

2-8 地熱資源量評価

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。

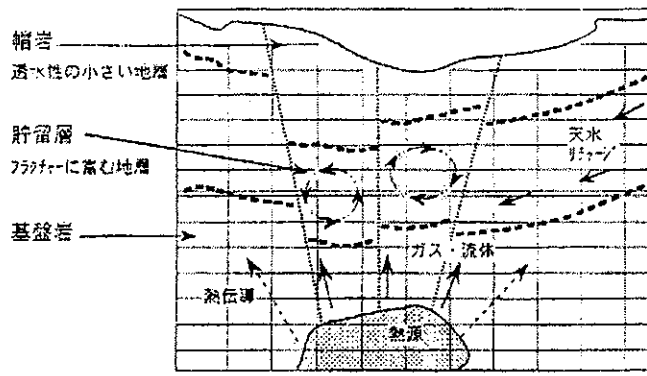
これらのシミュレーション解析のイメージと流れを図2-8-1に示す。また、解析の基礎となる3次元数値モデル作成のフローを図2-8-2に示す。

2-8-2 地熱貯留層の数値モデル

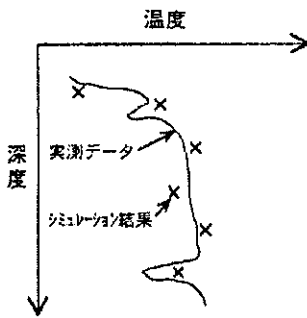
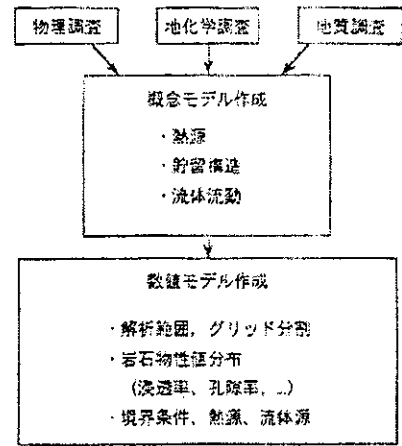
- (i) 解析範囲・グリッド分割 (図2-8-3, 図2-8-4)

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。

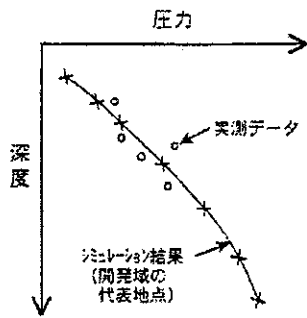
山脈(分水嶺)を挟んだ地域間において、山脈を越える流体の大きな流動はないと考



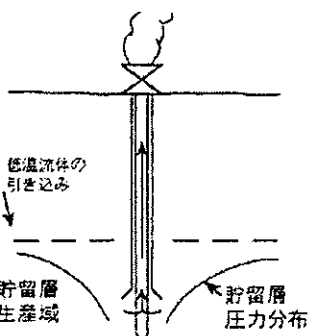
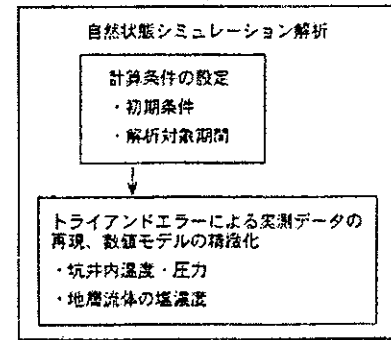
地熱系概念モデルとグリッド分割



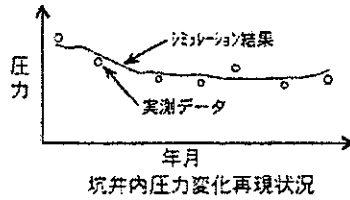
坑井内温度再現状況



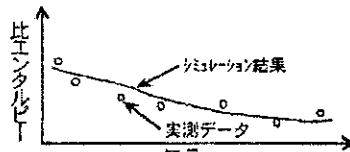
貯留層圧力再現状況



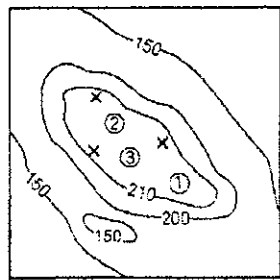
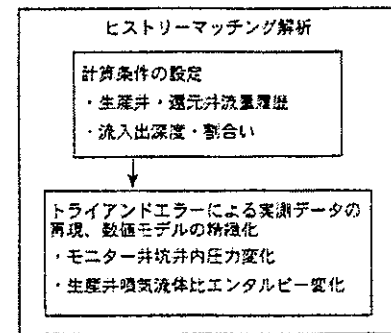
生産井周辺の状況



