

## 2 調査結果のまとめ

### 2-1 チベットの地熱資源状況と電力事情

### 2-2 地表調査

#### 2-2-1 地質調査

##### (i) 地質層序及び基盤岩調査

地表踏査によって地質層序と基盤岩調査を行い、中国側の地質調査の結果が追認された。今回の調査で特に、基盤岩である念青唐古拉群は、南東側（地溝帯側）の白亜紀花崗岩及び白亜系とマイロナイト帯で接しており、羊八井地域は構造帯に生成していることを確認した。

##### (ii) 地質構造と断裂系調査

変位量の大きい断層を図2-2-5に示し、断層F1～F10と呼称する。これらの断層は中期更新世以降の地層を変位させていることから活断層と認定される。これらの断層は、羊八井地域の地殻変動（断層活動）が活発であることを示している。

当地域で変位量が最も大きい断層は断層F2で、断層F3とともに断層帯を構成する。断層F2は右横ずれを伴う東南東傾斜の正断層で、下盤側には幅50m以上にわたって小断層を多数生じている。

念青唐古拉山脈の南東側に発達する地溝帯は、南からNNE-SSW走向で当地域に達し、羊八井地域でNE-SW走向に屈曲してさらに北東に続いている。当地域に発達するNNE-SSW系及びNE-SW系断層は、地溝帯の南部と北部をそれぞれ形成している断層系であり、羊八井地域で両断層系が交差していると考えられる。

##### (iii) 肉眼観察結果に基づいた変質帯調査

羊八井北部地域の地表地熱徴候として、①約85℃の硫黄を伴う噴気帯、②50℃以上の地温を示す高温地域があげられる（図2-2-5）。前者は断層F2沿い、断層F3と断層F5の交差部付近に分布する。後者は江温拉托の西側に、走向N10°W・長さ150mにわたって分布する。

羊八井北部地域の熱水変質帯は更新世砂礫層に広く分布し、非変質～極く弱い粘土化帯、粘土化帯、及び珪化帯の3帯に区分され、珪化帯は熱水上昇の中心域と推定される（図2-2-6）。

##### (iv) 岩石薄片顕微鏡観察

岩石薄片顕微鏡観察により念青唐古拉山脈と地溝帯の地質境界は花崗岩マイロナイト帯であり、羊八井地域はこの構造帯上に生成していることを確認した。

##### (v) X線分析結果に基づいた変質鉱物分帯

羊八井北部地域で同定された熱水変質鉱物は、酸性熱水条件で生成する鉱物が主体であり、原岩の残存鉱物等も検出されている。

変質鉱物の産出状況と鉱物組み合わせから、当地域の変質帯は、流体上昇域の中心から周辺側に向かって、珪化帯→明ばん石帯→ディッカイト帯→カオリナイトB帯→カオリナイトA帯→スメクタイト帯の6帯に分帯される。珪化帯や明ばん石帯は流体

