

向、南東に約 30 度の傾斜を持つ速度構造の急変する面が存在する。この面は正断層の性質を持つ剪断帯で、「念青唐古拉韌性剪断帯(NSZ)」と名づけられている。NSZ は厚さ数 km に及ぶとされる。羊八井地域では CJZK3001, ZK4001, ZK4002 及び ZK352 で出現するマイロナイト分布域が NSZ に相当し、NSZ 上面の深度や傾斜は当地域の深部貯留層の深度や傾斜とほぼ一致する (図 2-7-2、4)。しかし NSZ は 8~5 Ma の韌性的剪断帯でマイロナイトを形成したものであり、脆性的破壊とは異なりそれだけでは地熱貯留層を形成する亀裂群にはなりにくい。一方、羊八井地域には 5 Ma から現代まで活動している高角度正断層が多数分布している。おそらく NSZ 上面の滑動しやすい部分が高角度正断層と交わる部分で亀裂群が発達して深部貯留層を形成しているものと考えられる。また、この高角度正断層がさらに深くに達する部分が、深部の熱源付近からの地熱流体の上昇経路になっていると考えられる。

② 地表調査で確認された断層

地表調査で、10 条 (F1~F10) の断層が確認された (図 2-7-3 (1),(2))。断層は 3 系統 (NNE-SSW 系, NE-SW 系, N-S 系~NNW-SSE 系) あり、いずれも第四系を切っている。これらの断層に沿う地熱流体の流動の程度は、噴気・変質帯の有無、熱水変質の程度等によって評価される。熱水流動が活発と評価される断層は F2 であり、その北西側の透水性が高いと推定される。

③ 物理探査から推定される断層

断層 F2 は、比抵抗構造及び重力構造にもあらわれている。MT 探査の 2 次元解析により検出された、硫黄村付近の顕著な NNE-SSW 系の比抵抗不連続線は、断層 F2 の反映と考えられる (図 2-7-3 (1),(2))。この比抵抗不連続線は、地表付近から深度 1,700m 付近まで延びていることが推定され、北西側の高比抵抗域と南東側の低比抵抗域の境界をなす。重力探査結果により検出された、硫黄村付近の NNE-SSW 方向の密度不連続線は、断層 F2 の存在を示すものと考えられる。断層 F6 は、これに沿って珪化帯及び明ばん石帯が分布することから、F6 にそって地熱流体が流動している可能性を示す (図 2-7-3 (1),(2))。

2-7-2 熱源

INDEPTH の共通中間点反射法地震探査等の調査結果によると、羊八井地域の地下 14~18km の深度を上面とした部分溶融体が存在する (図 2-7-4)。このマグマが根源的な熱源である。羊八井地熱地域の熱源の考え方は以下の①、②の 2 つある。

- ① 地下 14km の溶融体の温度を 700℃と仮定すると、そこから地下 6 km 程度の深度までは熱伝導で熱が伝わるとすれば、地下 6 km の温度は約 300℃となる。地下 6 km 以浅では流体の対流が発生して、地下約 2 km においてもほぼ同じ 300℃となっている。
- ② 地下 14~18km の深度からマグマが局所的に上昇して羊八井の地下 6 km 程度のところにマグマ溜りを形成し、現在は冷却して固結し 400℃程度の高熱岩体が存在している。これが羊八井の直接的な熱源となり、それより浅部では熱水対流が発生している。

