAKHON PATHOM
CH. NONTHABURI
BANGKOK METROPOLIS
CH. CHACHOENGSAO
CH. SAMUT SAKHON
CH. SAMUT PRAKAN
LEGEND
Ω-m
10
20
30
0 5 10 20 KM

Fig 4-15 COLUMNS OF ELECTRIC LOG - 1
after ρ-a curves



COLUMNS OF ELECTRIC LOG — 2
after ρ-a curves



地下水の比導電率や比抵抗値は溶存イオンの量に支配され、水質的に良ければ比導電率は低く、比抵抗値は高い。（図４－１６，１７，１８）

従って、比抵抗値が高い地域の地下水は質、量ともすぐれていると考えられよう。層比抵抗値の低い地域にあっては充分に安全をみた取水計画を行わなければならないし、かつまた深度においても高い層比抵抗値を示す部分から採水するよう計画しなければならない。

既存のボーリング資料の欠如している所では、電気探査結果を用いて地質分布を推定しなければならない。このため直視法による解析を試みることとした。図４－１９はこの直視法によって得られた地層区分である。この地層区分は見掛比抵抗値の変化から推定するものであるから、必ず、附近の既存ボーリングデータとの対比を行って実施しなければならない。本調査地域の場合、良い対比をみせたので、直視法を採用した。

しかしながら、あくまでも地表で実施した試験であるので、この結果は一応目安として利用し、実施設計時には必ず試験ボーリングを行い、正確な層相、層厚を求めなければならないであろう。

Fig. 4-16 RELATIONSHIP OF ELECTRIC CONDUCTIVITY AND $Cl^{-1}$ CONTENTS OF GROUND WATER IN BANGKOK

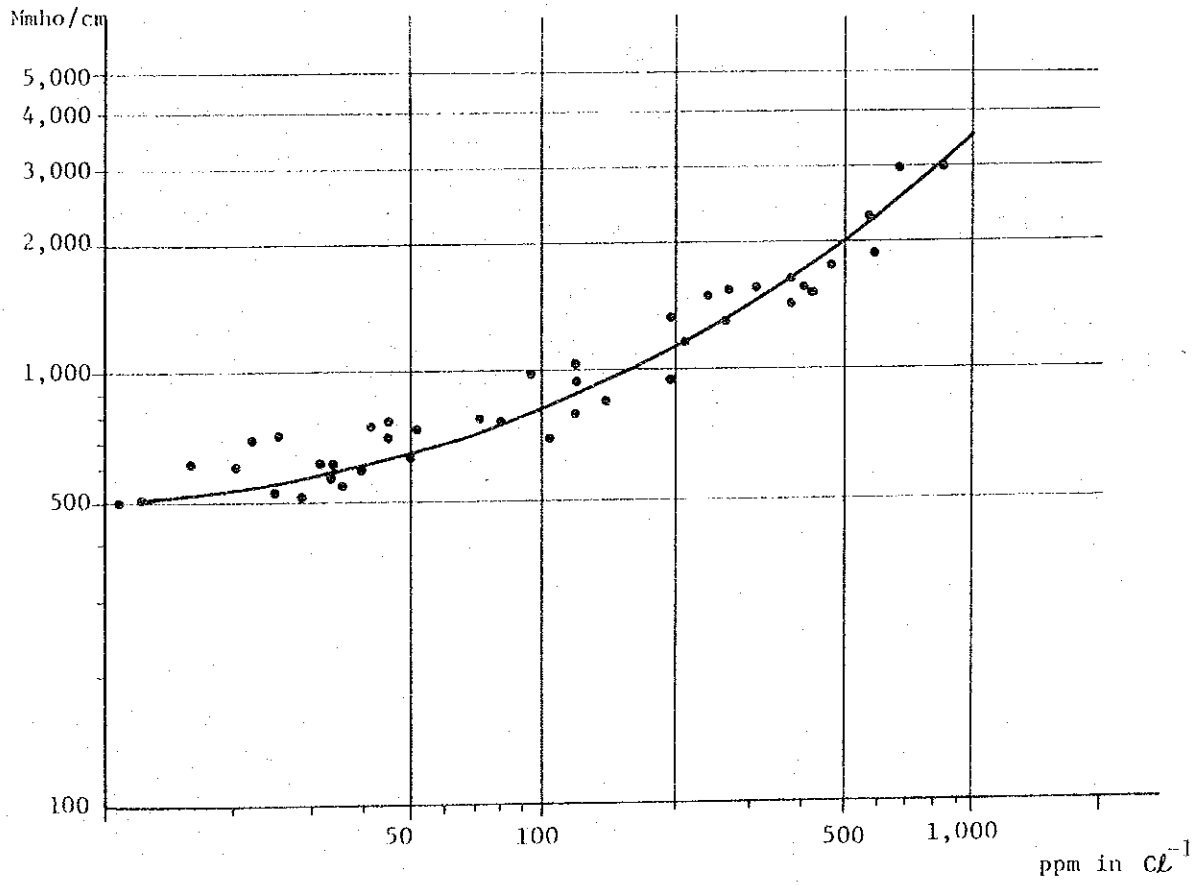


Fig. 4-17 RELATIONSHIP OF ELECTRIC CONDUCTIVITY AND EVAPORATION RESIDUE IN GROUND WATER IN BANGKOK

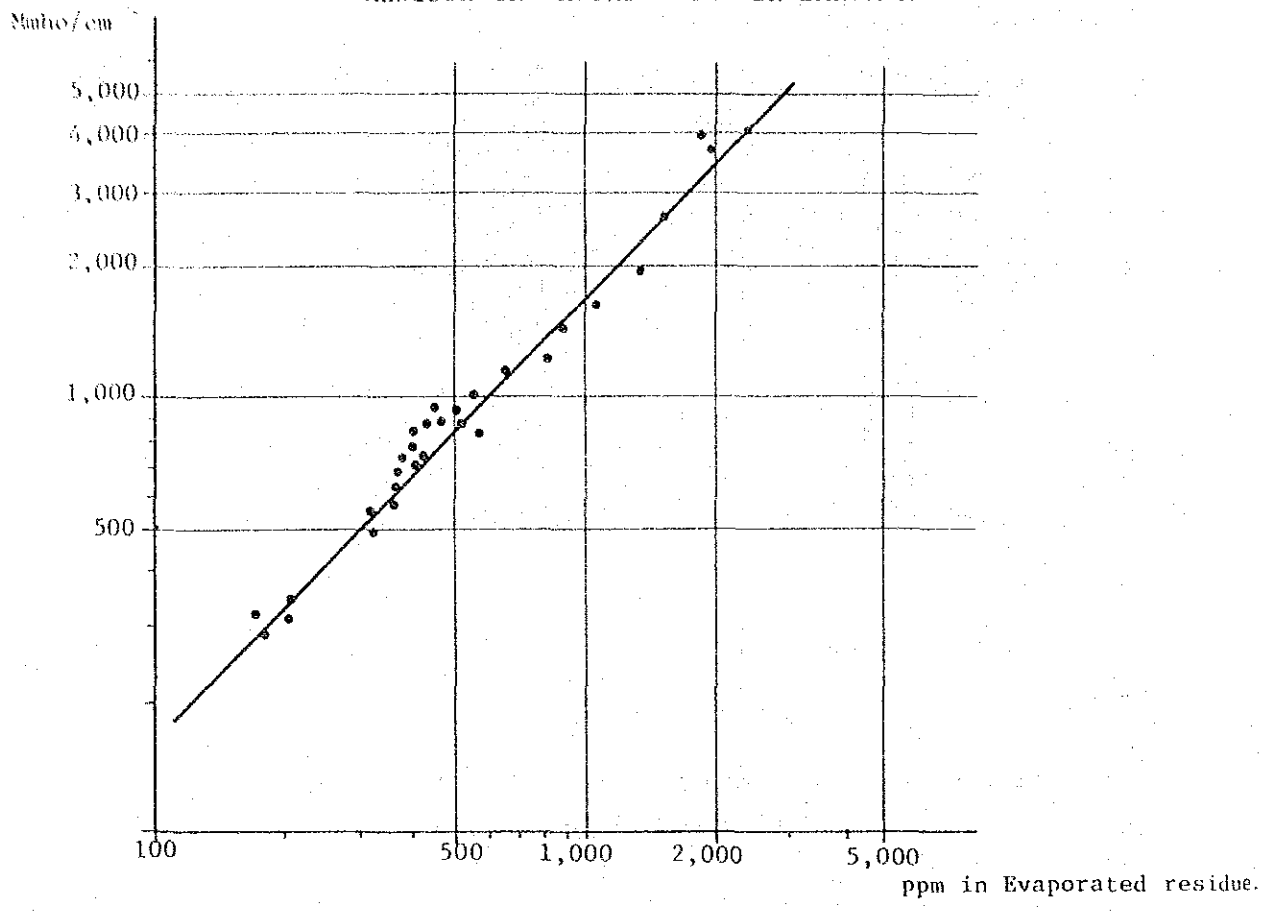



Fig. 4-18 RELATIONSHIP OF ELECTRIC CONDUCTIVITY AND Ca HARDNESS OF GROUND WATER IN BANGKOK

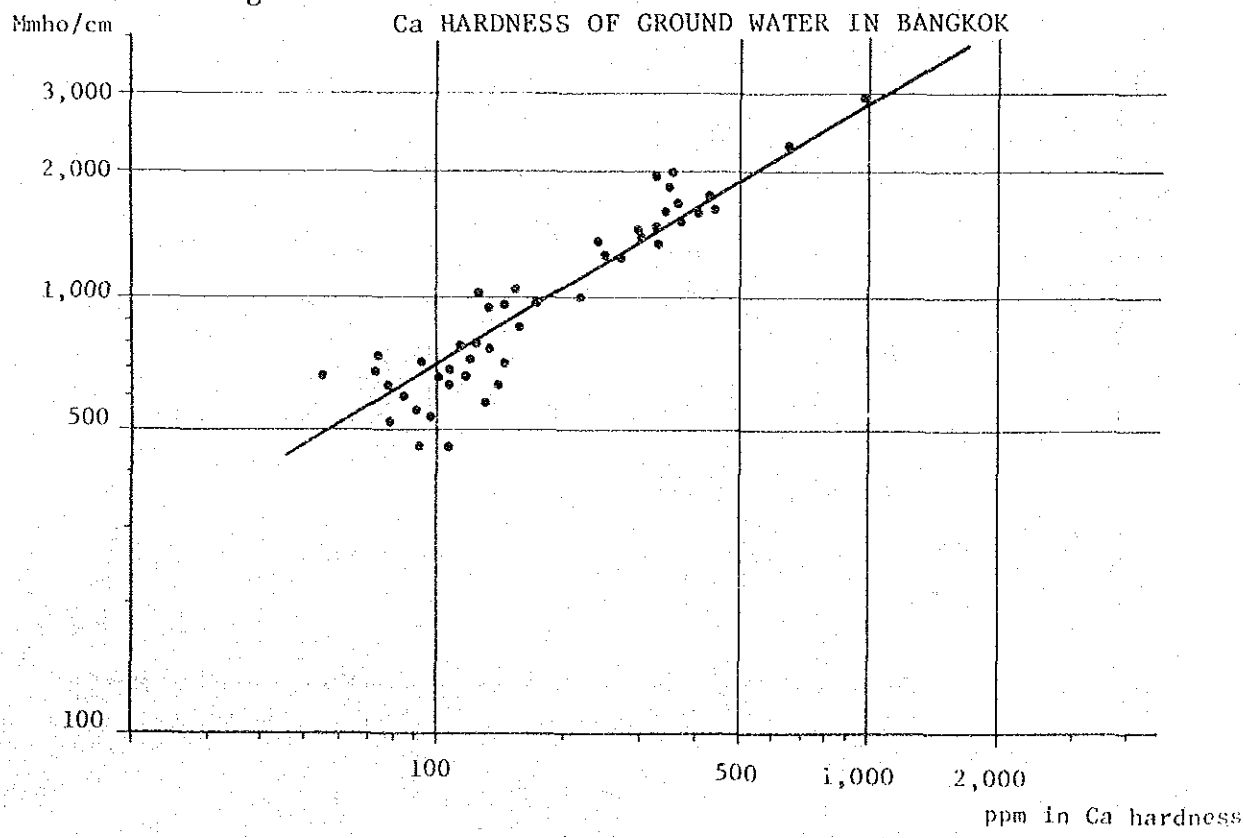
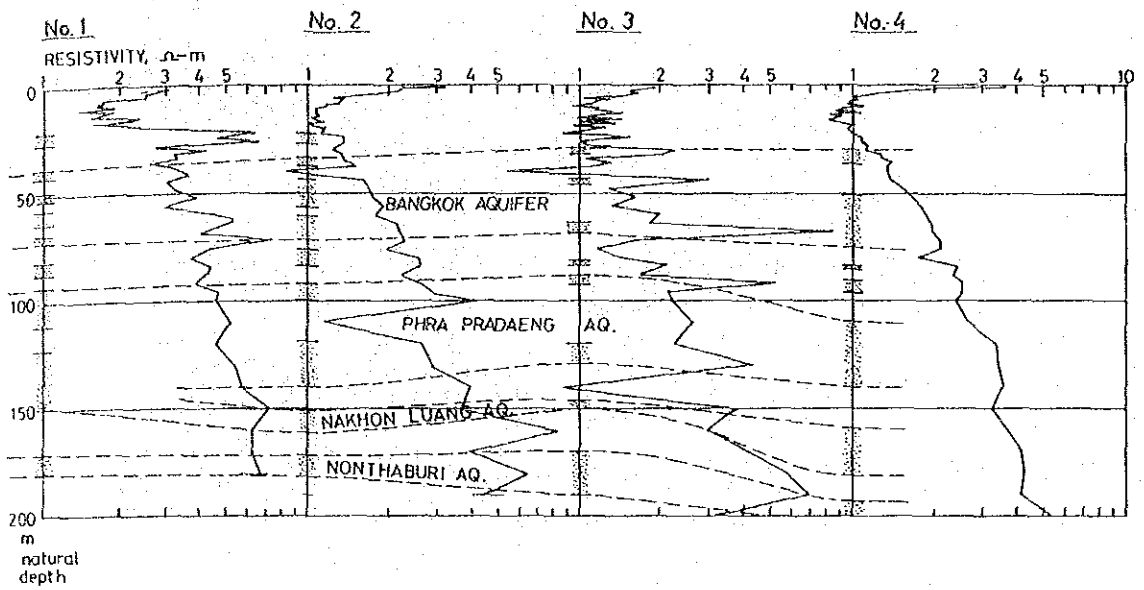
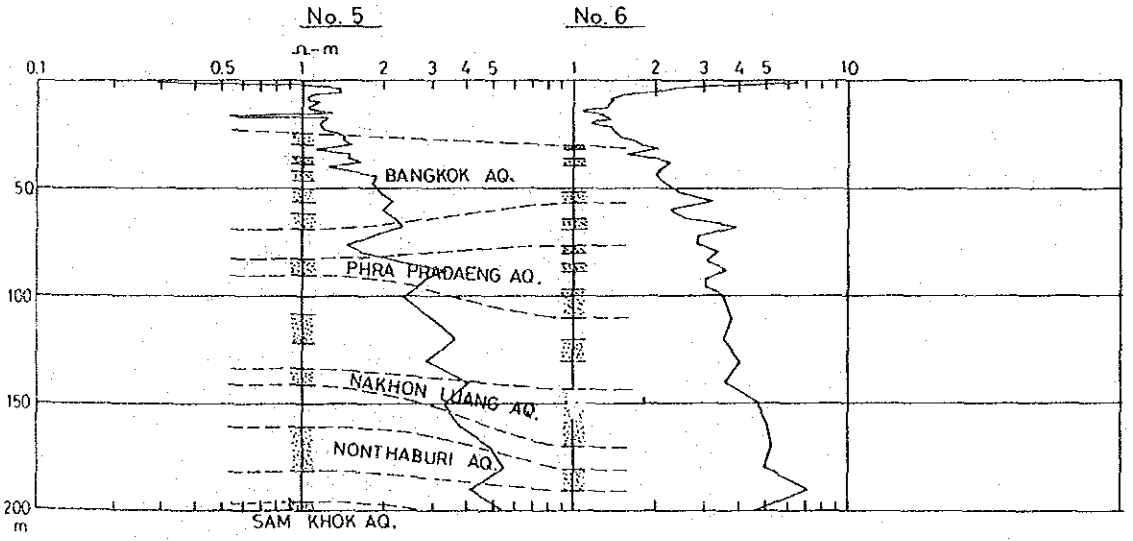
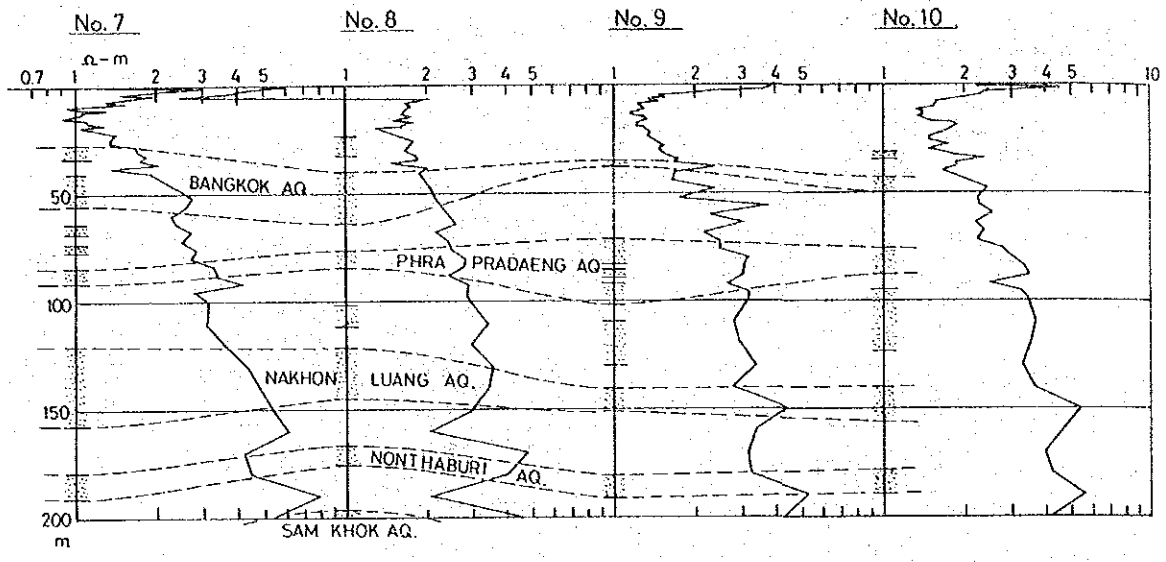
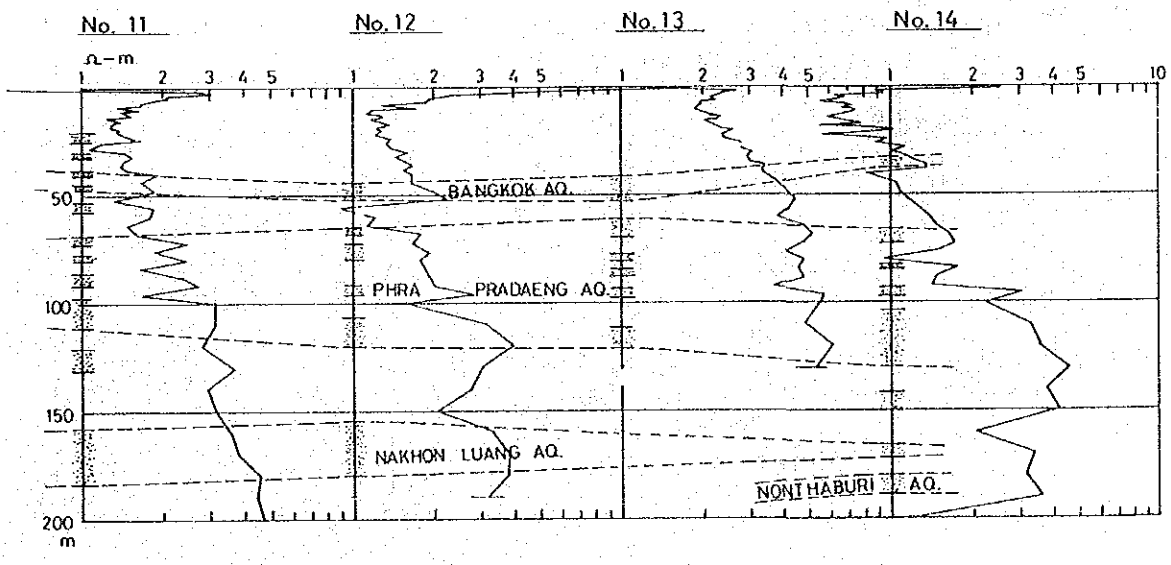