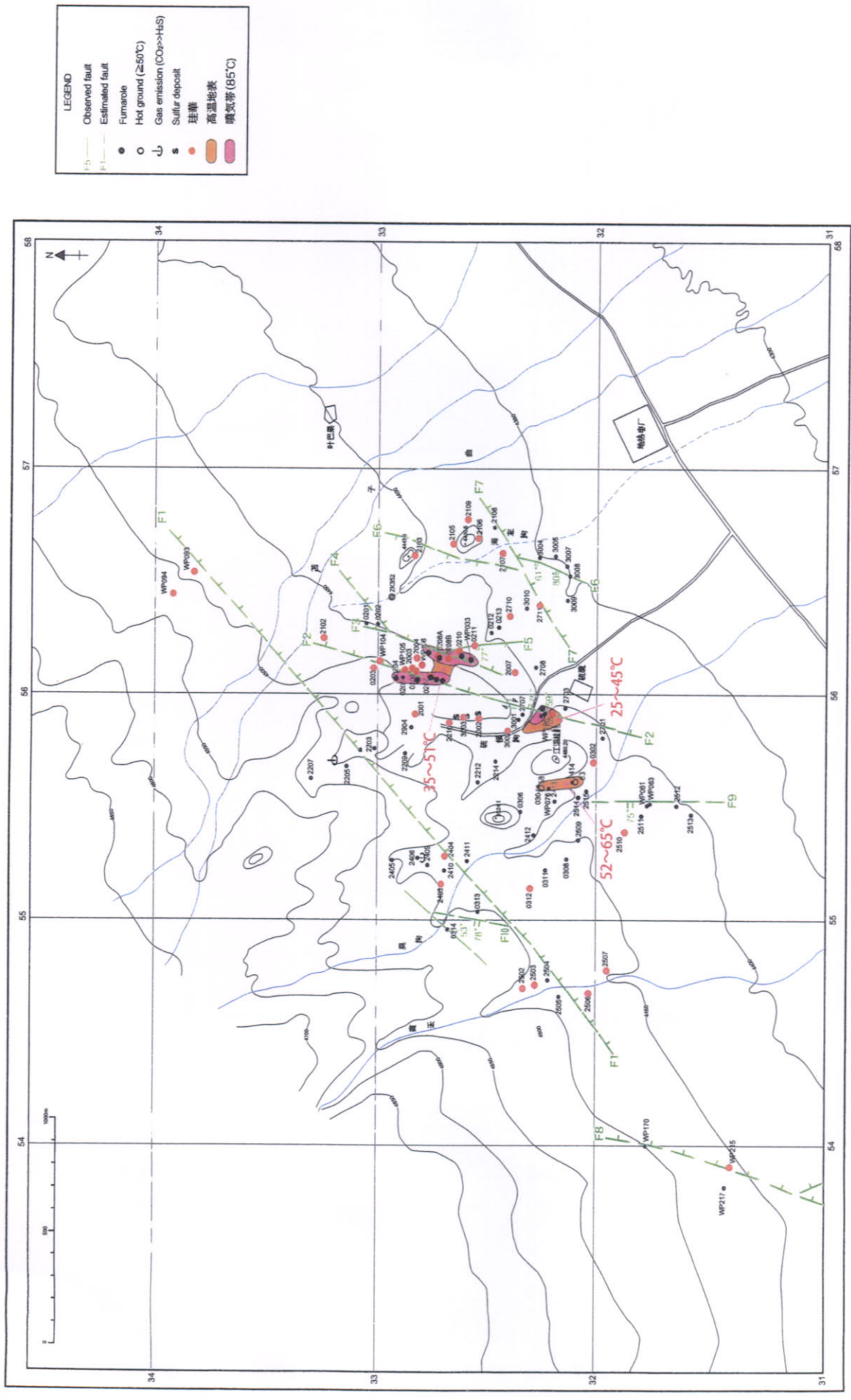


图 2-2-5 羊八井地熱区域的主要斷層及び地熱地表特徵地分布図

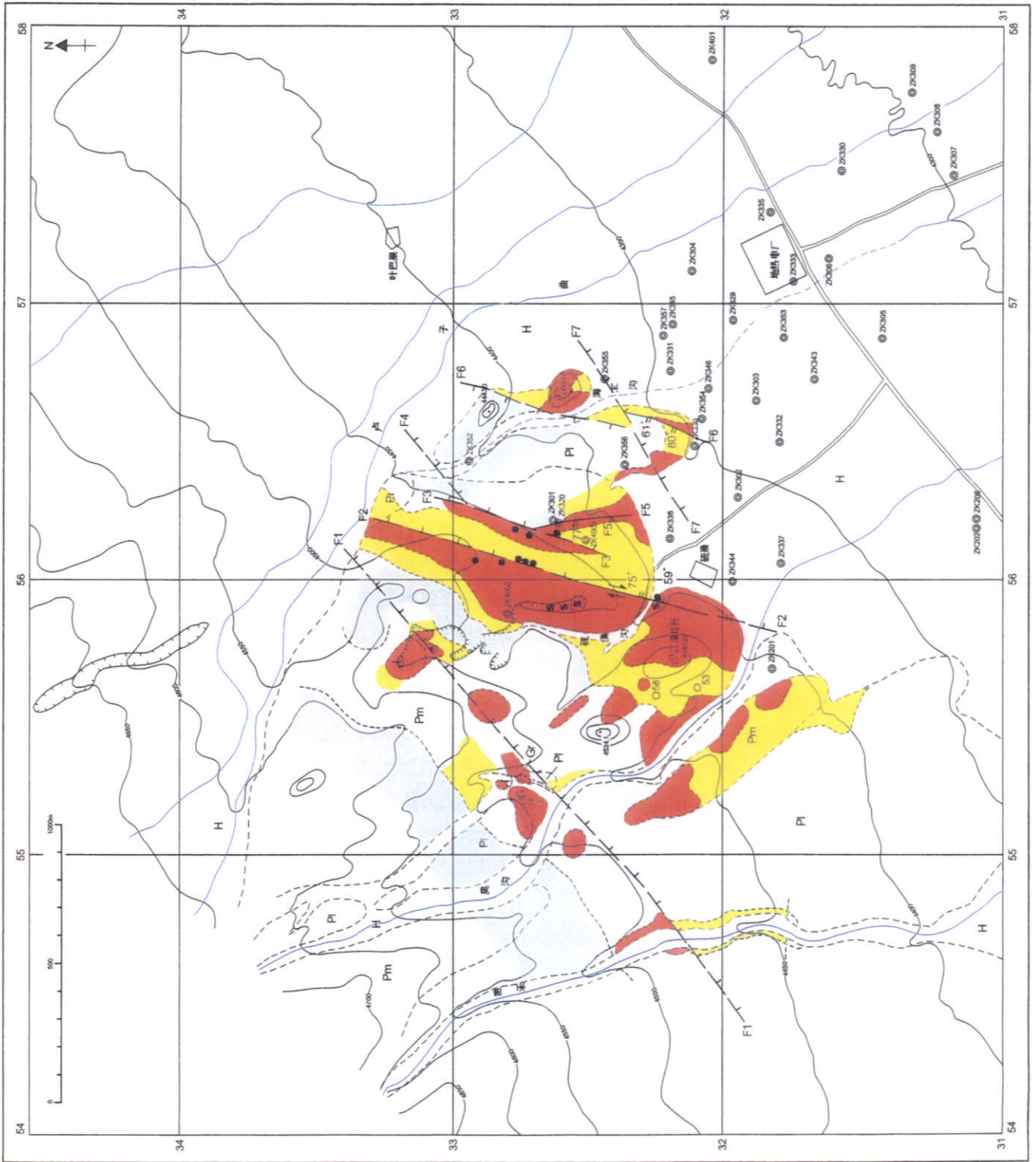


图 2-2-6 羊八井地热地域变质带分布图

上昇域の中心を示す。

変質帯は広範囲に分布するが、現在の地表地熱徴候（図2-2-5）と変質帯分布から、当地域の主要な熱水上昇域は、NNE-SSW 方向に伸張した断層F2に沿う地域であることが分かる。

(vi) 熱ルミネッセンス (TL) 発光強度測定

発光強度値が低い地域は、断層F6沿いと断層F1沿いである。また、ZK4001付近（断層F3延長部）とZK4002付近にやや低い箇所が分布する。これらの地域は地下からの熱的影響が強い可能性がある。

(vii) 流体包有物測定

包有物の形状から現在の地熱活動により生成した包有物は type 1 と type 2 であり、type 1 が最新期と考えられる。当地域には、全域に type 1 が生成していることから、最新期の熱水活動は全域に及んでいた事が分かる。断層F2の東西両側には type 1 と type 2 のみを産し古期の包有物が消失している地域がある。これがこの地域の熱水の活動度が高かったことを示す可能性がある。