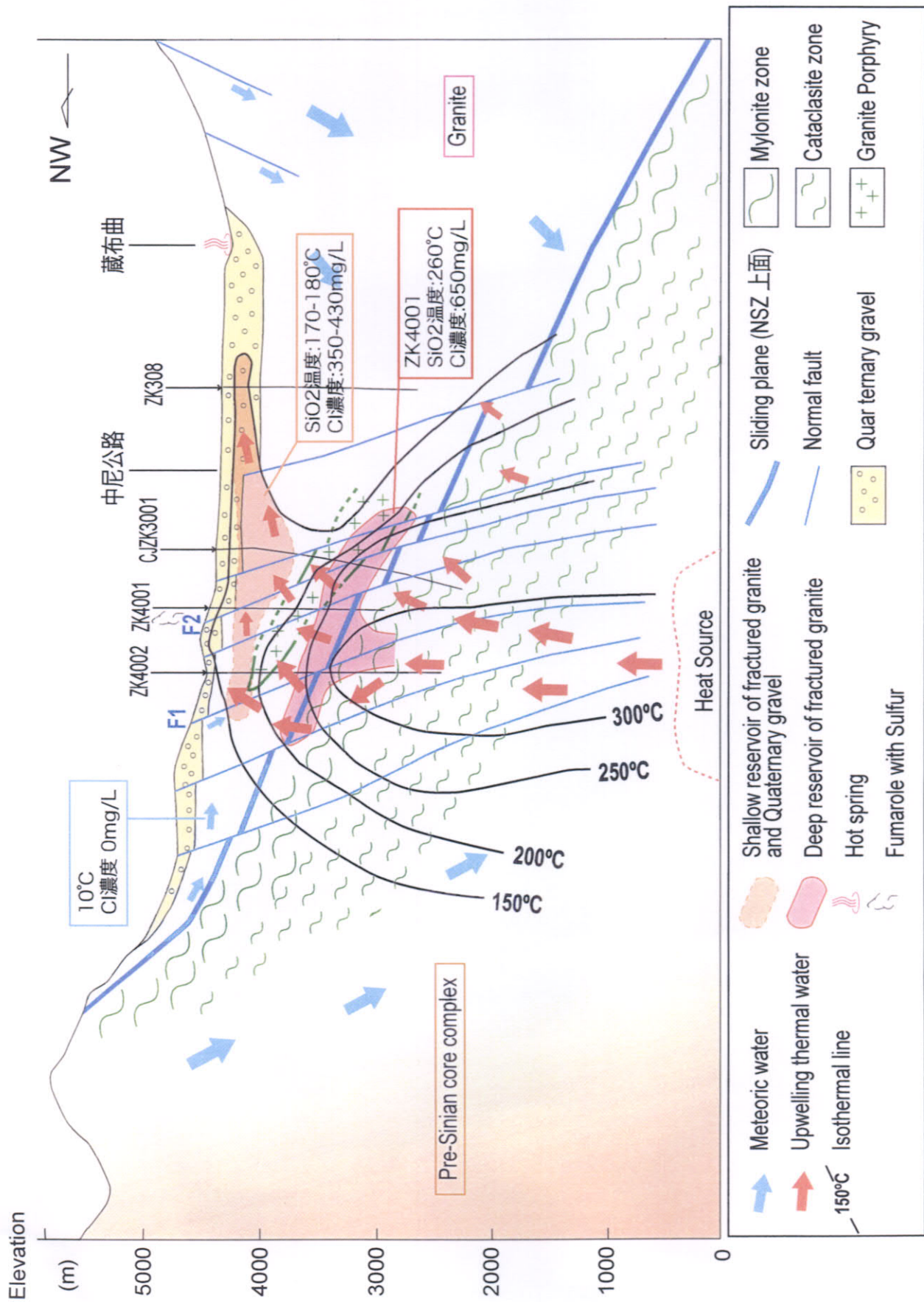