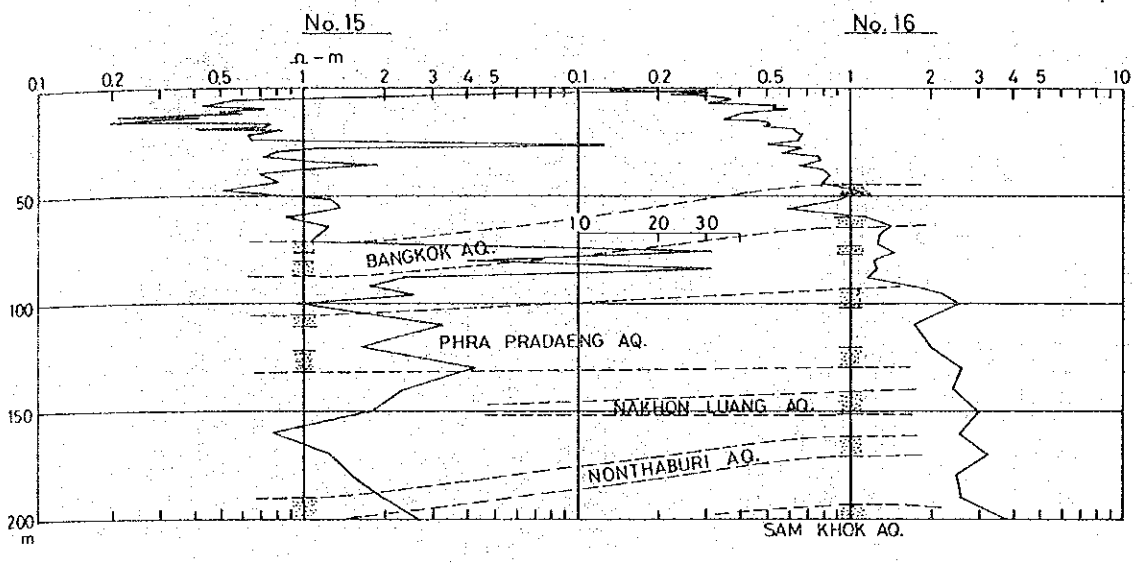
Fig. 4-19 ELECTRIC LOG $\rho$ - NATURAL DEPTH

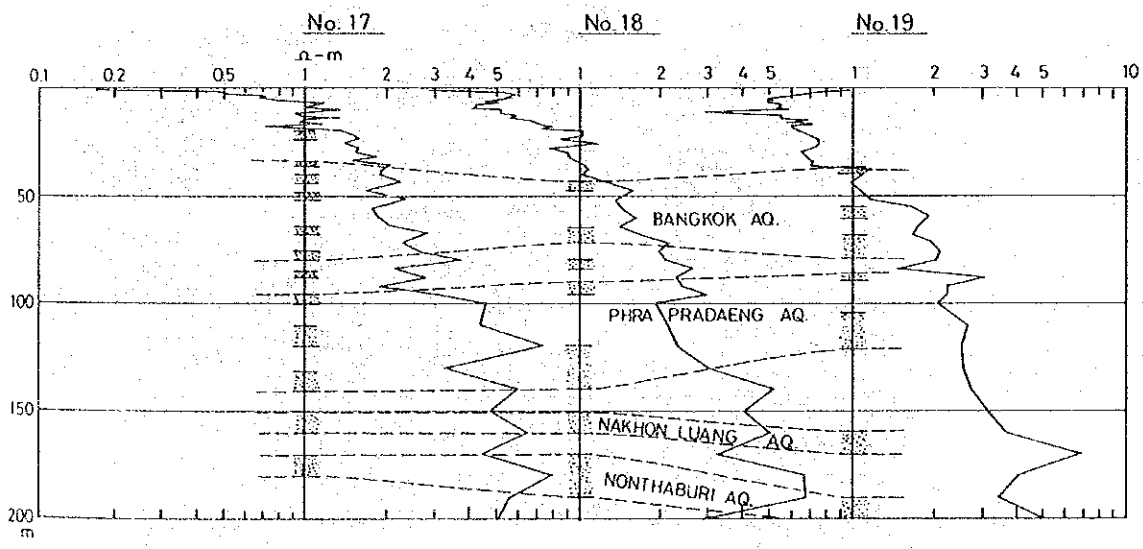


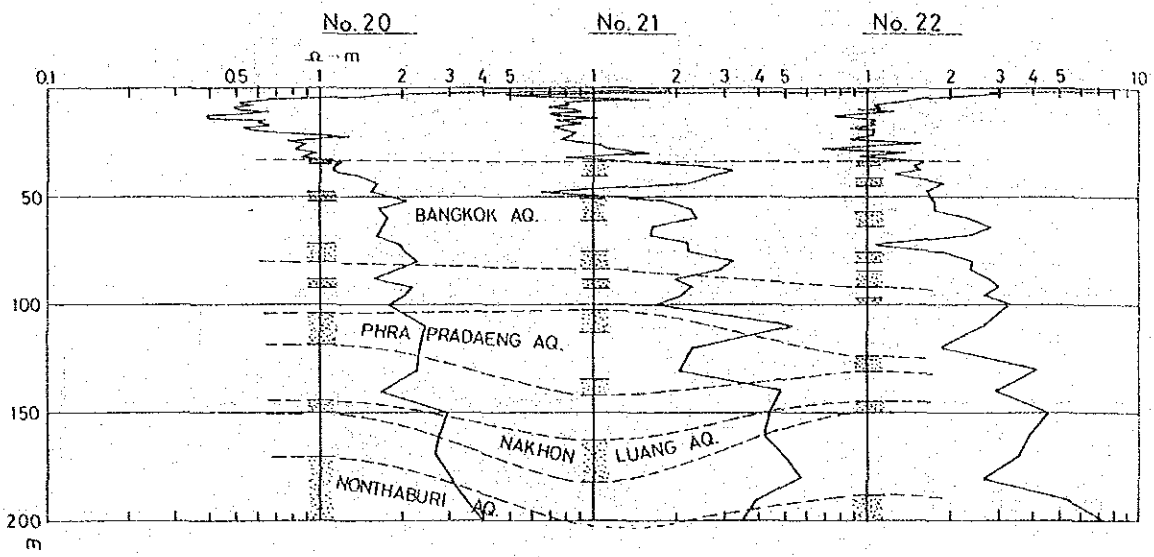



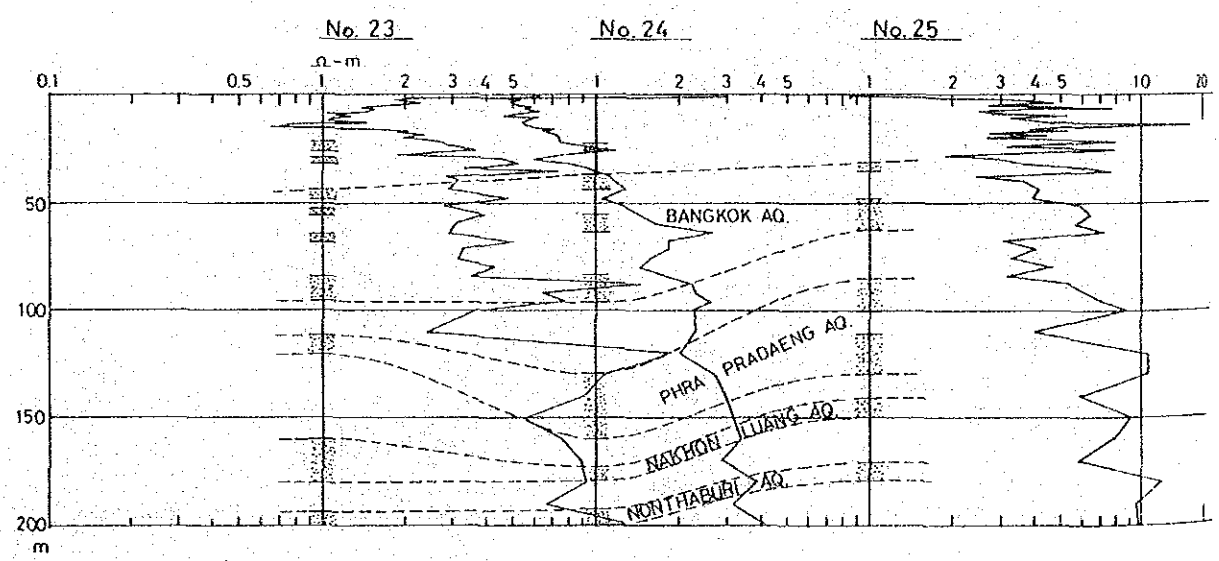

No. 7
No. 8
No. 9
No. 10
Ω-m
0.7
BANGKOK AQ.
PHRA PRADAENG AQ.
NAKHON LUANG AQ.
NONTHABURI AQ.
SAM KHOK AQ.
50
100
150
200
m