## 2-2-2 地化学調査

### (i) 浅部熱水の起源

$\delta D$  と Cl 濃度、Cl 濃度と比エンタルピーの関係から、現在の羊八井地域の浅部熱水は、ZK4001 周辺の深部熱水と地表水の混合により生成していると考えられる。

### (ii) 浅部貯留層における北部地域から南部地域への熱水流動

ガス濃度分布、 $^3H$  濃度分布、Cl 濃度と比エンタルピーの関係、Cl 濃度と  $^3H$  濃度の関係、 $\delta D$  と  $\delta^{18}O$  の関係などから次の傾向が確認された。

- ・1996年頃は、浅部貯留層内の北部地域から南部地域への流体の流動が、熱水の比エンタルピーと Cl 濃度の相関から確認できた。すなわち北部地域から南部地域に向かって Cl 濃度と比エンタルピーが共に減少している。
- ・2001年の浅部熱水の Cl 濃度は、北部地域と南部地域で同じである。南部地域の ZK313 は比エンタルピーが低く、伝導冷却が認められる。
- ・1982年以前には、噴気活動による蒸気放出のため浅部熱水が部分的に濃縮して Cl 濃度の高い熱水が認められた。
- ・現在は地表の噴気や温泉がなくなり、Cl 濃度の濃縮は起こっていない。
- ・2001年の浅部熱水は、浅部貯留層内部でさらに地表水や還元熱水によって混合している事実は認められない。