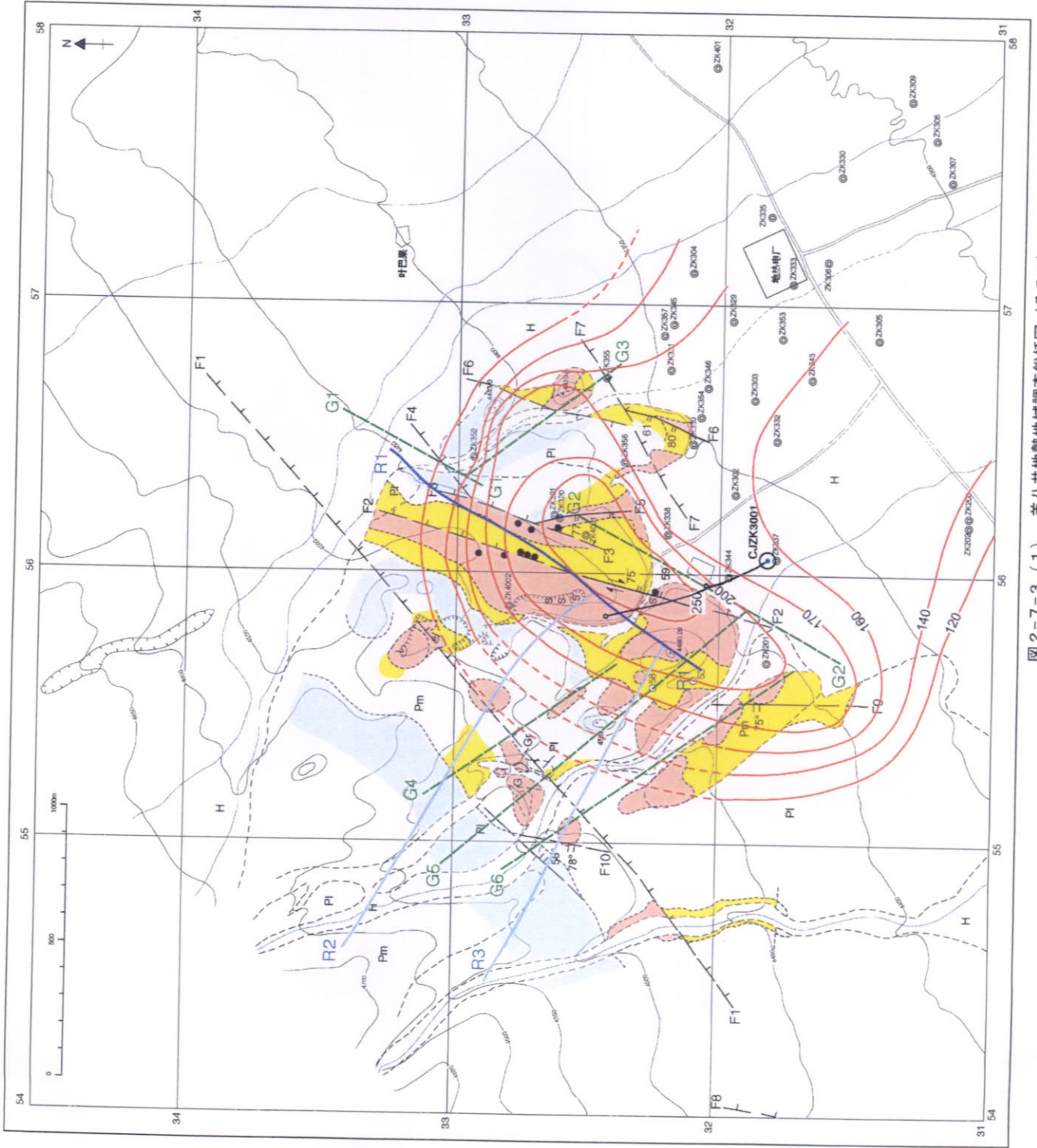