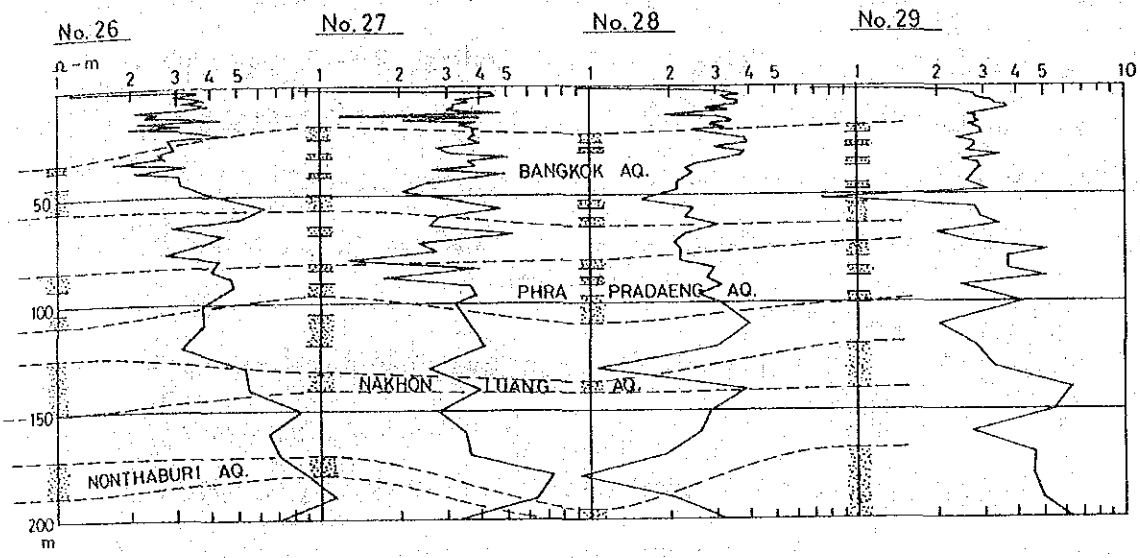

No. 11
No. 12
No. 13
No. 14
Ω-m
BANGKOK AQ.
PHRA PRADAENG AQ.
NAKHON LUANG AQ.
NONTHABURI AQ.
50
100
150
200
m

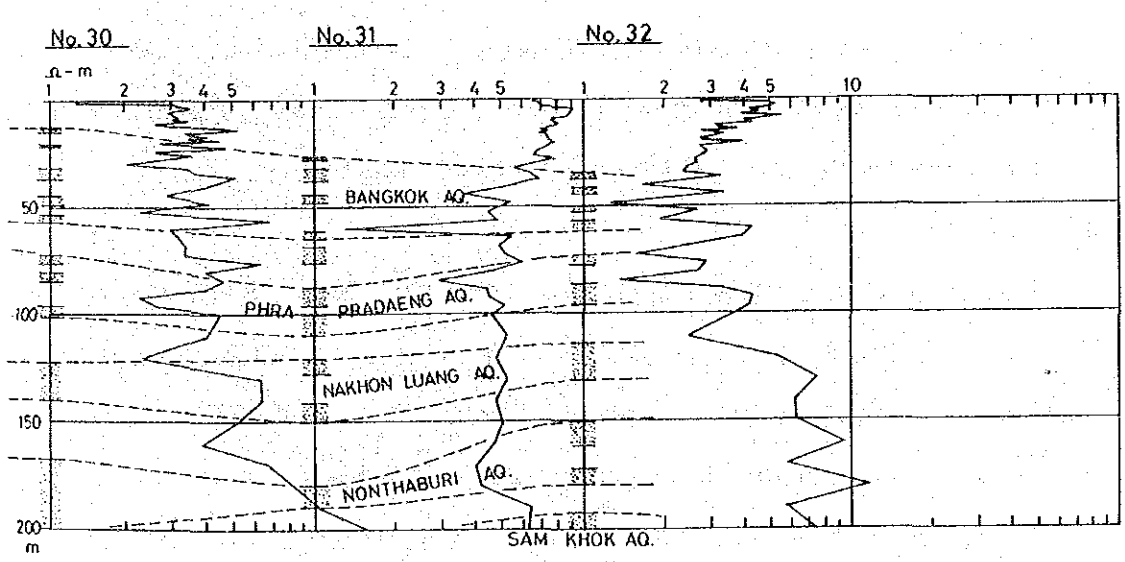

No. 15
No. 16
Ω-m
0.1 0.2 0.5 1 2 3 4 5 0.1 0.2 0.5 1 2 3 4 5 10
50
100
150
200
m
10 20 30
BANGKOK AQ.
PHRA PRADAENG AQ.
NAKHON LUANG AQ.
NONTHABURI AQ.
SAM KHOK AQ.


No. 17
No. 18
No. 19
Ω-m
0.1 0.2 0.5 1 2 3 4 5 1 2 3 4 5 1 2 3 4 5 10
50
100
150
200
m
BANGKOK AQ.
PHRA PRADAENG AQ.
NAKHON LUANG AQ.
NONTHABURI AQ.


No. 20
No. 21
No. 22
Ω-m
0.1
0.5
1
2
3
4
5
10
50
100
150
200
m
BANGKOK AQ.
PHRA PRADAENG AQ.
NAKHON LUANG AQ.
NONTHABURI AQ.


No. 23
No. 24
No. 25
Ω-m
0.1
0.5
1
2
3
4
5
10
20
50
100
150
200
m
BANGKOK AQ.
PHRA PRADAENG AQ.
NAKHON LUANG AQ.
NONTHABURI AQ.


No. 26
No. 27
No. 28
No. 29
Ω-m
BANGKOK AQ.
PHRA PRADAENG AQ.
NAKHON LUANG AQ.
NONTHABURI AQ.
m


No. 30
No. 31
No. 32
Ω-m
BANGKOK AQ.
PHRA PRADAENG AQ.
NAKHON LUANG AQ.
NONTHABURI AQ.
SAM KHOK AQ.
m

### 4－1－3　地下水の利用状況

周辺地区の地下水の利用状況と地下水位の変動状況について述べることとする。一般に本プロジェクトが行われる地域での現在の地下水利用量は少い。現在利用されているものは生活用水としてBang Yai，Nong Khaem，Nong Chok，Min Buri，Lat Krabang，Bang Phli，Bang Boの水道水源として利用されている。一方工業用水としては、Bang Chan，Bang Phli からBang Bo 間の工業地帯で利用されている。地下水位はバンコク首都圏の近傍において年々、徐々に低下している。

(1)　Chao Phraya River 右岸地区

1)　Sai Noi

現在では地下水は利用されていない。水道水源としての深井戸は過去にあり、約7年間使用していたが約10年前に放棄している。揚水量は20～30㎥/day であった。放棄の理由は、濁度の増加と塩分の混入によるものであった。その後、深井戸による給水は行われていない。

2)　Bang Bua Thong

現在、表流水を水源とした2,000㎥/dayの水道があるが、深井戸を水源としたものはない。最近Klongの水質が悪くなってきたので、深井戸による地下水利用を考慮しているようである。地下水は利用されていないが地下水位は現在地表面下10～15m程度にあり、1958～1959年当時の地下水位を約5m程度とすると、現在迄に5～10m地下水位が低下している。

3)　Bang Yai

現在、水道水源として深度162m の深井戸があり、水質水量ともに良いとされている。取水量は約800㎥/dayである。この地域での現在の地下水位とその変動状況はBang Bua Thong と同様であると考えられる。

4)　Nong Khaem

水道水源として深井戸が1井存在している。深井戸は深度80m、口径250㎜である。取水量は約450㎥/day程度である。地下水の水質はCℓイオンが250～300ppm、Feイオンが2～3ppmと良くない。地盤沈下による井戸の抜上りが約5㎝あった。

その他、海軍の施設に1井と、民間で使用されているものが3井程度存在するが、

いずれも水質については悪く、Cℓイオン濃度にして５００ppm以上の値をもつといわれている。地下水位の変動はあまりなく現在の水位は地表面下５ｍ程度と推定されよう。

(2) Chao Phraya River 左岸地区

1) Nong Chok

Districtに所属している深井戸は、口径５０㎜、深度１５０ｍの井戸が４井存在し、エアリフトポンプにて揚水している。取水量は約４３０㎥/日である。当地域の地下水位は明確ではないが、地表面からほぼ－５ｍ～－８ｍ程度であろう。

2) Min Buri

水道水源として深井戸が２井存在する。口径は２００㎜で深度は１６０ｍであり、取水能力は両者合計して3,７００㎥/day である。深井戸設置位置において地盤沈下による井戸の抜上り現象がみられ、その値は３０㎝～４０㎝であった。

水道水源以外にはBang Chan Industrial Estate に所属する深井戸が２井存在する。深井戸の口径は３００㎜で、深度は２００ｍである。給水量は現在平均約2,０００㎥/day と推定される。地下水位は、現在、地表面下２０ｍ程度であり、年々１ｍ程度低下しているとのことである。

3) Lat Krabang

現在の水道水源は深井戸を３井持っており、その他、工科大学が２井を所有している。取水量は約3,０００㎥/dayである。地盤沈下により１０㎝の井戸の抜上りがみられる。

4) Bang Phli

口径１５０㎜、深度１３４ｍの深井戸が水道水源として存在しており、取水量は７２０㎥/day である。

地下水位は、地表面下２２ｍ程度にあると推定される。

5) Bang Bo

水道水源として、口径１５０㎜、深度１６０ｍの深井戸が２井存在し、日量７８０㎥/day を取水している。

国道沿線の工場群は夫々深井戸を有しており、その詳細は表４－５のようになっており、日量６００㎥/dayを取水していると推定される。

Table 4-5 PRIVATE WELL AT BANG BO

| NAME OF COMPANY | WELL | | QUANTITY OF YIELD |
|---|---|---|---|
| | DIAMETER OF WELL | DEPTH OF WELL | |
| THAI ACRYRIC CO. LTD. | 150 mm<br>150 mm | 160 m<br>130 m | 50 $m^3$/day |
| SIAM KIKI CO. LTD. | 150 mm | 132 m | 250 $m^3$/day |
| BANGKOK FEED MILL CO.LTD. | 150 mm | 118 m | 200 $m^3$/day |
| THAI SWEDISH ASSY. | 100 mm | 135 m | 80 $m^3$/day |

以上の如く、周辺地区の地下水の取水量は生活用水として約9,900㎥／day、工業用水として2,600㎥／day を使用しているにすぎない。これは、Low Central Plain 全体の地下水取水量936,755㎥／day* の約1.3%程度であり、周辺地区のバンコク近傍で生じている地下水位の低下は、本地区での地下水取水が原因でなく、首都圏の大量取水に起因するものと推定されよう。

* Report Groudwater Monitoring Well Construction and Future Program, Table 2－4

### 4－1－4　帯水層係数

帯水層係数を正確に知るためには、観測井を伴った揚水試験を実施し、これを解析して求めなければならない。今回の調査地域 8 Amphoes 中には、実用取水井が存在しているのみであり、揚水試験によって得られた帯水層係数はない。

一方、バンコク市内においてはいくつかの値がある。表4－6は Charoen Piencharoen et al（1976）* のまとめた値であり、また、Vachi Ramnarong（1976）** が Bangkok Aquifer と Nakhon Luang Aquiferについて詳細な試験の結果、Nakhon Luang Aquiferの透水量係数と貯留係数をT＝250,000gpd／ft，Sを $2.2\times10^{-3}$ としている。

* Charoen Piencharoen, and Charoen Chuamthaisong, 1976. Ground Water of Bangkok Metropolis, Thailand, P13, Table 1

** Vachi Ramnarong, 1976, Pumping Test for Nakhon Luang and Bangkok Aquifers, P38

一方、このような揚水試験によるデータのない地域であっても、比湧出量（図4－21）の値は、実用取水井のデータから得ることができる。バンコク市内での揚水試験から得られた透水量係数を用いて単井（口径250㎜）のSpecific capacity の値を求め、これをプロットして、T－Sc の関係を得た。（図4－20）

周辺地区 8 Amphoes の帯水層係数の決定方法については、図4－22のフローのように決定した。

すなわち、既存の井戸資料より、Specific Capacity を求め、Transmissibility との関係から、各 Amphoe 特有のTransmissibilityを求めた。一方、Nakhon Luang 帯水層（バンコク市内に分布する）の透水係数の平均値を得、これと各地区の帯水層厚を乗じて、Transmissibility を近似値として求め、比湧出量から得られた値とを比較した上で、妥当な値を決定した。（表4－7）

貯留係数については得られた透水量係数と仮定した貯留係数より、Specific Capacity を求め、実際の値に一致するようにその値を選定した。（表4－8）

Table 4-6 COEFFICIENT OF AQUIFER

| Aquifer | Location of tested well | Coefficient of Transmissibility ($m^2/hr$) | Permeability (m/hr) | Coefficient of storage |
|---|---|---|---|---|
| Nakhon Luang | Wat Phai Ngoen | 65 | 2.21 | $1.00 \times 10^{-4}$ |
| | Lum Phini Park | 100 | 3.40 | $2.00 \times 10^{-4}$ |
| | Pak Kret | 110 | 2.55 | - |
| | Bang Bua | 125 | 3.45 | $2.2 \times 10^{-3}$ |
| | Dept. of Mineral Resources | 50 | 2.65 | $2.60 \times 10^{-4}$ |

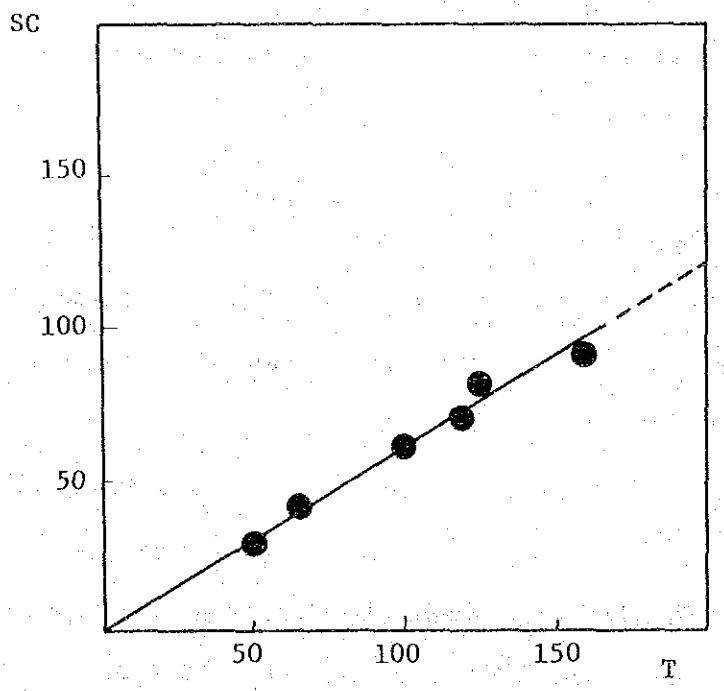



Fig. 4-20 RELATION OF TRANSMISSIBILITY AND SPECIFIC CAPACITY (See Table 4-6)