以上の傾向と事実から、現在の羊八井地域浅部の流体流動を推定した。

- ・浅部貯留層の熱水は ZK4001 周辺の熱水を起源水とし、地表水との混合で生成した。
- ・2001年の Cl 濃度及び水の同位体比から、浅部貯留層への流体及び熱の供給は、ZK4001 周辺の深部熱水と地表水が混合した北部地域から供給される熱水のみと考えられる。
- ・1996年頃の Cl 濃度と比エンタルピーの関係から、1996年頃までは浅部熱水は北部地域から南部地域へ流動していた。

- ・1996年頃までは浅部貯留層内部で地表水と熱水の混合が認められたが、2001年の浅部貯留層は、地表水を直接引き込んでいない。
- ・1996年と2001年のCl濃度と比エンタルピーの関係を比較すると、2001年のZK313熱水は伝導冷却が認められることから、北部地域から南部地域への熱水流動は、2001年には非常に少ないもしくは存在しない可能性がある。
- ・ $^3\text{H}$ 濃度経時変化から、2001年の北部地域の生産流体は、主生産地域の北部への移行による貯留層圧力の低下に伴い、周辺の古い熱水が北部地域へ戻ってきた流体である可能性がある。

### (iii) 浅部貯留層の現状

北部地域から供給される浅部熱水の供給量は、現状の浅部貯留層からの生産量に対し不足している。南部地域では流体温度の低下が認められるが、この温度低下は冷たい地表水を引き込んで起こる急激な温度低下ではない。北部地域においても熱水供給の不足が認められ、現在は周辺地域から北部地域へ流体が流動している可能性がある。

### (iv) 地化学平衡シミュレーション結果

計算の結果、各生産井の深部換算熱水は、流入点における状態において方解石に不飽和で、深部換算熱水が鉱物沈殿を起こさないまま伝導で100℃まで冷却した場合においても方解石に不飽和である。ただし、フラッシュ後の100℃の熱水組成の場合では方解石に過飽和となる。従って、貯留層内流体がフラッシュした場合には、方解石が熱水から沈殿する可能性があり、これは実際に浅部井で坑井内に方解石スケールが沈殿している事実と調和している。

## 2-2-3 電磁探査 (MT法)

### (i) 調査概要

調査の諸元は、以下のとおりである。

- ① 広帯域MT法 (リモートレファレンス方式) で4測線、60点で測定。
- ② 測定成分は水平電場2成分( $E_x, E_y$ )、水平磁場2成分( $H_x, H_y$ )。
- ③ 電場ダイポール長は70m、測定周波数は100Hz~1,000秒、測定時間は20時間以上。

### (ii) 2次元解析 ((図2-2-42参照))

2次元解析は、Smith and Booker (1991)のRRI法による2次元インバージョンにより実施した。

比抵抗断面図では次の特徴が認められた。

- ① 測線Aでは、測線の東側(測点A13からA18付近)の地表下数百mには $10\Omega \cdot \text{m}$ 以下の低比抵抗層が認められる。
- ② 測線Bでは、測点B13を境に、比抵抗構造に差異が認められる。
- ③ 測線Cでは、測点X03~04に地表付近から比抵抗不連続域が認められるが、この不連続域は地表下約1.5km(標高約3km)から不明瞭となる。

比抵抗平面図では次の特徴が認められた。

- ① 標高4,200m(地表下約300m)では、 $10\Omega \cdot \text{m}$ 以下の低比抵抗域は測線B、Cの南西部に限られ、 $100\Omega \cdot \text{m}$ 以上の高比抵抗層は測線B、Cの東端に認められる。