图2-7-2 羊八井地熱田水熱系統概念模型圖



LEGEND

- Silicified zone
- Argillic alteration zone
- Non-argillic alteration zone~
Very weak argillic alteration zone
- Observed fault
- Estimated fault
- Fumarole
- Hot ground (< 50°C)
- Gas emission (CO₂>>H₂)
- Boundary of formation
- Boundary of alteration zone
- Sulfur deposit
- Discontinuity of gravity (assumption density: 2.5g/cm³)
- Subsurface temperature distribution at 3,800m sea-level
- Clear discontinuity of resistivity
- Discontinuity of resistivity

CJK3001 and sidetrack

图 2-7-3 (1) 羊八井地熱地域調査總括図 (その 1)

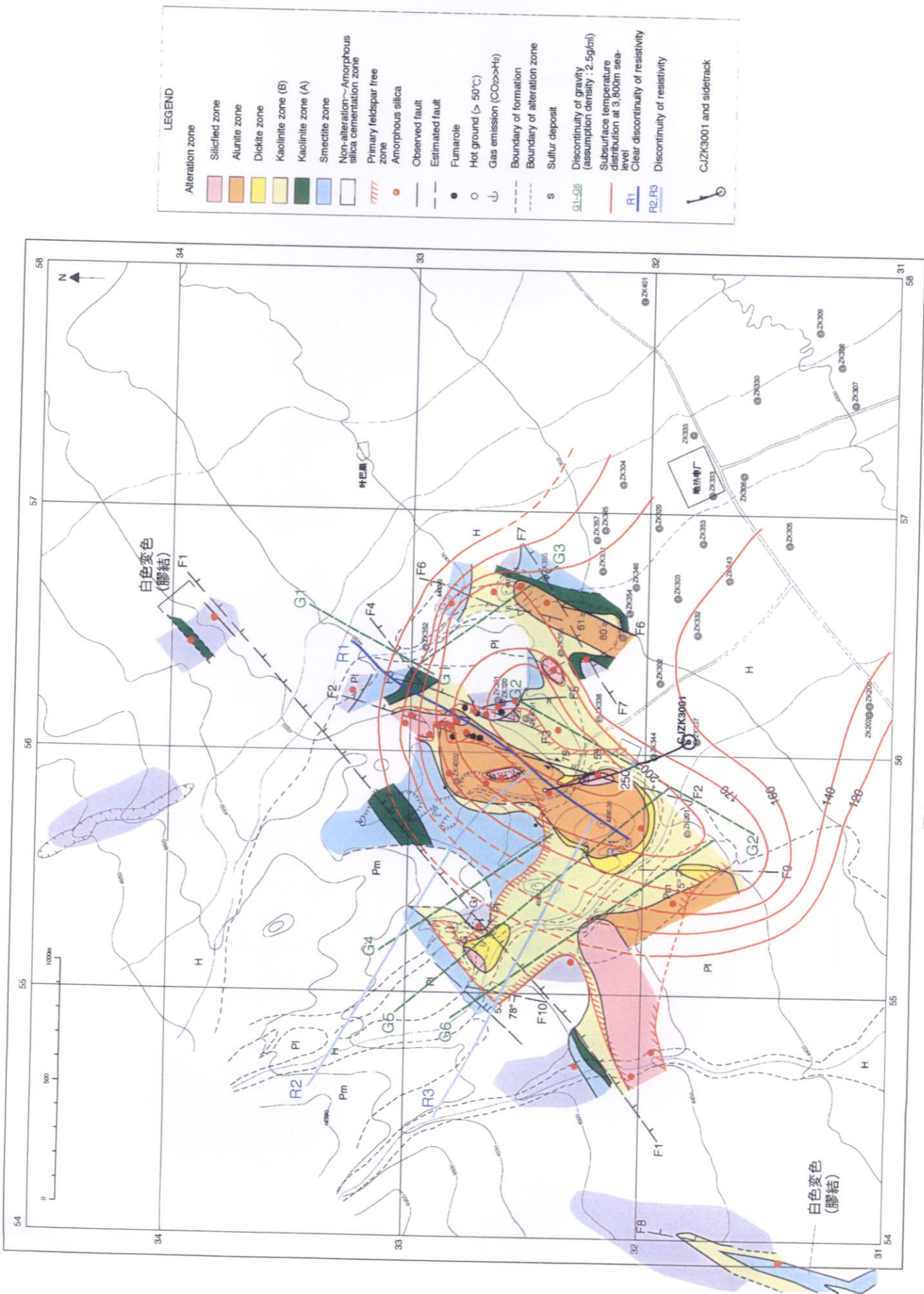
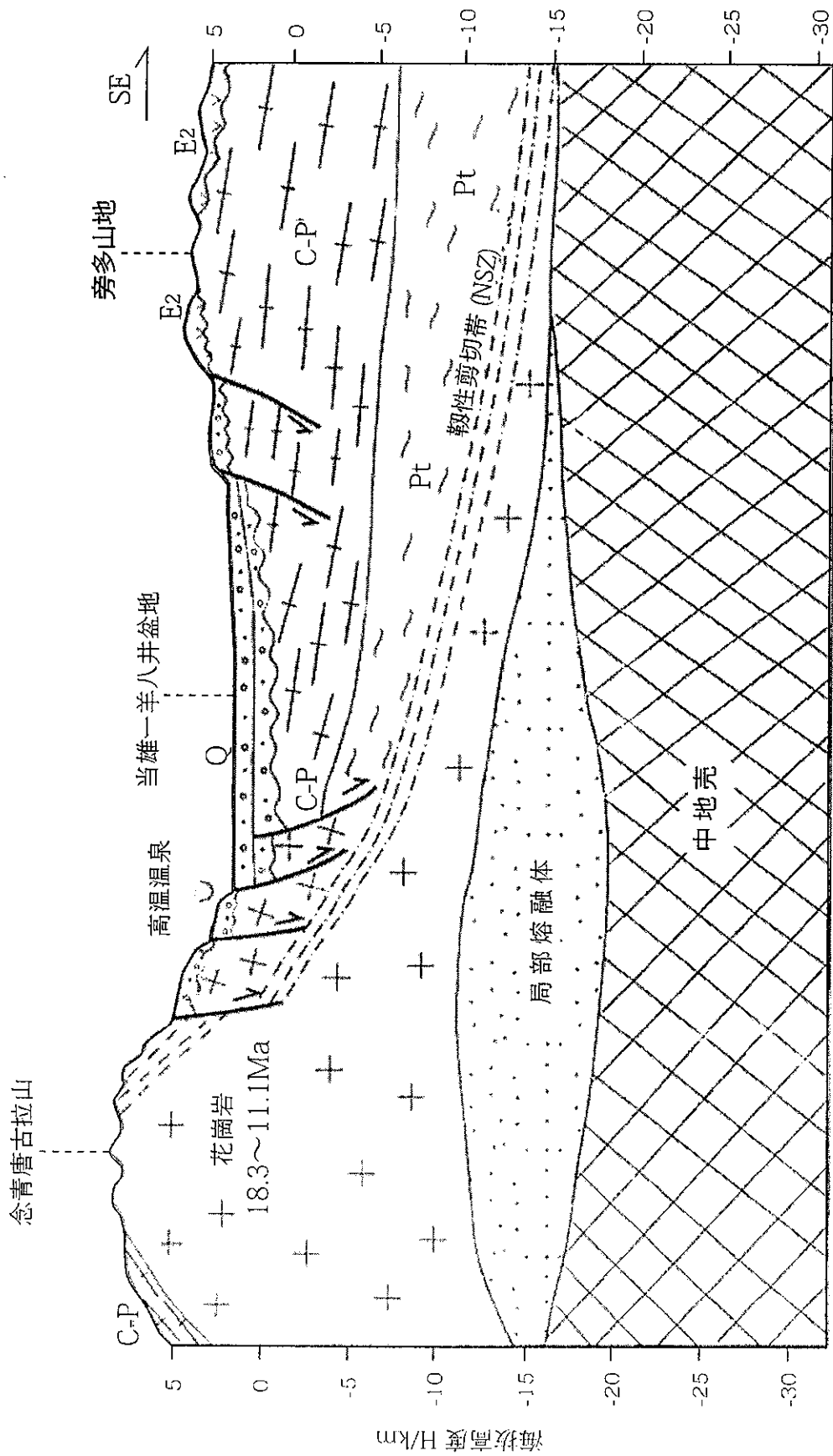