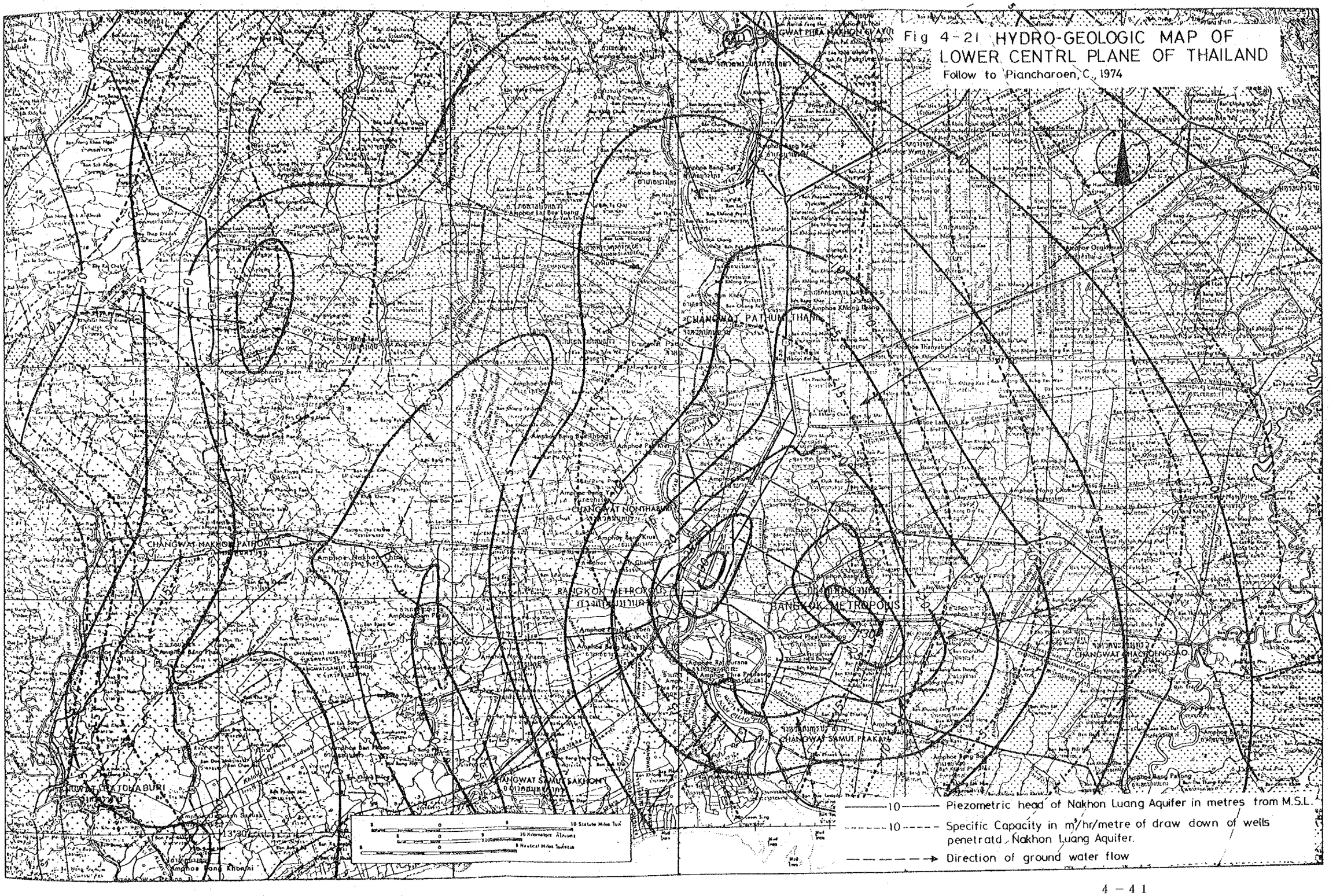



Fig 4-21 HYDRO-GEOLOGIC MAP OF LOWER CENTRL PLANE OF THAILAND

Follow to Piancharoen, C., 1974

Fig. 4-22 COEFFICIENT OF TRANSMISSIBILITY AND STORAGE

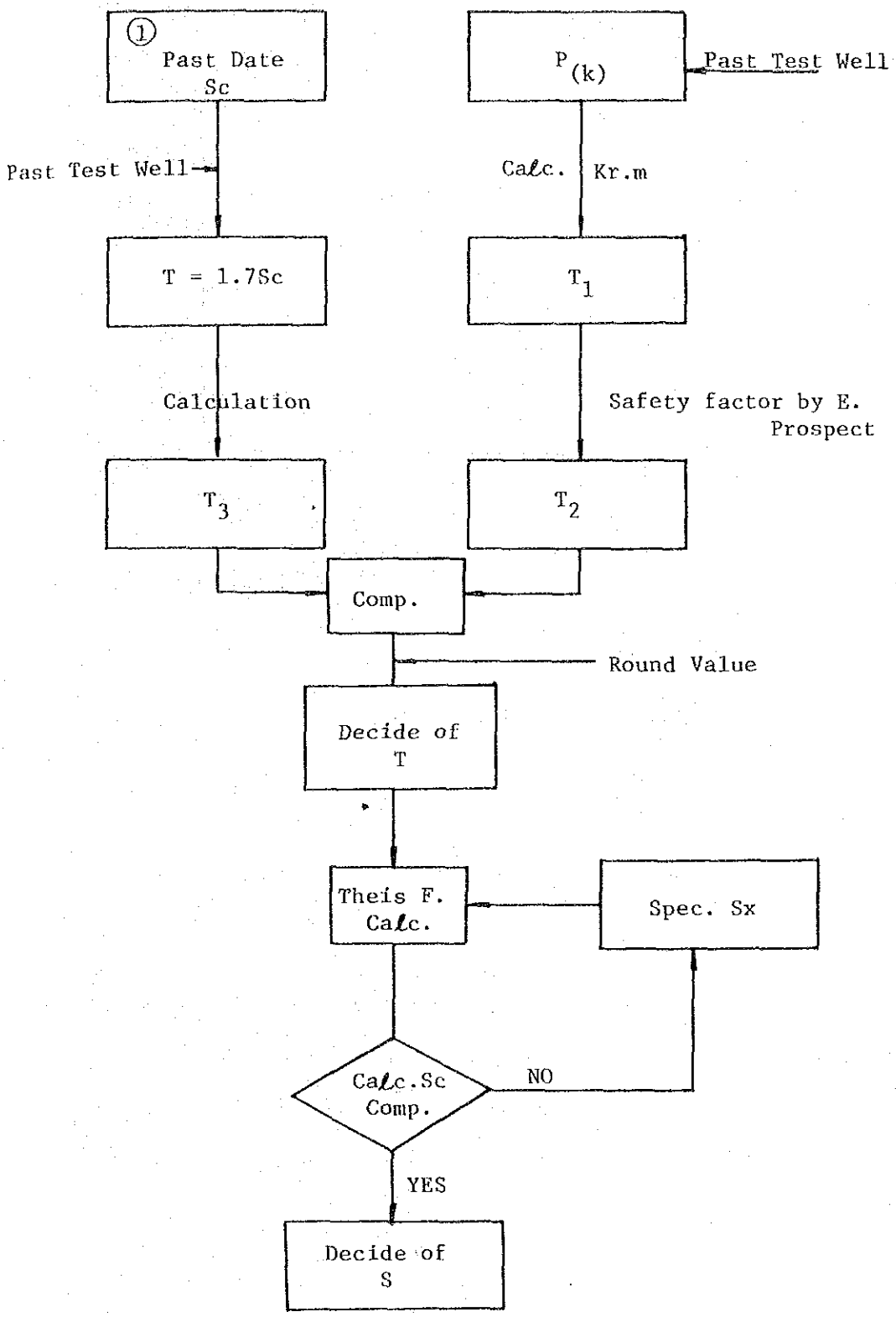


Table 4-7 FINAL VALUE OF TRANSMISSIBILITY

| | |
|---|---|
| Sai Noi | 20 $m^3/hr/m$ |
| Bang Bua Thong | 20 " |
| Bang Yai | 20 " |
| Nong Chok | 10 " |
| Min Buri | 20 " |
| Lat Krabang | 15 " |
| Bang Phli | 15 " |
| Bang Bo | 15 " |

Table 4-8 COEFFICIENT OF STORAGE

| | |
|---|---|
| $T = 10\ m^3/hr/m$ | $S = 1 \times 10^{-3}$ |
| $T = 15\ m^3/hr/m$ | $S = 5 \times 10^{-4}$ |
| $T = 20\ m^3/hr/m$ | $S = 1 \times 10^{-4}$ |

### 4－1－5 地下水の水質

今回行なわれた１８検体の地下水のSampling位置は図４－２３に示す通りであり、その水質分析結果は表４－９のとおりである。

バンコック周辺の地下水は、かん水化の傾向にあると言われており、このかん水化の原因いかんによっては、今後水道水源としての地下水利用計画に影響を及ぼすことも考えられるので、この１８検体の水質分析結果をもとに地下水の水質の地球化学的検討と、かん水化のメカニズムについて検討することとした。（採水地点は図４－３２に示す）

Fig 4-23 LOCATION MAP OF SAMPLING WELLS

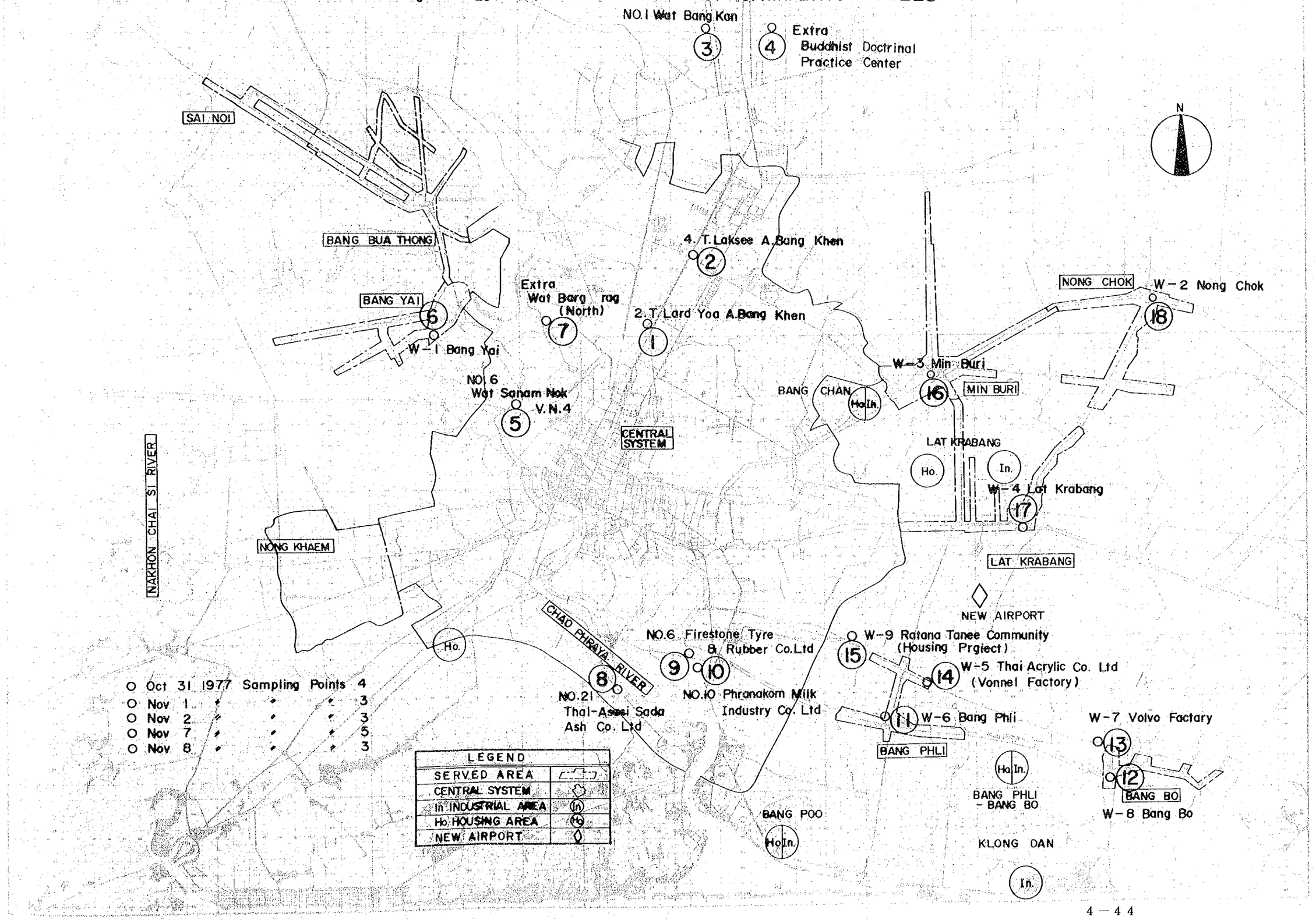


Table 4-9 RESULTS OF CHEMICAL TEST (1)

| Item \ No. | 1 Bang Khen NON-aqf | 2 Bang Khen NON-aqf | 3 Klong Luang NAK-aqf | 4 Klong Luang NAK-aqf | 5 Bang Kruai NAK-aqf | 6 Bang Yai NON aqf | 7 Muang, Nonthaburi NON-aqf |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Color | nil | nil | nil | nil | nil | nil | nil |
| Odor | nil | nil | nil | nil | nil | nil | nil |
| Turbidity | 0.29 | 24.0 | 0.25 | 2.7 | 0.9 | 7.2 | 3.5 |
| pH | 7.4 | 6.95 | 7.42 | 7.5 | 7.32 | 7.10 | 6.95 |
| Methyl Orange Alkalinity | 324 | 258 | 386 | 358 | 294 | 250 | 280 |
| Phenolphthalein Alkalinity | nil | nil | nil | nil | nil | nil | nil |
| Total Solids | 400 | 2,650 | 480 | 500 | 372 | 366 | 335 |
| Dissolved Solids | 290 | 1,450 | 370 | 380 | 300 | 285 | 265 |
| Total Hardness | 70 | 1,150 | 108 | 82 | 106 | 146 | 124 |
| Carbonate Hardness | 70 | 258 | 108 | 82 | 106 | 146 | 124 |
| Non-Carbonate Hardness | nil | 892 | nil | nil | nil | nil | nil |
| $Cl$ | 3 | 740 | 6 | 13 | 22.0 | 40.0 | 9 |
| $SO_4$ | 85.2 | 493.3 | 76.7 | 102.2 | 147.5 | 144.7 | 153.2 |
| $NO_2$ | 0.0042 | 0.0040 | 0.0060 | 0.0060 | trace | trace | trace |
| $NO_3$ | nil | nil | nil | nil | nil | nil | nil |
| Ca | 20.0 | 312.0 | 28.8 | 20.8 | 27.2 | 39.2 | 23.2 |
| $PO_4$ | 0.18 | 0.40 | 0.05 | 0.03 | 0.10 | 0.08 | 0.04 |
| Fe | nil | 1.90 | nil | 0.21 | 2.92 | 0.65 | 0.31 |
| Mn | trace | 2,414 | trace | nil | 0.151 | 0.302 | 0.244 |
| Mg | 4.80 | 88.80 | 8.64 | 7.20 | 9.21 | 11.52 | 15.84 |
| Free Carbon Dioxide | 40.0 | 81.0 | 25.0 | 21.0 | 30.0 | 72.0 | 44.0 |
| Na | 148.0 | 1,725.0 | 155.0 | 175.0 | 157.0 | 140.0 | 122.0 |
| K | 8.0 | 21.0 | 7.0 | 5.0 | 8.0 | 9.0 | 8.0 |
| E.C. | 710 | 3,370 | 864 | 897 | 750.0 | 730 | 650 |

NOTE : NON-aqf : Nonthaburi Aquifer
NAK-aqf : Nakhon Luang Aquifer
PRA-aqf : Phra Pradaeng Aquifer
BKK-aqf : Bangkok Aquifer