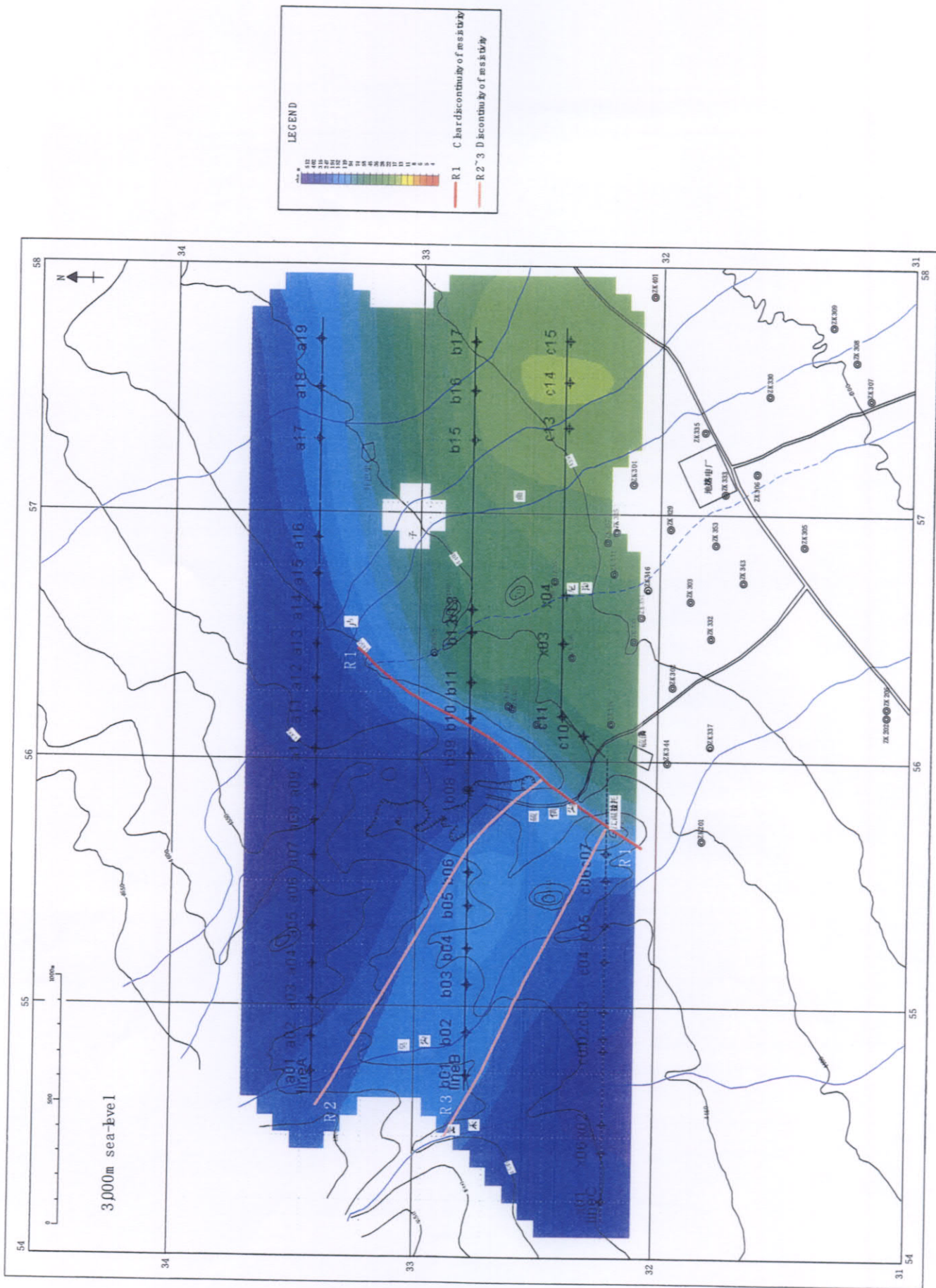


图 2-2-4-2 羊八井地熱地域の標高3,000mにおける比抵抗分布と比抵抗不連続線

- ② 標高 4,000m(地表下約 500m)では、 $10\Omega\cdot\text{m}$  以下の低比抵抗域は、測線 A、C に限られ、 $100\Omega\cdot\text{m}$  以上の高比抵抗層は測線 B にのみ認められる。
- ③ 標高 3,800m(地表下約 700m)では、数  $\Omega\cdot\text{m}$  以下の低比抵抗域が測線 C で認められる。 $100\Omega\cdot\text{m}$  以上の高比抵抗域が測線 B の中心部に出現する。
- ④ 標高 3,500m(地表下約 1,000m)では、測点 A16 と測点 B12 を通る方向と、測点 B06 と測点 C04 を通る方向に、いずれも NE-SW 方向の顕著な比抵抗の不連続が認められる。また、測点 B06~A03 の高比抵抗層中に、それとほぼ直交する NW-SE 方向の弱い不連続性が認められる。
- ⑤ 標高 3,000m(地表下約 1,500m)では、標高 3,500m で 2 本存在した NE-SW 方向の比抵抗不連続線は、当該深度では 1 本の明瞭な不連続線となる。また、この標高においても測点 B06~A03 に NW-SE 方向の弱い比抵抗不連続域が認められる。
- ⑥ 標高 2,500m(地表下約 2,000m)では、標高 3,000m まで認められた NE-SW 方向の比抵抗不連続は、測点 B08~C07 を通る NS 方向に変わる。高比抵抗層中の NW-SE 方向の不連続域は不明瞭となる。また、測点 C13~15 付近に  $10\Omega\cdot\text{m}$  以下の低比抵抗域が出現する。