图 2-7-3 (2) 羊八井地熱地域調査総括図 (その 2)



Q: 第四系
 E2: 始—渐新统
 C-P: 石炭—二叠系
 Pt: 元古代

图 2-7-4 当雄-羊八井盆地活动断裂构造模式图

出典: 吴珍汉·叶培盛·胡道功等(2003)

2-7-3 地下温度分布

羊八井地域は浅部井が多数掘削され、浅部の温度分布は明確である。標高 3,800m レベルにおける高温域は、硫黄村北西地域から ZK4001, ZK320 にかけての NE-SW 方向に 1.5km ほど伸張する分布を示す。中心温度は 250℃ 以上であり、断層 F2 を含む地域がもっとも高温である (図 2-7-3 (1), (2))。この温度分布から、高温の地熱流体が上昇する地域は、断層 F2 に沿う NNE-SSW ないし NE-SW 方向に伸張した地域と推定される。

本地域の深部井は ZK308(1,726.41m), ZK4001(1,459.09m), ZK4002(2,006.8m) 及び CJZK3001(2,254.5m) である。ZK308 は南部地域に、それ以外は北部地域に掘削されている。本地域の実測最高温度は最北に位置する ZK4002 の 329.8℃ (深度 1,850m) である。ZK4002 はおよそ深度 1,000m 以深で 300℃ 以上の高温を示す。ZK4001 と CJZK3001 は 300℃ には達せず、最高温度はそれぞれ 251.02℃ (深度 1,125m), 270.87℃ (深度 1,404m) である。両坑井と ZK4002 と距離は約 400m であり、300℃ 以上の高温域は ZK4002 に深部に限定される。一方、最も南に位置する ZK308 の深部は深度 1,700m で 150℃ 以下とかなり低い。これは、羊八井地域の主流体上昇域が北部にあることを示す (図 2-7-2)。

2-7-4 地化学モデル

羊八井地熱貯留層では深部と浅部の地熱流体の性質が異なる。深部熱水は高温で Cl 濃度が高く、深部から直接上昇した流体である。浅部熱水は深部熱水と地表水(または地表付近に滞留している温泉水)が混合して形成されたものである。これらを総合すると (図 2-7-2), 羊八井地域の地熱熱水は、羊八井の周辺地域から地下深部に浸透した河川水や雨水が深部の熱源で過熱されて深部熱水を形成した。深部熱水は羊八井北部の地下深くに達する高角度正断層に伴う高浸透率帯に沿って上昇し、NSZ 上面の滑動しやすい部分と高角度正断層が交わる深度 1,000~1,300m 付近で低角度に広がる深部貯留層を形成した。深部貯留層からはさらに高角度正断層に沿って深部熱水が上昇し、上昇途中で周辺から流入して来た地表水または温泉水と混合して浅部熱水を形成した。浅部熱水は地形と流体の圧力傾斜に沿って浅部で北部から南部に流動して浅部貯留層を形成している。

2-7-5 地熱系概念モデル

図 2-7-2 に本地域の地熱系概念モデルを示した。

羊八井地熱地域は念青唐古拉山脈南麓と唐山山脈北麓に位置する伸展性断層によって形成された羊八井-当雄盆地に位置する。

地表付近には第四系砂礫層と古第三系火砕岩類が薄く分布し、下位には花崗岩類が分布する。花崗岩中には約 8~5 Ma に形成された北東走向・南東傾斜 30 度の念青唐古拉韌性剪断帯(NSZ)が存在し、北部の深部井では NSZ に相当するマイロナイト帯を貫通する。一方、地表で観察される高傾斜角の正断層群はその近傍に変質帯と噴気を伴い、地下深部からの流体供給経路となっている。

本地域の地下 14~18km にはマグマが存在する。一方で、ZK4002 の深度 1,000m 以深

では 300℃以上の高温域（深度 1,850m で最高 329.8℃）となっており、局所的に浅部にマグマ溜まりを形成している可能性がある。

本地域では地下熱源によって加熱された高温流体が ZK4002 深部から上昇し、NSZ 近傍に発達した高透水性ゾーンで Cl 濃度 650mg/l、シリカ温度 260℃の深部貯留層を形成している。さらに、NSZ と高角度正断層群が交差している箇所から流体が上昇し、その一部は地表水と混合し、大規模な酸性変質帯や珪華などを形成した。北部地域で地表水と深部熱水の混合によって Cl 濃度 350-430mg/l、シリカ温度 170-180℃の浅部貯留層流体が形成され、南東部へ側方流動し 150℃前後の浅部貯留層を形成している。

2-7-6 地熱データベースの作成と利用

羊八井地域は 1970 年代から現在まで各種の調査がなされており、非常に多くの調査データが蓄積されている。また地熱発電所の運転に伴う各種データも非常に多い。しかし、これらのデータは書類として整理されているのみなので、地熱貯留層構造の解析や貯留層評価に際しては非常に使いにくい。将来もさらに多くのデータが蓄積される。そこで、本開発計画調査ではコンピュータを利用した地熱データベースを作成し、このデータベースを利用して地熱系モデルの検討や貯留層評価の仕事を行った。データベースソフトは日本の地熱技術開発株式会社が開発し、日本でも広く利用されている G★BASE を利用した。