## RESULTS OF CHEMICAL TEST (2)

| Item \ No. | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Tai-Asahi Soda | Firestone Type | Phranakorn Milk Industry | Bang Phli | Bang Bo | Bang Bo | Bang Phli |
| | BKK-aqf | PRA-aqf | PRA-aqf | PRA-aqf | NAK-aqf | PRA-aqf | NAK-aqf |
| Color | nil | nil | nil | nil | nil | nil | nil |
| Odor | nil | nil | nil | nil | muddy | nil | nil |
| Turbidity | 7.0 | 4.4 | 8.3 | 0.33 | 1.0 | 0.27 | 0.18 |
| pH | 7.82 | 7.8 | 7.61 | 7.49 | 7.45 | 7.50 | 7.50 |
| Methyl Orange Alkalinity | 226 | 300 | 292 | 332 | 302 | 350 | 302 |
| Phenolphthalein Alkalinity | nil | nil | nil | nil | nil | nil | nil |
| Total Solids | 1,065 | 460 | 410 | 605 | 882 | 510 | 500 |
| Dissolved Solids | 890 | 380 | 355 | 510 | 770 | 440 | 390 |
| Total Hardness | 348 | 116 | 94 | 166 | 224 | 74 | 102 |
| Carbonate Hardness | 226 | 116 | 94 | 166 | 224 | 74 | 102 |
| Non-Carbonate Hardness | 122 | nil | nil | nil | nil | nil | nil |
| Cℓ | 415 | 65 | 54 | 128 | 310 | 57 | 46 |
| $SO_4$ | 73.8 | 62.5 | 59.6 | 71.0 | 105.1 | 68.0 | 102.2 |
| $NO_2$ | 0.02 | 0.0064 | 0.0024 | trace | 0.0034 | 0.0012 | trace |
| $NO_3$ | - | - | - | - | - | - | - |
| Ca | 52.0 | 24.0 | 21.6 | 50.4 | 62.2 | 24.0 | 31.2 |
| $PO_4$ | 0.02 | 0.10 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| Fe | 1.37 | 0.36 | 0.90 | nil | nil | nil | nil |
| Mn | 0.444 | 0.198 | 0.160 | 0.151 | 0.01 | nil | 0.066 |
| Mg | 52.32 | 13.44 | 9.60 | 9.60 | 18.24 | 3.36 | 5.76 |
| Free Carbon Dioxide | 60.0 | 24.0 | 42.0 | 32.0 | 13.0 | 18.0 | 27.0 |
| Na | 435.0 | 196.0 | 186.0 | 290.0 | 430.0 | 260.0 | 215.0 |
| K | 19.0 | 7.0 | 9.0 | 8.0 | 9.0 | 6.0 | 4.0 |
| E.C. | 2,020.0 | 905.0 | 825.0 | 1,225.0 | 1,920.0 | 1,045.0 | 950.0 |

NOTE : NON-aqf : Nonthaburi Aquifer
NAK-aqf : Nakhon Luang Aquifer
PRA-aqf : Phra Pradaeng Aquifer
BKK-aqf : Bangkok Aquifer

RESULTS OF CHEMICAL TEST (3)

| Item \ No. | 15 | Ratana Tanee Community Housing Project | 16 | Min Buri | 17 | Lat Krabang | 18 | Non Chok | WHO Standard |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PRA-aqf | | NAK-aqf | | NAK-aqf | | PRA-aqf | |
| Color | | nil | | nil | | nil | | nil | - |
| Odor | | nil | | nil | | nil | | nil | - |
| Turbidity | | 0.15 | | 0.26 | | 0.18 | | 0.57 | - |
| pH | | 7.40 | | 7.82 | | 7.7 | | 7.90 | 7.0 - 8.5 |
| Methyl Orange Alkalinity | | 424 | | 360 | | 376 | | 276 | - |
| Phenolphthalein Alkalinity | | nil | | nil | | nil | | nil | - |
| Total Solids | | 724 | | 510 | | 485 | | 850 | 100 - 500 ppm |
| Dissolved Solids | | 655 | | 390 | | 390 | | 710 | - |
| Total Hardness | | 180 | | 94 | | 80 | | 34 | - |
| Carbonate Hardness | | 180 | | 94 | | 80 | | 34 | - |
| Non-Carbonate Hardness | | nil | | nil | | nil | | nil | - |
| Cℓ | | 234 | | 24 | | 14 | | 160 | 200 ppm |
| $SO_4$ | | 54.0 | | 93.7 | | 102.2 | | 130.6 | 200 ppm |
| $NO_2$ | | 0.0066 | | - | | - | | - | |
| $NO_3$ | | - | | - | | - | | - | 40 ppm |
| Ca | | 54.6 | | 29.6 | | 24.8 | | 12.0 | 75 ppm |
| $PO_4$ | | 0.02 | | 0.01 | | 0.01 | | nil | - |
| Fe | | nil | | nil | | nil | | 0.17 | 0.3 ppm |
| Mn | | 0.188 | | 0.151 | | trace | | nil | 0.1 ppm |
| Mg | | 12.48 | | 4.80 | | 4.32 | | 3.36 | 50 ppm |
| Free Carbon Dioxide | | 35.0 | | 26.0 | | 18.0 | | 22.0 | - |
| Na | | 340.0 | | 155 | | 140 | | 285 | - |
| K | | 12.0 | | 4.0 | | 4.0 | | 3.0 | - |
| E.C. | | 1,545.0 | | 1,000.0 | | 810.0 | | 1,685.0 | - |

NOTE : NON-aqf : Nonthaburi Aquifer
NAK-aqf : Nakhon Luang Aquifer
PRA-aqf : Phra Pradaeng Aquifer
BKK-aqf : Bangkok Aquifer

(1) 地下水水質のかん水化の考察

1) 地下水水質の分類

水は純粋な状態においては、水素と酸素の化合物であるがこのような水は自然界に存在しない。雨は空気中のじんあいを溶解しており、地表水になると地表面上の多種多様の物質を溶解する。地下水はそのような溶解物質をもつ地表水によって涵養されかつ地下水面に達するまでの通気帯、帯水層を流動する間に種々の物質を溶解する。

陸水の溶解成分のうち、その主要成分であるNa、Ca、Mg、Kの各陽イオンと、$SO_4$、Cℓ、$HCO_3$、$CO_3$の各陰イオンを用いて、これらのイオンが化学平衡に立っているとの仮定に立つと、陸水はつぎの4つのグループに分けてKey−Diagramに図示することができる。

〔i〕 $Ca(HCO_3)_2$型の水

〔ii〕 $NaHCO_3$型の水

〔iii〕 $CaSO_4$または$CaCℓ_2$型の水

〔iv〕 $Na_2SO_4$または$NaCℓ$型の水

〔i〕、〔ii〕グループの水

淡水の最も一般的な性質は、$Ca(HCO_3)_2$型であるが地下水にはこの型のものと〔ii〕に属する$NaHCO_3$型のものがある。一般には〔i〕は比較的浅い地下水、〔ii〕は深い地下水のもつ化学的性質である。地下水の涵養・流動の機構から考察すると、地表水が自由地下水となり被圧地下水に移化するに従って溶存成分が変化してゆく過程は、一般に

① 酸化 → 還元

② 溶出

③ イオン交換

の3つにまとめられる。

①の変化は地下水の流動過程において水中の溶存酸素が地中の有機物質の分解によって消費され、かつ被圧地下水は大気との接触がないので水は還元性の環境におかれるので、化学成分上では

a) 溶存酸素の減少

b) 二価鉄（$Fe^{2+}$）の増加

c) $SO_4^{2-}$の減少

d) 微生物による窒素固定の結果溶存酸素の多いときに増加した$NO_3^-$が還元されて$NH_4^+$まで至るがその過程は次のようである。

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NH_2OH \rightarrow NH_4^+$$

e) 嫌気性メタン発酵の結果、溶存メタンの増加として表われる。

②の溶出は地下水が帯水層・難帯水層と接触する過程において

a) 全陽イオンの増加

b) $HCO_3^-$の増加、すなわち$HCO_3^-$/全イオンの増加と、逆に$C\ell^-$/全陰イオンの減少として現われる。

③のイオン交換とは、固体と吸着されている物質との間に、化学的結合力が働いて化学吸着（absorped）されているイオンと、溶液中のイオンとが交換される場合を言う。

イオン交換反応は、陽イオンに関するものが主体であり、これを陽イオン交換（Cation exchange）または塩基交換（base exchange）という。

例えば、$Na^+$を吸着しているイオン交換体が、$Ca^{2+}$を含む水と接しているとき、つぎの式に示す平衡が成立している。

$$2\,NaX + Ca^{2+} \rightleftharpoons CaX_2 + 2\,Na^+$$

ただしXは交換体である。この反応は地下水の軟水化現象をもたらすものである。

また仮りに、淡水でみたされている帯水層に海水など$Na^+$濃度が異常に高い水が侵入した場合には上式の反応は逆に進み$Ca^{2+}$の増加をもたらす。

(iii) グループの水

このグループの水は、Ca、Mg、$SO_4$、$C\ell$との化合物を主体とする、いわゆる永久硬度によって生じるものである。この性質は鉱山の酸性廃水や火山性の水に多いが、化石水にもこの性質が認められることもある。

(iv) グループの水

この水は、海水もしくはそれと同じ性質を示すものである。臨海部の沖積層・洪積層中の地下水は、堆積時における海水が残留または水理的条件の変化によって海

・塩水汚染が生じており、この多くはNaCℓ型に属する。

以上、地下水の分類について大要を述べたが、ここで次項の検討にうつる前にかん水について触れておく事にする。

かん水（Saline Water）は、固形物総量によっておおむね表4－10の様に分類される。

地層中のかん水は、つぎのような場合におこる。

① 地層が堆積したときのかん水がそのまま地層中に封じ込められている。

② 地層自身もしくは近くの地層から塩類が溶脱する。

③ 地層の堆積後、海洋もしくはほかの塩類源にさらされたために地層中に塩水が二次的に含有される。

Table 4-10 RELATION OF SALINE WATER AND TOTAL SOLID

| | Total Solids | Electrical Conductivity |
|---|---|---|
| Fresh Water | ＜100 ppm | 1,400 μυ/cm |
| Low Saline Water | 100 - 1,000 | 1,000 - 4,000 |
| Middle " | 1,000 - 10,000 | 4,000 - 14,000 |
| High " | 10,000 - 17,000 | 14,000 - 50,000 |
| Sea Water | ＞17,000 | ＞50,000 |

2) 塩水化への考察

(i) 一般的な考察

① １８検体の地下水について、まずその溶存イオンの総量を比較するため、Electrical Conductivityに着目した。

その基準として前述の low saline water に相当する1,400 μ℧/cmを用いて区分すると（表４－１０）、1,400 μ℧/cm を越えているものは、

№２ 3,370 μ℧/cm、№８ 2,020 μ℧/cm、 №１２ 1,920 μ℧/cm、№１５ 1,545 μ℧/cm、№１８ 1,685 μ℧/cm の計５検体であり、他は1,400 μ℧/cm以下であった。当然のことであるが、この５検体はTotal Solideも多くなっており、Electrical Conductivityの値を裏付けている。（表４－１２）

② また、地下水の塩水化が海水による場合の汚染程度が、少し汚染されている地下水の数値である $0.5 < C\ell / HCO_3 + CO_3 < 1.3$（表４－１１）を基準にすると、この間に相当する検体は№８、№１２、№１５、№１８の計４検体であった。（表４－１３）

③ 次に１８検体について、Key−Diagramを作成し、プロットしてみると、１８検体は次の２種類に分類された。（図４－２４）

a） 第２グループの水〔 $NaHCO_3$ 型の水〕

№1、2、3、4、5、6、7、9、10、11、12、13、14、15、16、17

b） 第４グループの水〔 $Na_2SO_4$ または $NaC\ell$ 型の水〕

№８、１８

この結果からすれば、一般的には№８、１８が海水もしくは、それと同じ性質を示すものであり、その他は淡水性の被圧地下水と推定されるがKey−Diagramからも明らかなように、№５、６、７、８、１２、１５、１８は中間性性質をもっているものと思われる。

また、いずれにしても１８検体は、$NaHCO_3$ 型か $Na_2SO_4$ 又は $NaC\ell$ 型に属することより、カチオンとしてはNaが他のカチオンに比較して多量に存在していることは明らかである。

以上 ① Electrical Conductivityの値

② かん水化の傾向

③ Key－Diagram

より判断して、№8、№12、№15、№18がかん水化の問題があるようである。従って次に各検体のイオン組成について検討を加え、かん水化の原因について考察する。

尚、参考の為に、Electrical Conductivityの値が非常に高い№2についても同様に検討を加えるものとする。

Table 4-11 DEGREE OF SALINE WATER

| | Degree of Saline Water |
|---|---|
| $0.5 > Cl/CO_3 + HCO_3$ | Not Contaminated with Saline Water |
| 0.5 < " < 1.3 | Low degree Saline Water |
| 1.3 < " < 2.8 | Medium degree Saline Water |
| 2.8 < " < 6.6 | High degree Saline Water |
| 6.6 < " < 15.5 | Heavy degree Saline Water |
| 15.5 < " < 200± | Sea Water |

Table 4-12 SUMMARY OF WATER QUALITY

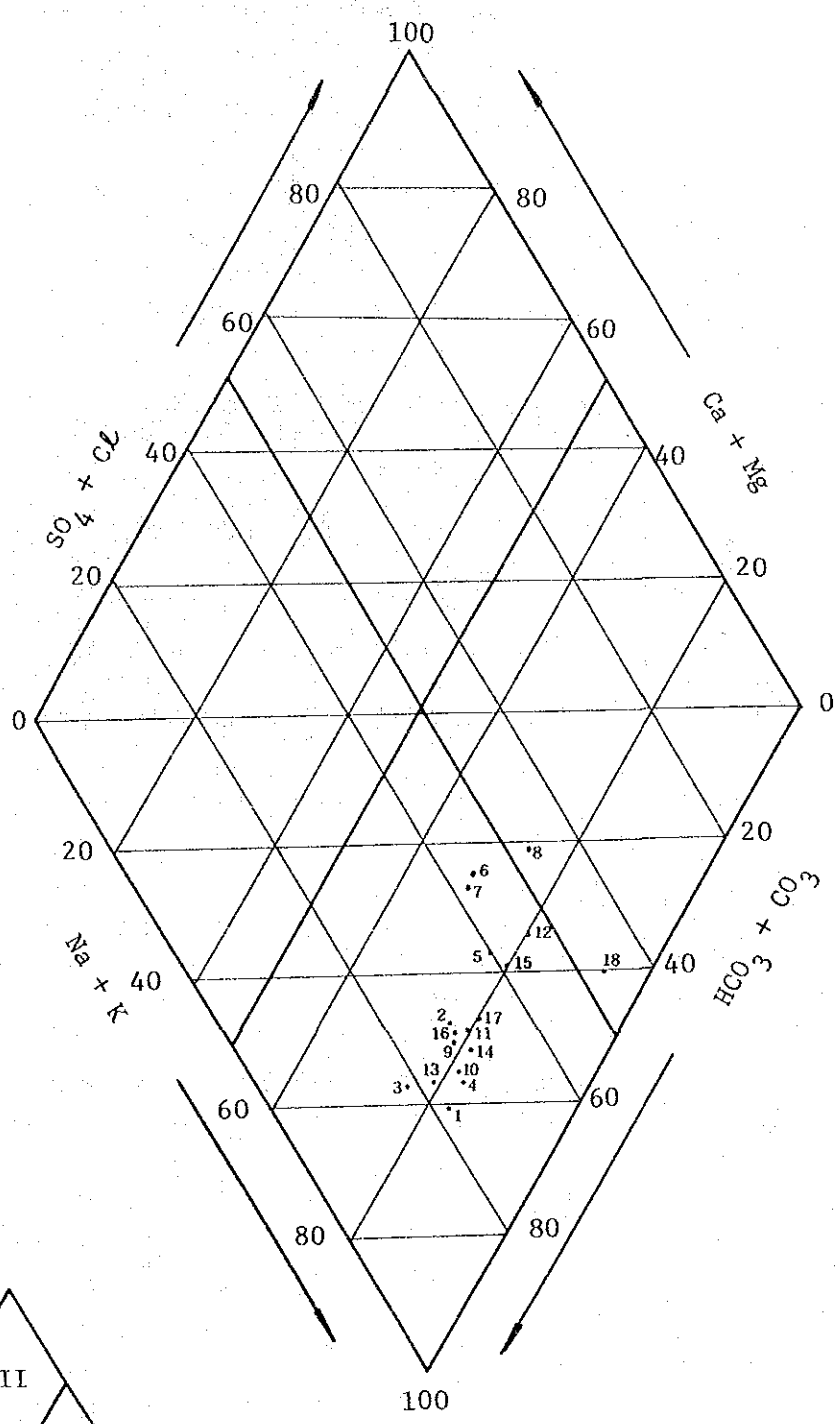
| Item / No. | District | Aquifer | Pumping Capacity | Electrical Conductivity | Turbidity | Total-Solids | Dissolved Solids |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Bang Khen | NON-aqf | 33.3 [$m^3/h$] | 710 [$\mu v/cm$] | 0.29 [ppm] | 400 [ppm] | 290 [ppm] |
| 2 | Bang Khen | NON-aqf | 20 | 3,370 | 24.0 | 2,650 | 1,450 |
| 3 | Klong Laung | NAK-aqf | 0.4 | 864 | 0.25 | 480 | 370 |
| 4 | Klong Laung | NAK-aqf | 12.4 | 897 | 2.7 | 500 | 380 |
| 5 | Bang Kruai | NAK-aqf | 5 | 750 | 0.9 | 372 | 300 |
| 6 | Bang Yai | NON-aqf | 20 | 730 | 7.2 | 366 | 285 |
| 7 | Muang Nonthaburi | NON-aqf | 354 | 650 | 3.5 | 335 | 265 |
| 8 | Tai-Asahi Soda Ash Co. Ltd. | BKK-aqf | 55 - 60 | 2,020 | 7.0 | 1,065 | 890 |
| 9 | Firestone Type & Rubber Co. Ltd. | PRA-aqf | 81.9 | 905 | 4.4 | 460 | 380 |
| 10 | Phranakorn Milk Industry Co. Ltd. | PRA-aqf | 41.7 | 825 | 8.3 | 410 | 355 |
| 11 | Bang Phli | PRA-aqf | - | 1,225 | 0.33 | 605 | 510 |
| 12 | Bang Bo | NAK-aqf | - | 1,920 | 1.0 | 882 | 770 |
| 13 | Bang Bo | PRA-aqf | - | 1,045 | 0.27 | 510 | 440 |
| 14 | Bang Phli | NAK-aqf | - | 950 | 0.18 | 500 | 390 |
| 15 | Ratana Tanee Community Housing Project | PRA-aqf | - | 1,545 | 0.15 | 742 | 655 |
| 16 | Min Buri | NAK-aqf | - | 1,000 | 0.26 | 510 | 390 |
| 17 | Lat Krabang | NAK-aqf | - | 810 | 0.18 | 485 | 390 |
| 18 | Nong Chok | PRA-aqf | - | 1,685 | 0.57 | 850 | 710 |