### (iii) 3次元解析

3次元解析は、Smith and Booker (1991)の RRI 法による 3次元インバージョンにより実施した。

各測線とも 2次元解析結果とほぼ同様の比抵抗分布を示すが、2次元解析結果に比べ平滑化が進んだ比抵抗分布となっており、2次元解析で検出された比抵抗不連続帯は、同一方向の緩やかな比抵抗変化として解析されている。

解析周波数を 50Hz までとしたため、地表付近の変質に伴う低比抵抗域は再現されていないが、1km より深い高比抵抗を示す花崗岩類の構造は捉えられており、2次元解析と同様、北側から南側に向けて花崗岩類の分布範囲が狭まる傾向が認められる。また、花崗岩類内部の比抵抗値も南側ほど低くなる。

平面図の地表下 300-400m 間では、測線 C と測線 A の中央部で小規模な低比抵抗域が認められる。地表下 900-1,000m 間では、地域西部に  $100\Omega\cdot\text{m}$  以上の高比抵抗域が見られるが、2次元解析結果と同様に、この高比抵抗層中に NW-SE 方向の弱い比抵抗変化が認められる。この不連続域はこの区間にのみ認められることから、規模の大きな構造とは言えない。地表下 1,400m からは、高比抵抗域が NE-SW 方向の伸びを示す比抵抗構造をもって東部の中比抵抗域と接している。この比抵抗構造は地表下 2,000m からは消失している。

## 2-2-4 2002年2月時点での地熱系モデルと CJZK3001の掘削位置の検討

以下には、2002年2月時点での地熱系モデルの考え方と、それに基づく調査井(CJZK3001)の掘削位置の検討について述べる。

### (i) 地熱流体の流動が顕著な断層

熱水流動が強い断層は断層 F 2 (断層帯)であり、その北西(下盤)側が透水性が高いと推定される。

断層 F 2 (断層帯)は、電磁探査の 2次元解析で硫黄村付近に当地域の最も顕著な

NNE-SSW 性比抵抗不連続線として検出される (図 2-2-42)。この不連続線は標高 4200m (ほぼ地表) から標高 2500m まで確認され、北西側の高比抵抗域と南西側の低比抵抗域の境界となっている。また、重力調査によると、重力値は北西側から南東側に向かって低くなるが、同じく硫黄村付近に NNE-SSW 方向の密度不連続線が分布している (図 2-2-43)。この密度不連続線も断層 F 2 (断層帯) の存在を示すものと考えられる。

この他、変質帯及び変質鉱物帯の分布によると、当地域西部に明ばん石帯等の NW-SE 方向の分布が認められる。この変質帯に変位量の大きい断層は確認されていないが、NW-SE 系の断層は地域内で最も頻度が高い断層系であること、電磁探査 2 次元解析で西部に 2 本の NW-SE 性の比抵抗不連続線 (R2 及び R3) が存在すること、及び重力調査でも西部に 3 本の NW-SE 性の密度不連続線 (G4、G5、G6) が存在することから、これらの強変質帯の地下に地熱流体が流動する断層が存在する可能性もある。また、断層 F 6 に沿っては珪化帯及び明ばん石帯が分布することから、地熱流体の流動が存在する可能性がある。

#### (ii) 熱源、地下温度構造及び地熱流体の上昇域

中国側の地下温度分布図によると、標高 4200m、4000m、3800m における羊八井北部地域の高温度域は、標高によってほとんど変わらずに硫黄村北西地域から ZK4001、ZK320 にかけての NE-SW 方向に約 1.5km 程伸張する地域にある。高温の中心の温度は、標高 3800m において 250℃ 以上である。したがって、熱水対流の上昇域はこの高温域であると考えられる。

#### (iii) 調査井(CJZK3001)の掘削位置の検討

第 2 次現地調査と第 1 次国内作業の結果、高温の地熱流体の上昇域は断層 F 2 (断層帯) に沿う NNE-SSW ないし NE-SW 方向に伸長した地域であり、この地域が深部地熱開発上最も有望な地域であると結論された (図 2-2-44~46)。