2-8 地熱資源量評価

2-8-1 資源量評価の方法

開発前の自然状態の地熱貯留層では、熱源による加熱によって生じた浮力によって駆動される自然対流により、地下深部から熱が運ばれている。また、蒸気生産、熱水還元による質量変化に伴い圧力変化と流動の変化が生じ、結果的に貯留層内の圧力と温度の変化が生ずる。地熱資源の適切な開発計画の検討には、このような地下での変化を適切に定量化した数値モデルによるシミュレーション解析が不可欠である。

今回は、以下の 3 段階の 3 次元シミュレーション解析により、羊八井地熱地帯における最適な開発計画の検討を行った。

- ① 自然状態シミュレーション解析
- ② ヒストリーマッチングシミュレーション解析
- ③ 挙動予測シミュレーション解析

自然状態シミュレーション解析は、開発前の貯留層内に発達する自然対流を再現し、予測解析の出発点となる初期状態を確定するものである。自然対流の発達状況は、貯留層内外の温度分布に反映されるので、今回は、開発前の温度分布の再現を、3 次元貯留層シミュレーションにより行った。これにより、貯留層内の 3 次元透水性分布などの定量的な推定が可能になった。

ヒストリーマッチングは、自然状態シミュレーション解析で得られた 3 次元数値モデルを用い、生産、還元に伴う貯留層の圧力、温度変化を 3 次元モデル上で再現し、予測解析の出発点を確定する作業である。この過程で、貯留層内の 3 次元透水性分布等が更

に精緻化される。今回は、羊八井での発電記録から推定した蒸気生産量をモデルに与え、貯留層の温度、圧力経時変化を再現し、それが、当地域において知られている現象と定性的に符合するかどうかを確認した。

挙動予測シミュレーションは、自然状態シミュレーション解析、ヒストリーマッチングにより精緻化された 3 次元モデルに坑井内流動モデルを併用して、種々の開発計画下での圧力、温度変化、並びに蒸気生産量変化を予測するものである。これにより、種々の開発計画の優劣が定量化される。今回は、現状の開発をそのまま継続した場合や ZK4001 などの深部井を稼働させた場合、更に発電出力を増強した場合など、種々の開発計画について、貯留層の温度、圧力や各生産井の蒸気生産能力の経時変化と追加井の必要時期と本数などについて解析を行った。

2-8-2 地熱貯留層の数値モデル

(i) 解析範囲・グリッド分割 (図 2-8-3, 図 2-8-4)

流体の流動方向に関する誤差を最小にするため、地域の最大流動方向と解析範囲の座標軸が同じなるように座標軸を N30° W に設定した。

北西-南東間方向の解析範囲は念青唐古拉山脈及び南東地域の唐山山地の分水嶺とした。北東-南西方向の解析範囲は、北西-南東方向の解析範囲と同程度の十分な大きさに設定した。深度方向は、羊八井地熱地域の平均的な海拔 4,300m を上面とし、下面は深部井に影響を及ぼさないよう十分深い海拔 0m とした。解析範囲は、(NE-SW)×(NW-SE)×(DEPTH)=2.91km×5.48km×4.3km である。

グリッドは、温度勾配が大きい開発地域の中央部は小さく分割し(最小ブロック 100m×300m×50m)、貯留層を囲む周辺エリアについては大きく分割した。また、複数の生産井の流入点在同一のブロックに入らないように分割した。

(ii) 初期温度・圧力分布

初期温度分布は、地表で 10℃、解析範囲の下限の海拔 0m で 170℃の線形内挿により求めた。

(iii) 境界条件

上方境界は、流体・熱の移動に関して開放系となるように設定した。

側方境界は、流体及び熱の移動に関して閉鎖境界とした。

下方境界は下面全域に 0.10W/m²の熱流束を設定した。また、流体流入を深部からの流体が ZK4001 および ZK4002 の深部の断層沿いに上昇するように設定した。流入量は最終的に 50kg/s と設定した。

(iv) 岩石物性値

岩石物性値は、基本的に CJZK3001 のコア物性試験(2005)を参照した。

(v) 浸透率分布

浸透率分布は、流体の流動モデル、地表の変質帯分布及び温泉分布などの調査結果を基にして作成した後、自然状態シミュレーション及びヒストリーマッチングシミュレーションで改善した。最終的な浸透率分布を図 2-8-7, 10, 16, 20 に示す。