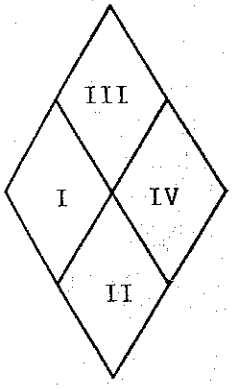
Table 4-13 COMPARISON OF ION CONTENT

[meq]

| Aquifer | No. | $C\ell$ [meq] | $C\ell/HCO_3 + CO_3$ | $SO_4$/Total Anion |
|---|---|---|---|---|
| Bangkok | 8 | 11.69 | 0.89 | 0.06 |
| Phra Pradaeng | 9 | 1.83 | 0.23 | 0.12 |
| | 10 | 1.52 | 0.20 | 0.12 |
| | 11 | 3.61 | 0.33 | 0.09 |
| | 12 | 8.73 | 0.69 | 0.09 |
| | 13 | 1.61 | 0.16 | 0.11 |
| | 14 | 1.30 | 0.16 | 0.19 |
| | 15 | 6.59 | 0.59 | 0.06 |
| | 18 | 4.51 | 0.74 | 0.20 |
| Nakhon Luang | 3 | 0.17 | 0.02 | 0.18 |
| | 4 | 0.37 | 0.05 | 0.23 |
| | 5 | 0.62 | 0.11 | 0.34 |
| | 16 | 0.68 | 0.11 | 0.22 |
| | 17 | 0.39 | 0.07 | 0.27 |
| Nonthaburi | 1 | 0.08 | 0.01 | 0.22 |
| | 2 | 20.85 | 0.30 | 0.09 |
| | 6 | 1.13 | 0.22 | 0.33 |
| | 7 | 0.25 | 0.06 | 0.40 |

Fig. 4-24 KEY - DIAGRAM




I : Ca $(HCO_3)_2$ Type

II : $NaHCO_3$ Type

III : $CaSO_4$ or $CaCl_2$ Type

IV : $Na_2SO_4$ or NaCℓ Type

(ii) かん水化の原因

地下水のかん水化が起こる原因としては、次の３つの原因による可能性が考えられる。

① 化石海水によるかん水化

② 海水の侵入によるかん水化

③ 地層からの塩類の溶脱によるかん水化

① の原因による場合

既存のデーターから詳細な検討を加えることは困難であるが、一般的には、化石海水はアニオンではCℓイオンが主成分となっていること及び化石海水は還元状態下にあるため$SO_4$イオンの含有が少なく、$SO_4$／Cℓは海水が0.１４程度であるのに比較し、きわめて少なく、０に等しいとされている。

このことからすれば、１８検体の$SO_4$／Cℓは0.１３～２2.２５の範囲にあり、かん水化の傾向のあるNo.2、8、１２、１５、１８の$SO_4$／Cℓは、（表4－１４参照）

No.２　0.４０

No.８　0.１３

No.１２　0.２５

No.１５　0.１７

No.１８　0.６０

となっている。したがって、かん水化が化石海水によるものとは考え難い。

Table 4-14 ION COMPOSITION

[meq]

| Item / No. | Na | K | Ca | Mg | Cℓ | $SO_4$ | $HCO_3+CO_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6.43 | 0.20 | 1.00 | 0.40 | 0.08 | 1.78 | 6.17 |
| 2 | 75.0 | 0.54 | 15.57 | 7.31 | 20.85 | 8.40 | 69.17 |
| 3 | 6.74 | 0.18 | 1.40 | 0.71 | 0.17 | 1.60 | 7.26 |
| 4 | 7.60 | 0.13 | 1.04 | 0.59 | 0.37 | 2.13 | 6.86 |
| 5 | 6.83 | 0.20 | 1.36 | 0.75 | 0.62 | 3.07 | 5.45 |
| 6 | 6.09 | 0.23 | 1.96 | 0.95 | 1.13 | 3.01 | 5.09 |
| 7 | 5.30 | 0.20 | 1.16 | 1.30 | 0.25 | 3.19 | 4.52 |
| 8 | 18.91 | 0.49 | 2.59 | 4.31 | 11.69 | 1.54 | 13.07 |
| 9 | 8.52 | 0.18 | 1.20 | 1.11 | 1.83 | 1.30 | 7.88 |
| 10 | 8.09 | 0.23 | 1.08 | 0.79 | 1.52 | 1.24 | 7.43 |
| 11 | 12.61 | 0.20 | 2.51 | 0.79 | 3.61 | 1.48 | 11.02 |
| 12 | 18.70 | 0.23 | 3.10 | 1.50 | 8.73 | 2.19 | 12.61 |
| 13 | 11.30 | 0.15 | 1.20 | 0.28 | 1.61 | 1.42 | 9.90 |
| 14 | 9.35 | 0.10 | 1.56 | 0.47 | 1.30 | 2.13 | 8.05 |
| 15 | 14.78 | 0.31 | 2.72 | 1.03 | 6.59 | 1.13 | 11.12 |
| 16 | 6.74 | 0.10 | 1.48 | 0.40 | 0.68 | 1.95 | 6.09 |
| 17 | 6.09 | 0.10 | 1.24 | 0.36 | 0.39 | 2.13 | 5.27 |
| 18 | 12.39 | 0.08 | 0.60 | 0.28 | 4.51 | 2.72 | 6.12 |

②の原因による場合

海水の混入によるかん水化には、２通り考えられ、１つは海水が直接侵入してきた場合であり、もう１つは難帯水層などの土層中のイオン交換体を通して浸透してきた場合である。

a） 直接侵入を受けた場合

海水が直接侵入してきた場合を想定し、１８検体の$SO_4-C\ell$、$Na-C\ell$、$Mg-C\ell$の関係を図４－２５～２８のよのにプロットしてみると、$SO_4-Cl$では、№８、１２、１５のように比較的海水の侵入を示す$SO_4/C\ell$に近似するものもあるが、カチオンに関しては、単純に海水の侵入を示す各々の関係とは相関関係を示さず、全般的にカチオンの存在値は多くなっている。

また、かん水化の傾向のある№２、８、１２、１５、１８のうち、№８を除いて、かん水化が海水の直接侵入とした場合、Naイオンの量に比較し、Cℓイオンが少なすぎる。

| № | Na（meq） | Cℓ（meq） |
|---|---|---|
| № ２ | ７５.０ | ２０.８５ |
| № ８ | １８.９１ | １１.６９ |
| №１２ | １８.７０ | ８.７３ |
| №１５ | １４.７８ | ６.５９ |
| №１８ | １２.３９ | ４.５１ |

したがって、№８を除いては、かん水化が海水の直接侵入によるものではないと考えられる。

b） 海水がイオン交換体を通して浸透してきた場合

海水が粘土鉱物などのイオン交換体を通して浸透してきた場合を想定して、$Na/C\ell-C\ell$、$Ca/C\ell-C\ell$、$Mg/C\ell-C\ell$の関係をプロットしてみると、図４－２９～４－３１のようになる。

海水がイオン交換されて浸透する場合、海水はNaイオンに富むことにより、

イオン交換は、

$$2Na^{+} \longrightarrow Ca^{2+}$$

の様に進行し、Caイオンの増加があると考えられるが、Naイオンの減少、Caイオンの増加を示している検体は１８検体中１つも存在せず、海水によるイオン交換は起っていないものと考えられる。