この結論に基づいて、新規調査井の掘削目標 (ターゲット) と掘削地点は次の通り考えられる。

#### ●掘削目標：

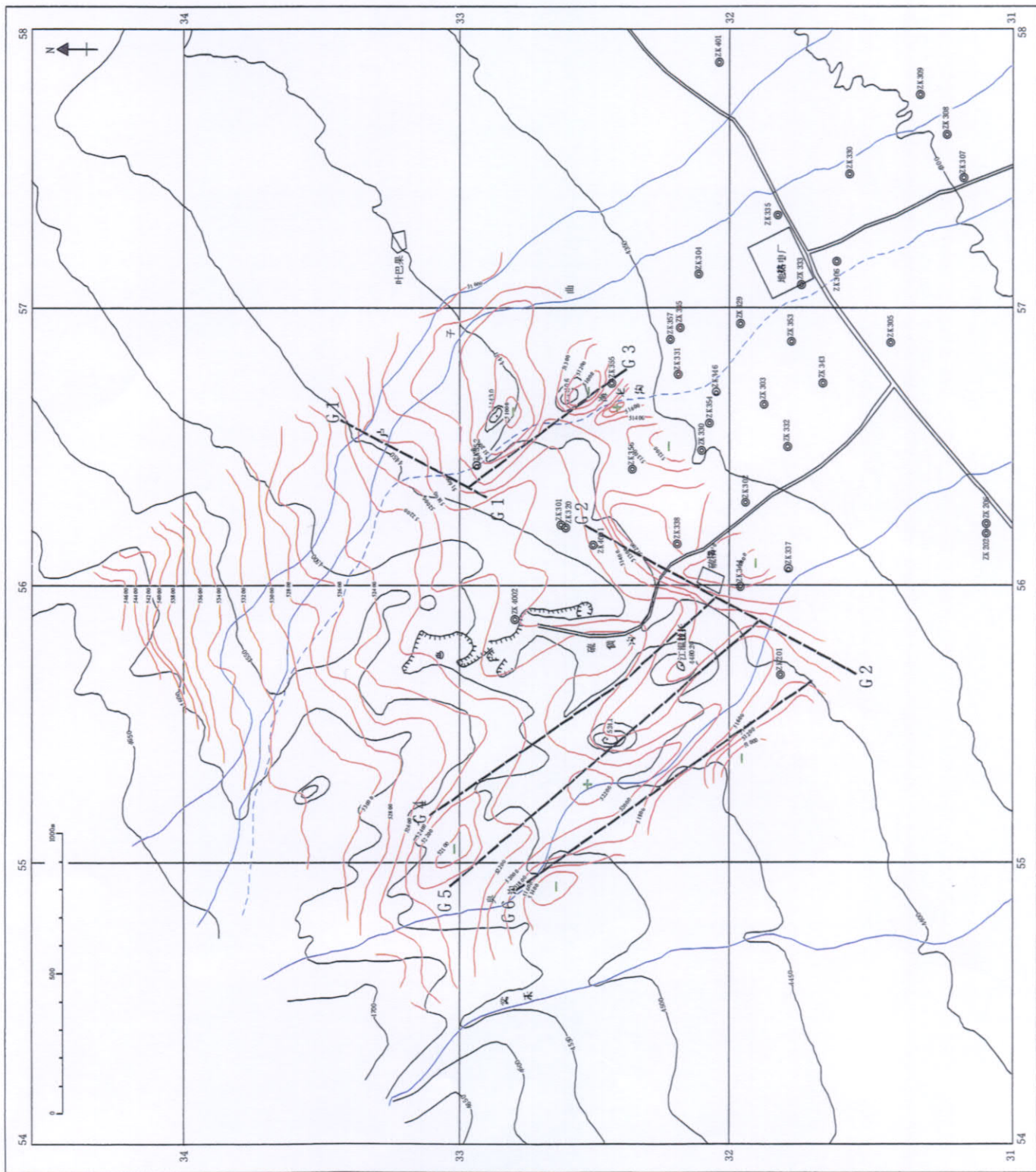
- ① 標高 3,800m 以浅に知られる高温域で、NNE-SSW 性の断層 F 2 (断層帯) とこれに相当すると見られる比抵抗不連続線並びに密度不連続線の深部に推定される深部地熱流体の上昇通路に到達するように掘削する。
- ② 断層 F 2 (断層帯) は右横ずれを伴う正断層で南東方向に 70° ほど傾斜している。このため断層は深部で南東側にずれるので、断層の南東 (上盤) 側から掘削するのが有利である。

#### ●坑口位置：

- ① 浅部貯留層を通過する際には多くの逸泥が発生すると予想される。掘削が短期間で確実に行えるように浅部貯留層の逸泥が小さい地点が望ましい。
- ② 傾斜掘りに使用するダウンホールモーターの耐熱上の理由から、キックオフ深度 (KOP) の地下温度が低い地点が望ましい。