2-8-3 自然状態シミュレーション

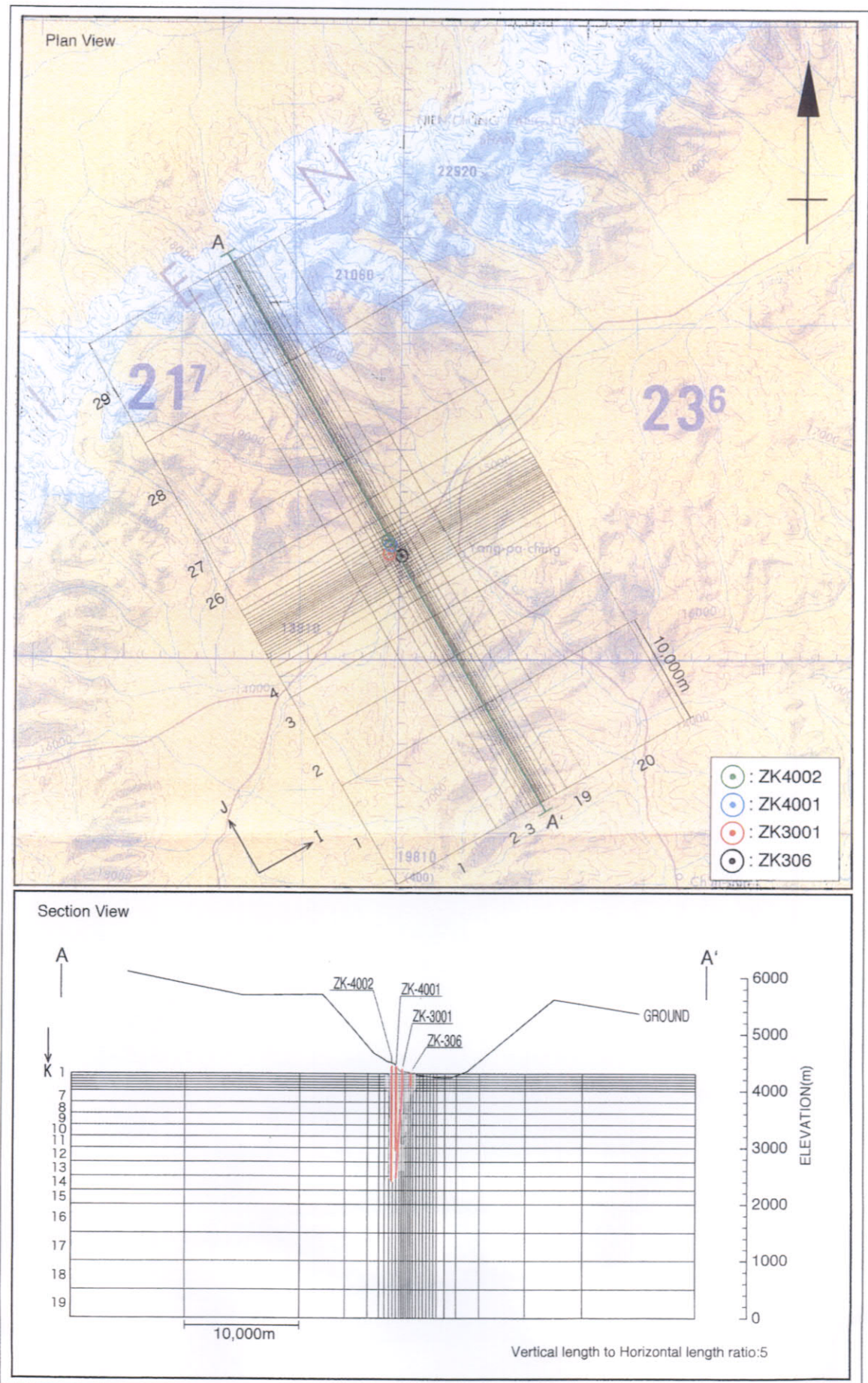


図2-8-3 解析範囲とグリッド分割 (全体)