Fig. 4-25 RELATION OF $SO_4$ AND $C\ell$

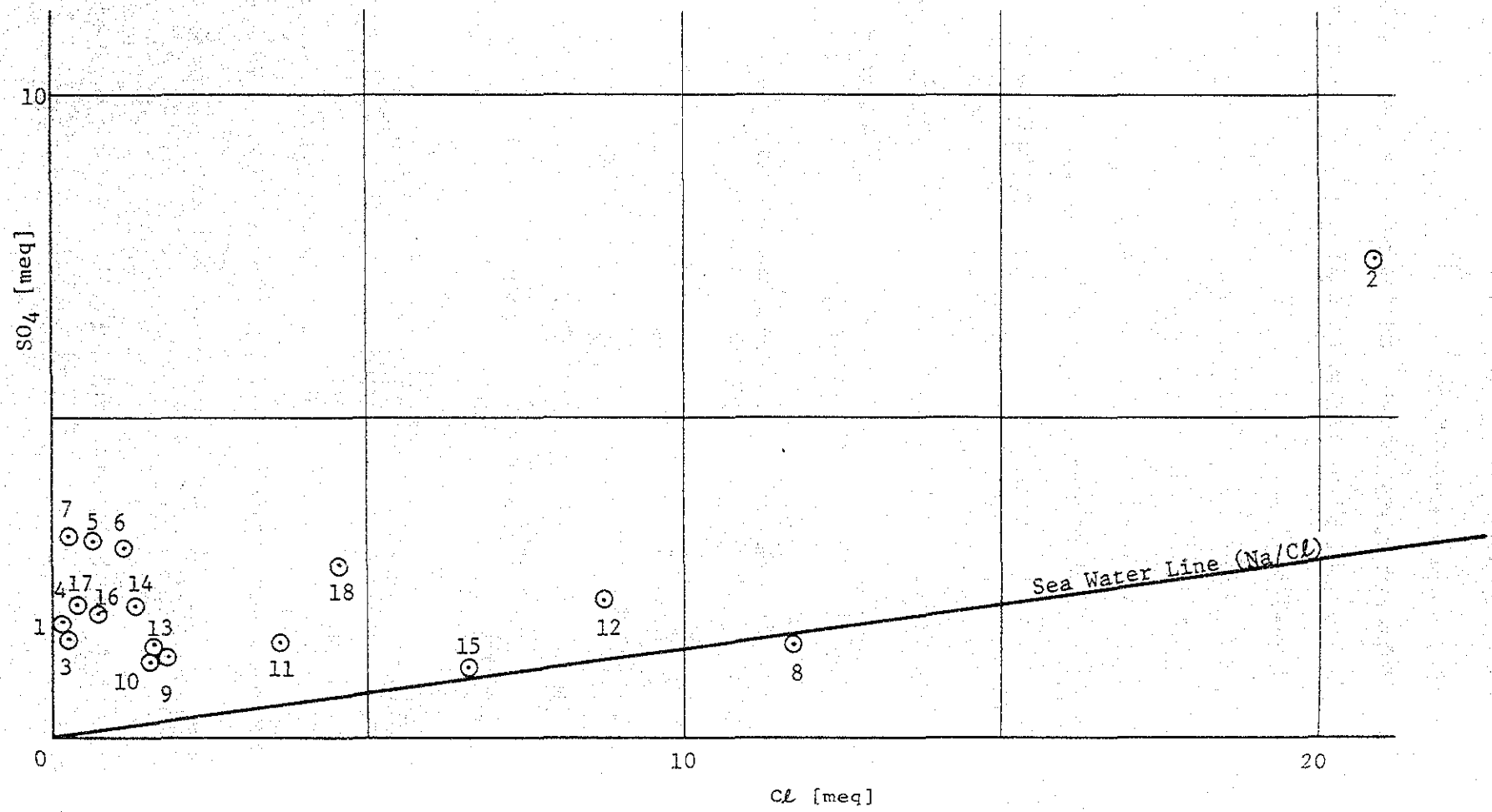


Fig. 4-26 RELATION OF Na AND Cℓ

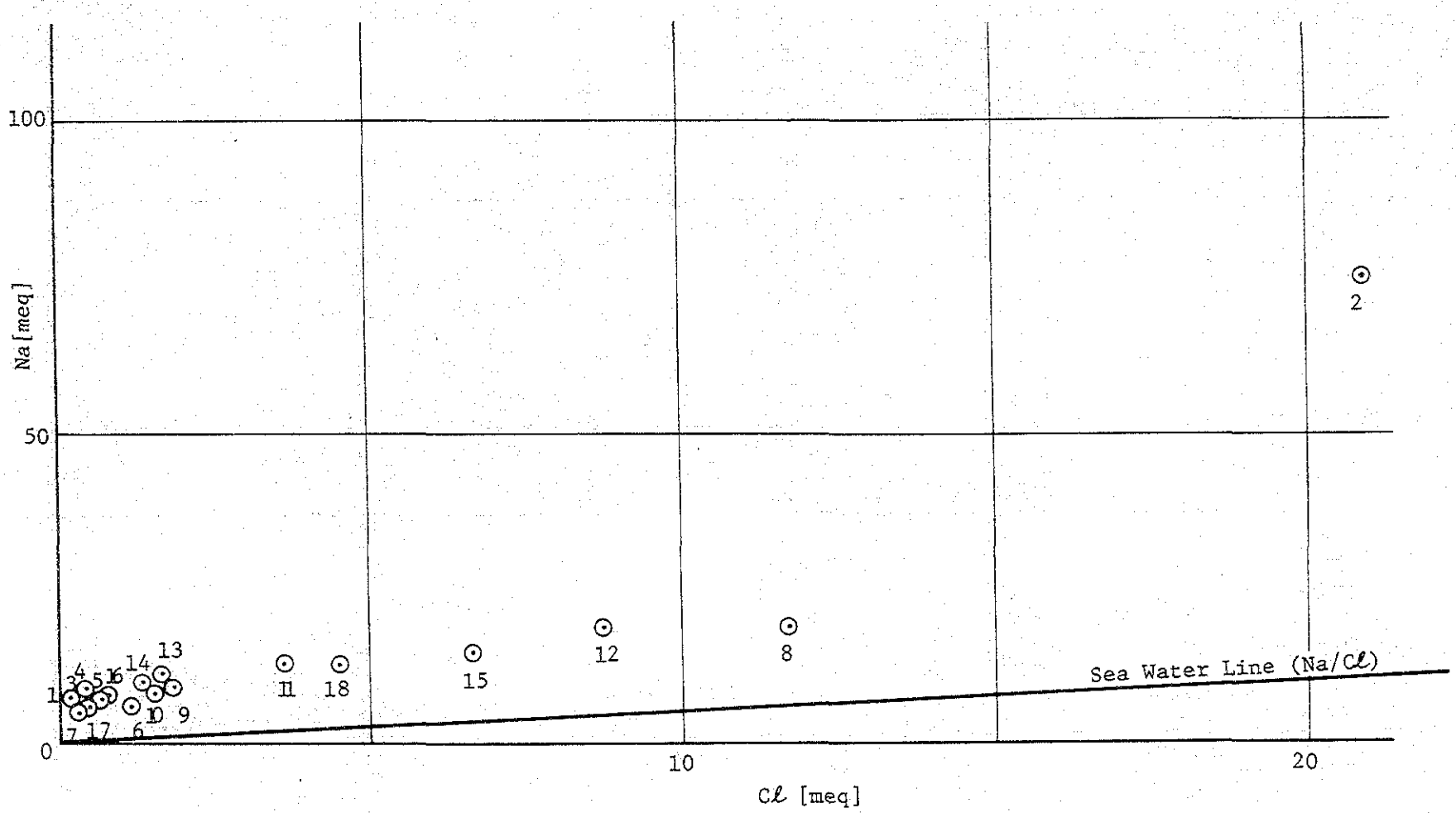


Fig. 4-27 RELATION OF Ca AND Cℓ

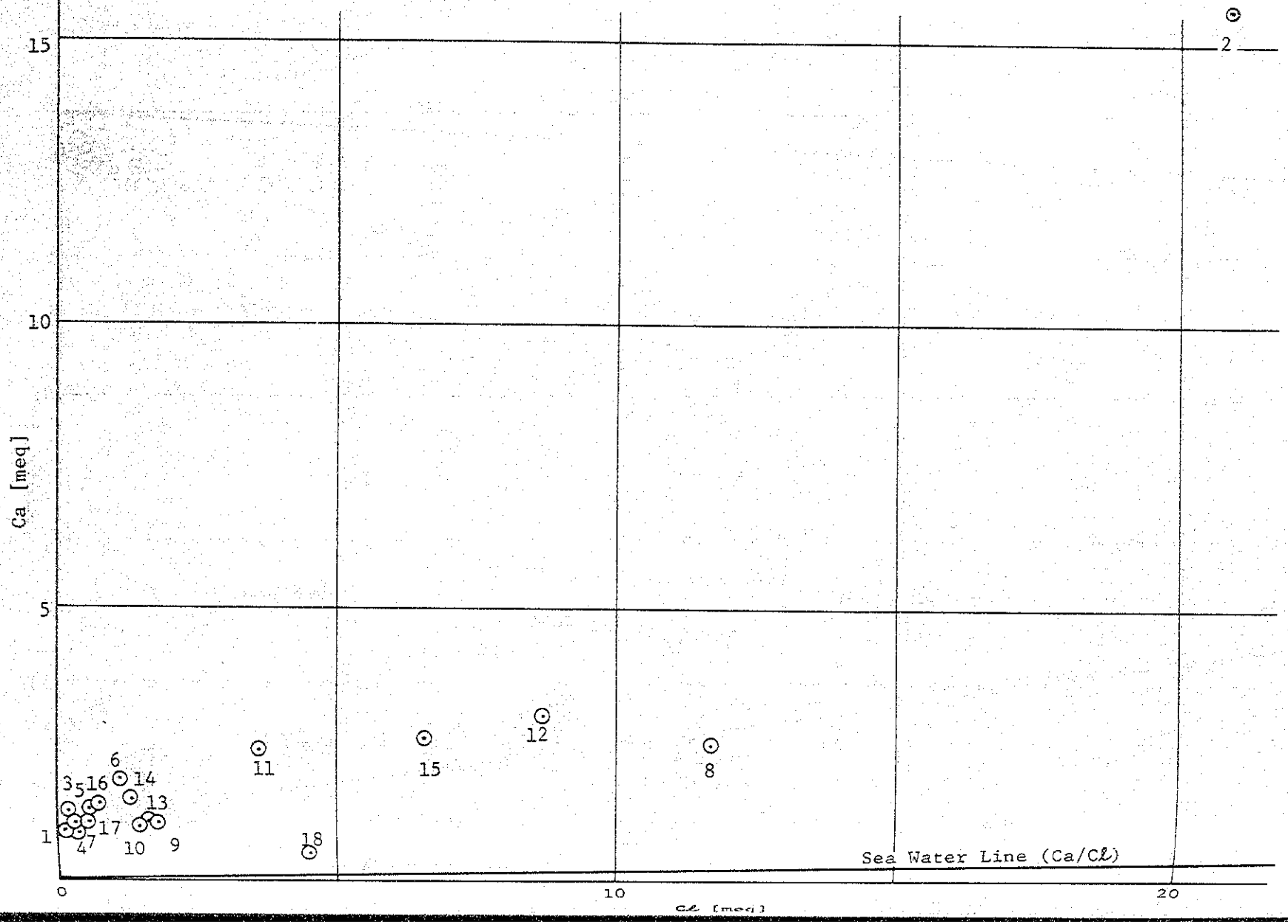


Fig. 4-28 RELATION OF Mg and Cℓ

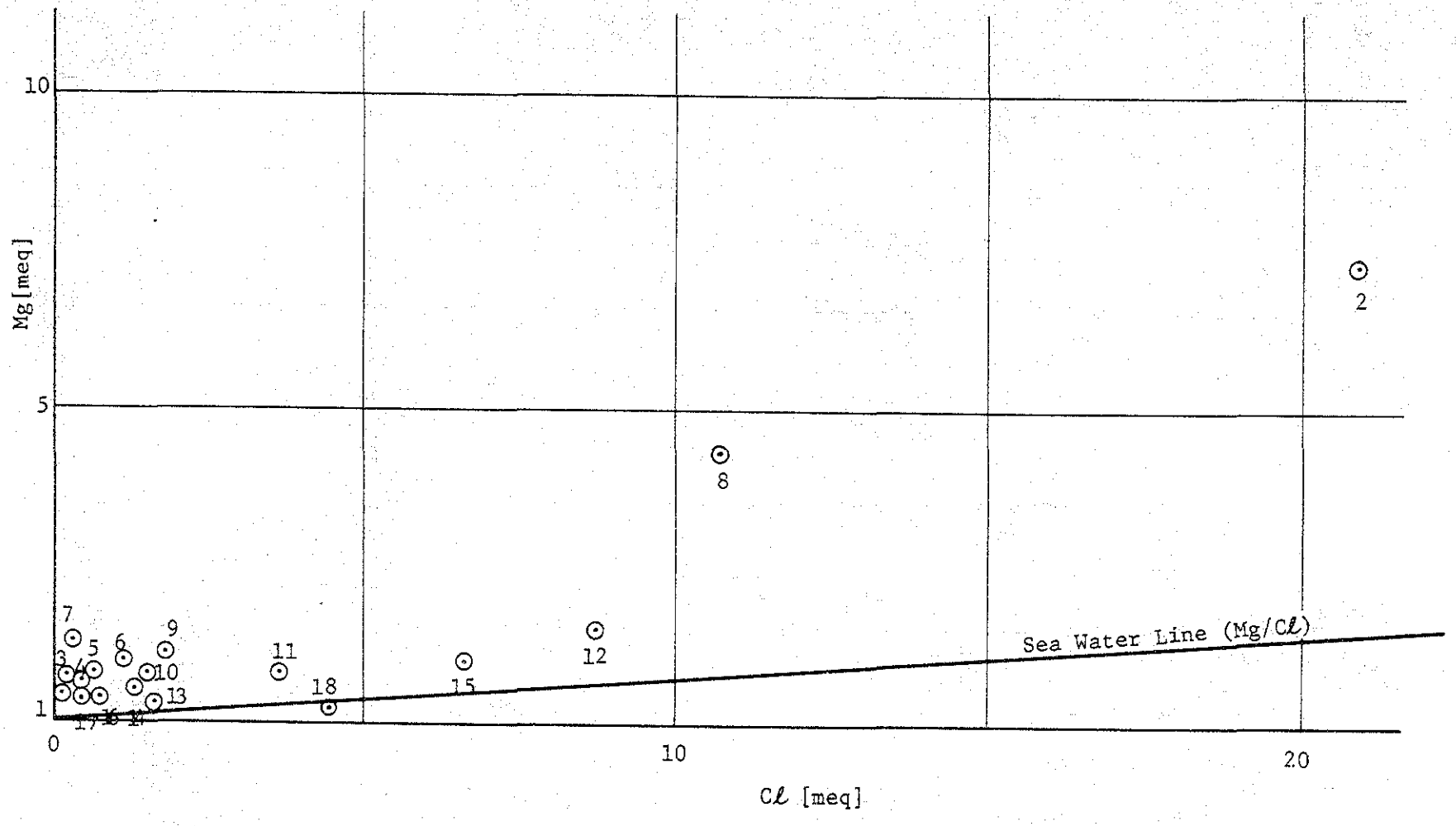


Fig. 4-29 RELATION OF Na/Cℓ AND Cℓ

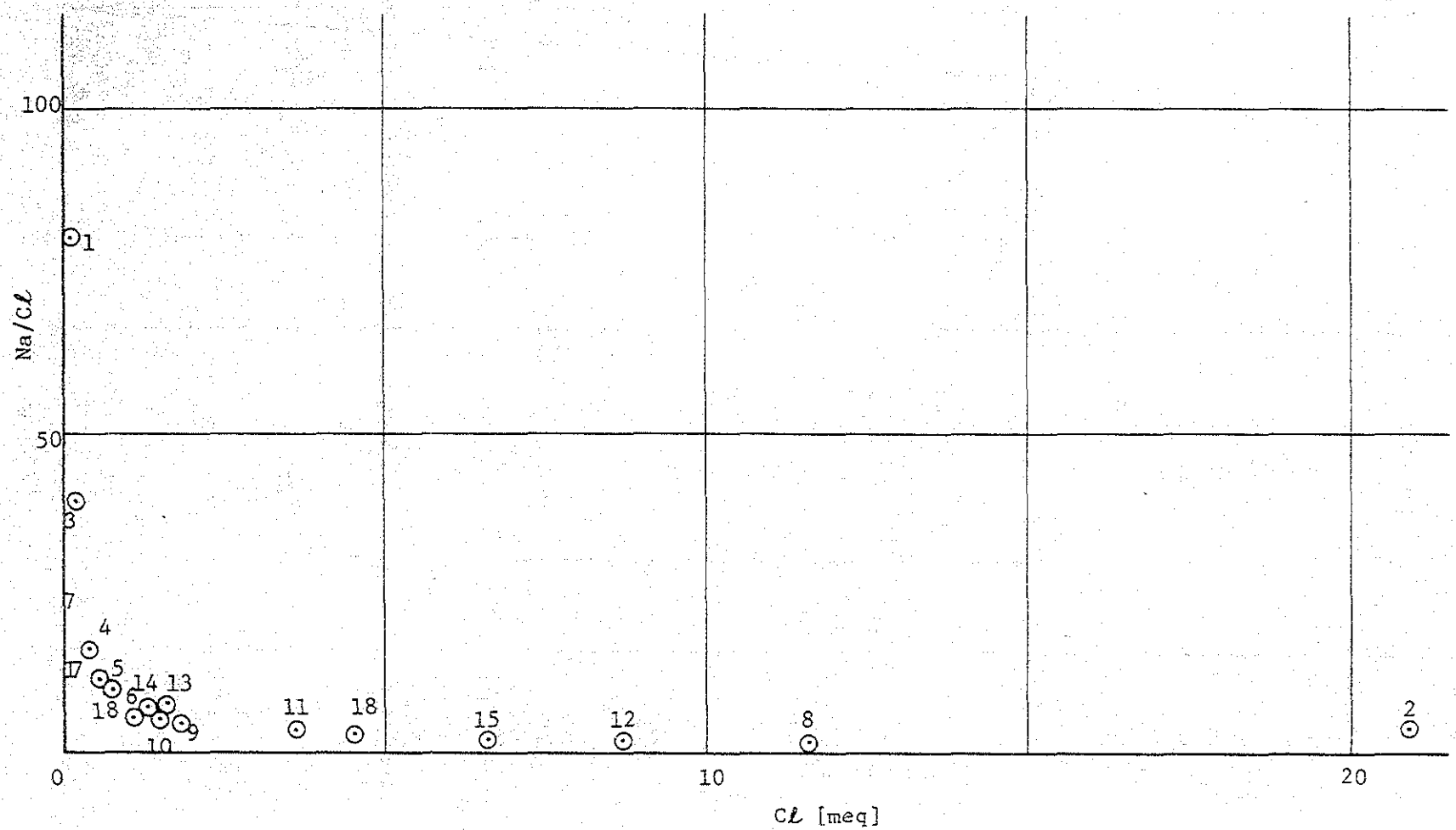


Fig. 4-30 RELATION OF Ca/Cℓ AND Cℓ

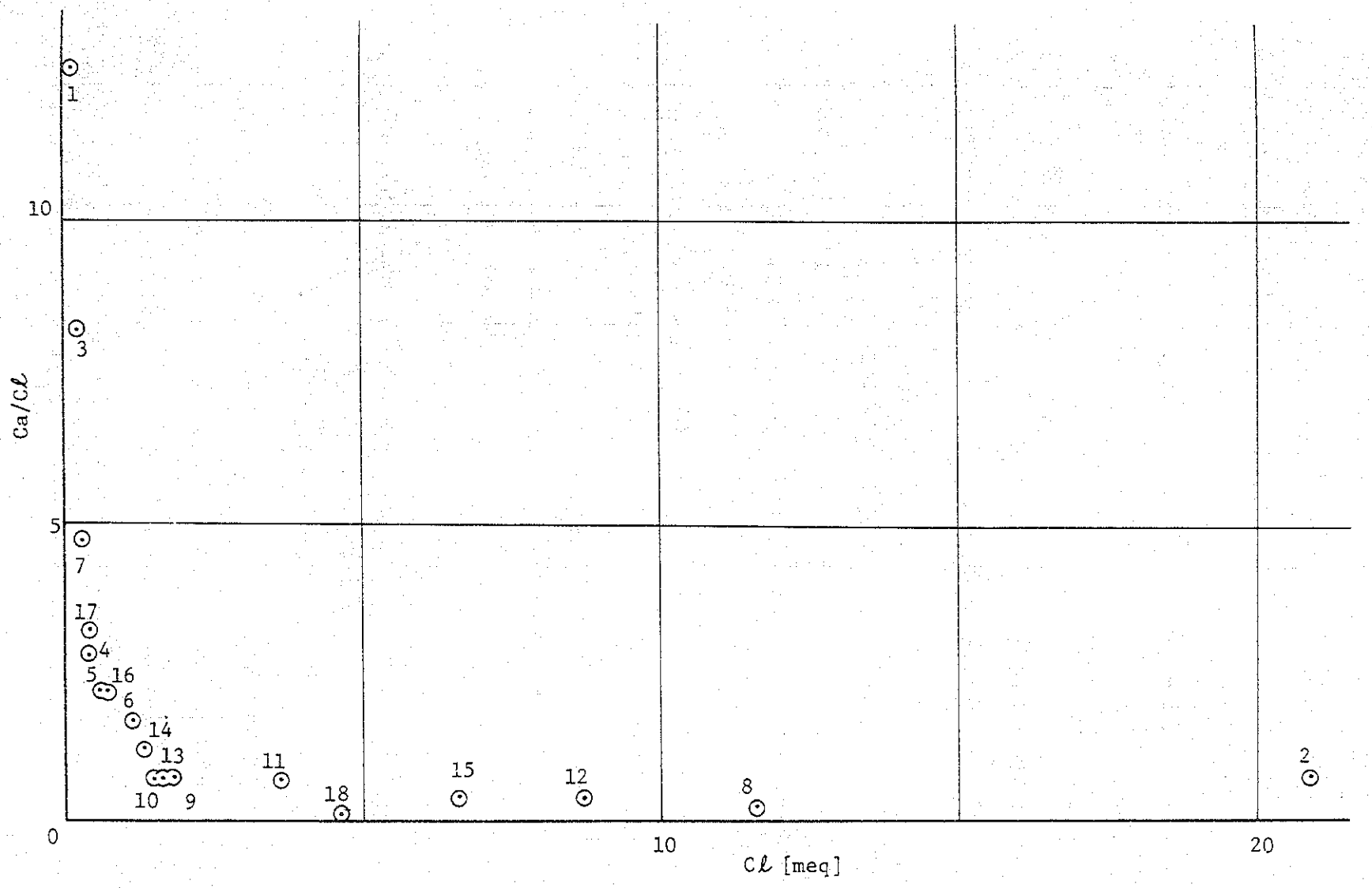
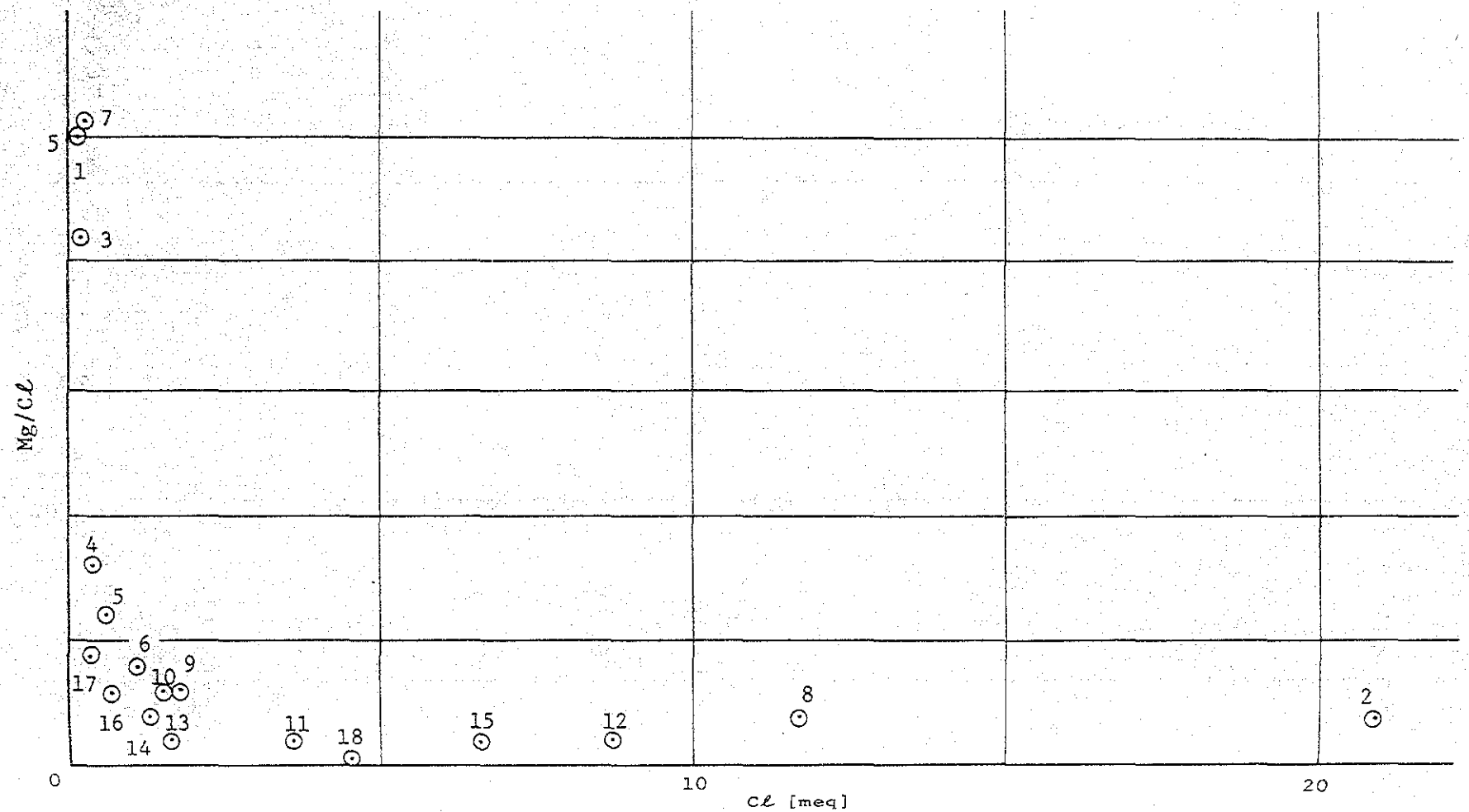


Fig. 4-31 RELATION OF Mg/Cℓ AND Cℓ



③の原因による場合

１８検体はすべてカチオンではNaイオンが、アニオンでは$HCO_3$イオンが成分となっており、№８、１８以外の１６検体では$HCO_3$イオンがアニオンの５０％以上を占めている。この状態は、一般的には、軟水化を受けた地下水であると言える。

１８検体をCℓイオンに対し、$HCO_3$イオンが単位量増加するときのNaイオンの増加量を求めてみると、図４－３２のようになり、かん水化の傾向のある№２、８、１２、１５、１８を含めた１８検体はすべて図上の$Na/C\ell = HCO_3 + CO_3/C\ell$の直線にそって分布している。言い換えれば、この現象は地層中から$HCO_3$イオンが地下水中に１個溶解してくると、Naイオンが地下水中に１個溶解してくることを示している。

したがって、バンコック周辺の地下水の性質は、かん養の少ない$NaHCO_3$型の地下水であると考えられる。

また、かん水化の傾向のある、№２、８、１２、１５、１８はかん水化と溶存イオン量の増加、ことにNaイオン量の増加と関連性が強いが、№８以外のかん水化の場合にはCℓ／Naが海水の組成比率とは違い小さい値を示している。

このようなかん水化の原因としては、地層中からの塩類及びCℓイオンの溶脱によるかん水化が考えられる。

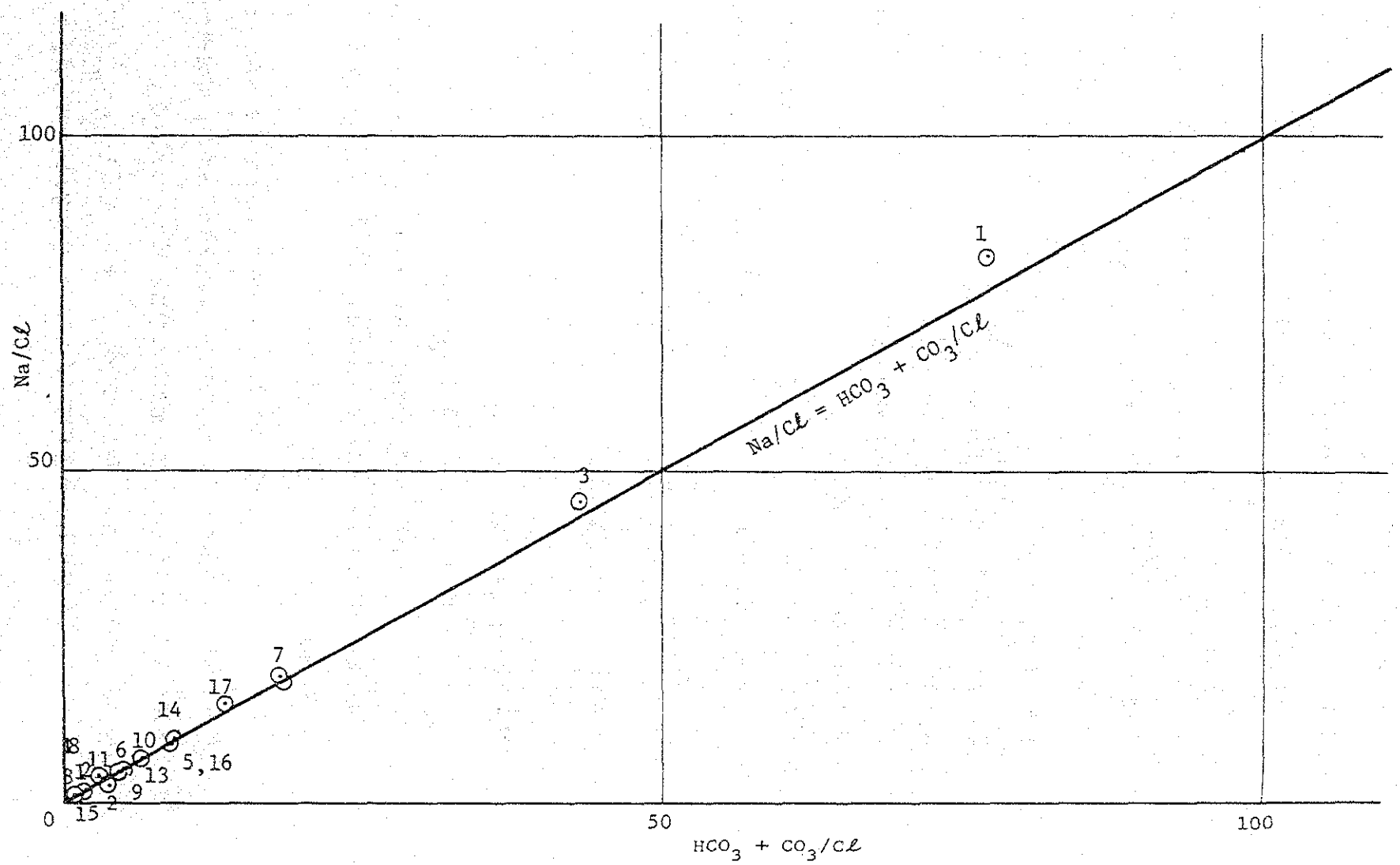
つまり、バンコック周辺の場合、粘性土などのイオン交換体が堆積の過程で、海水と接触しイオン交換を起こし

$$2Na^{+} + CaX \longrightarrow 2NaX + Ca^{2+}$$

となって粘性土などのイオン交換体はNaイオンに富んで堆積し、また、この時、同時に粘性土等は海水中のCℓイオンを物理吸着（absorption）していることが考えられる。

したがって、通常の状態であれば、バンコック周辺の地下水はNaイオンと$HCO_3$が溶解されてくる状態である$NaHCO_3$型であるわけであるが、過剰揚水などの物理的外力が加わった場合には、地層から溶脱されてくるイオン量、ことに粘性土等のイオン交換体に多量に存在しているNaイオンの増加とともに、吸着されているCℓイオンも溶脱され、増加してくるためにかん水化が起こるものと考えられる。

Fig. 4-32 RELATION OF Na/Cℓ AND $HCO_3 + CO_3$/Cℓ



以上のようにバンコック周辺の地下水は、本来かん養の少ない$NaHCO_3$型の地下水であるため、過剰揚水など物理的外力が加わると地層中に吸着されているCℓイオンが溶脱されてきて、かん水化が起こるものと考えられる。この例が、１８検体では№２、１２、１５、１８のかん水化に相当すると考えられる。