以上の基本的な考え方については、2001 年 12 月の第 3 次現地調査 (前期) において、中国側と協議した結果合意が得られた。坑口位置、ターゲット位置、坑井仕様の詳細は





LEGEND

- + High gravity anomaly
- Low gravity anomaly
- - - Gravity discontinuity
- assumed density: 2.5g/cm<sup>3</sup>

图2-2-43 羊八井地熱区域、ブーゲー重力異常図(西藏自治区地質鋁山局物探大隊, 1993)



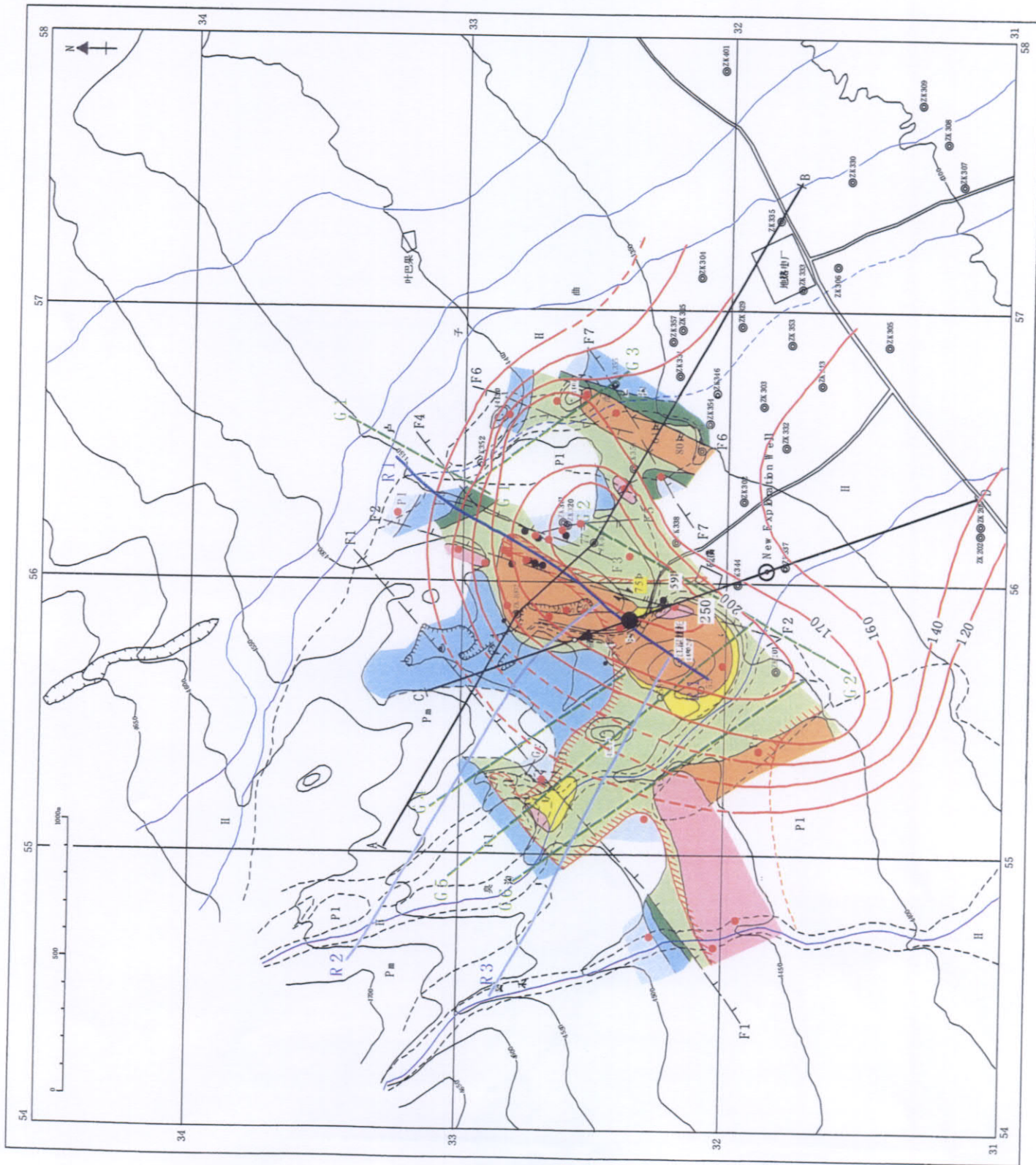


图2-2-44 羊八井地熱地域調査総括図 (2002年2月時点)