しかし、№８のかん水化は、№８がNaイオンに対するCℓイオンの存在量が№２、№１２、１５、１８と比較して多いこと、$SO_4$－Cℓも海水の組成が近似していること、また、№８が海岸に近く、Bangkok Aquiferからの検体であることを考えれば、そのかん水化は海水の混入によるものではないかと考えられる。

(2) その他の水質

今回分析された１８検体のうち、給水区域に関係する地域のSampleは表４－９にリストアップされた資料のうち、№６、１１、１２、１３、１４、１６、１８であり、各検体で、飲料水として問題となりそうな項目は表４－１５に示す如くである。

これらの資料のうち№６は、そのまま取水が計画されているBang Yaiの既設井より得たSampleであり、№１６はSeparate Systemの水源として計画されているNakhorn Luang Aquiferから取水するMin Buri地区の既設井の水質データである。又、№１１、１２、１３、１４、１８の５検体のSampleは給水区域内の既設井戸より得られたものであるが、取水計画の対象となっている帯水層とは異った層から得られたデータであるので一応ここでは評価の対象外とし、以下№６と№１６の井戸の水質について概略の評価をする事とした。

1) №６（Bang Yai）

№６のBang YaiのSampleはFeが0.65 ppm、Mnが0.302 ppm検出されており、これらの項目が飲料水としてやや高めな値を示している。

他方Dissolved Solid及びMethyl Orange Alkalinityの値に着眼すると、これらの値が高いので$HCO_3^-$イオンが多量に存在している事が推定される。

従って塩素注入あるいはAiration程度の簡単な手段で、Fe…Mnは除去されるものと思われ、水道水源としてはさして心配される問題ではないであろう。

2) №１６（Min Buri）

水質分析の結果、本検体のうち多少高めな値を示している項目はTotal Solid（５１０ppm）であるがTurbidityが0.26 ppmと低いので、そのまま飲料水として使用されても、大きな問題はないと思われる。

以上、非常に簡単に限られた２つの資料を基に飲料水として問題になりそうな項目について概略的な評価を行なったがSeparate Systemの８Amphoes地区の水源として予定されているNakhorn Luang Aquifer及びNonthaburi Aquiferについての水質のデータは現在のところ非常に乏しい。

又上記の２層は８Amphoesの長期的な水源として位置づけられるので実施の段階に於いては、これらの帯水層の経時的な水質変化を確認した上で新たな検討を加え、必要に応じて水処理計画等の立案が望まれる。

Table 4-15 SUMMARY OF POOR WATER QUALITY

| No. | District | Aquifer | Depth | Poor Item |
|---|---|---|---|---|
| 6 | Bang Yai | NON-aqf | 170 | Turbidity,Fe, Mn |
| 11 | Bang Phli | PRA-aqf | 134 | Total-Solids |
| 12 | Bang Bo | NAK-aqf | 160 | Odor,Total-Solids,Cℓ |
| 13 | Bang Bo | PRA-aqf | 135 | Total-Solids |
| 14 | Bang Phli | NAK-aqf | 160 | Total-Solids |
| 16 | Min Buri | NAK-aqf | 160 | Total-Solids |
| 18 | Nong Chok | PRA-aqf | 72 | Total-Solids |

NOTE : NON-aqf : Nonthaburi Aquifer
NAK-aqf : Nakhon Luang Aquifer
PRA-aqf : Phra pradaeng Aquifer