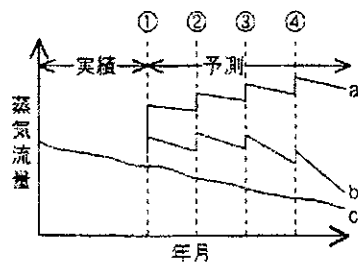
坑井内圧力変化再現状況



噴気流体比エンタルピー変化再現状況



生産井補充位置



地域合計のタービン入口蒸気流量予測結果

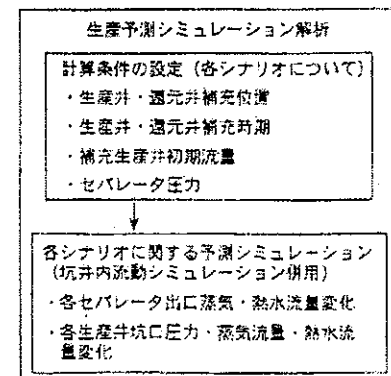


図2-8-1 シミュレーション解析のイメージと流れ

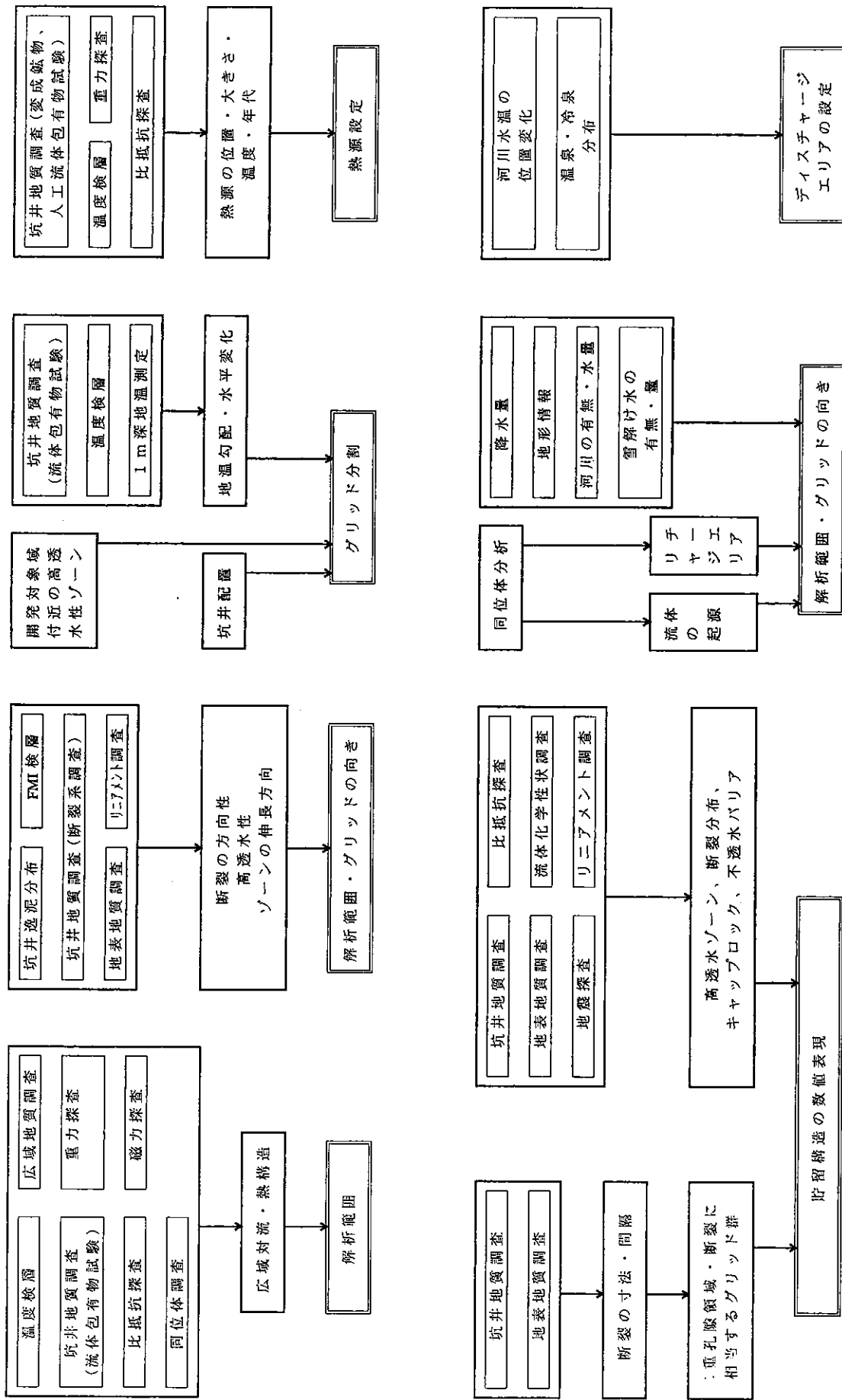


図 2 - 8 - 2 地熱貯留層数値モデル作成のフロー

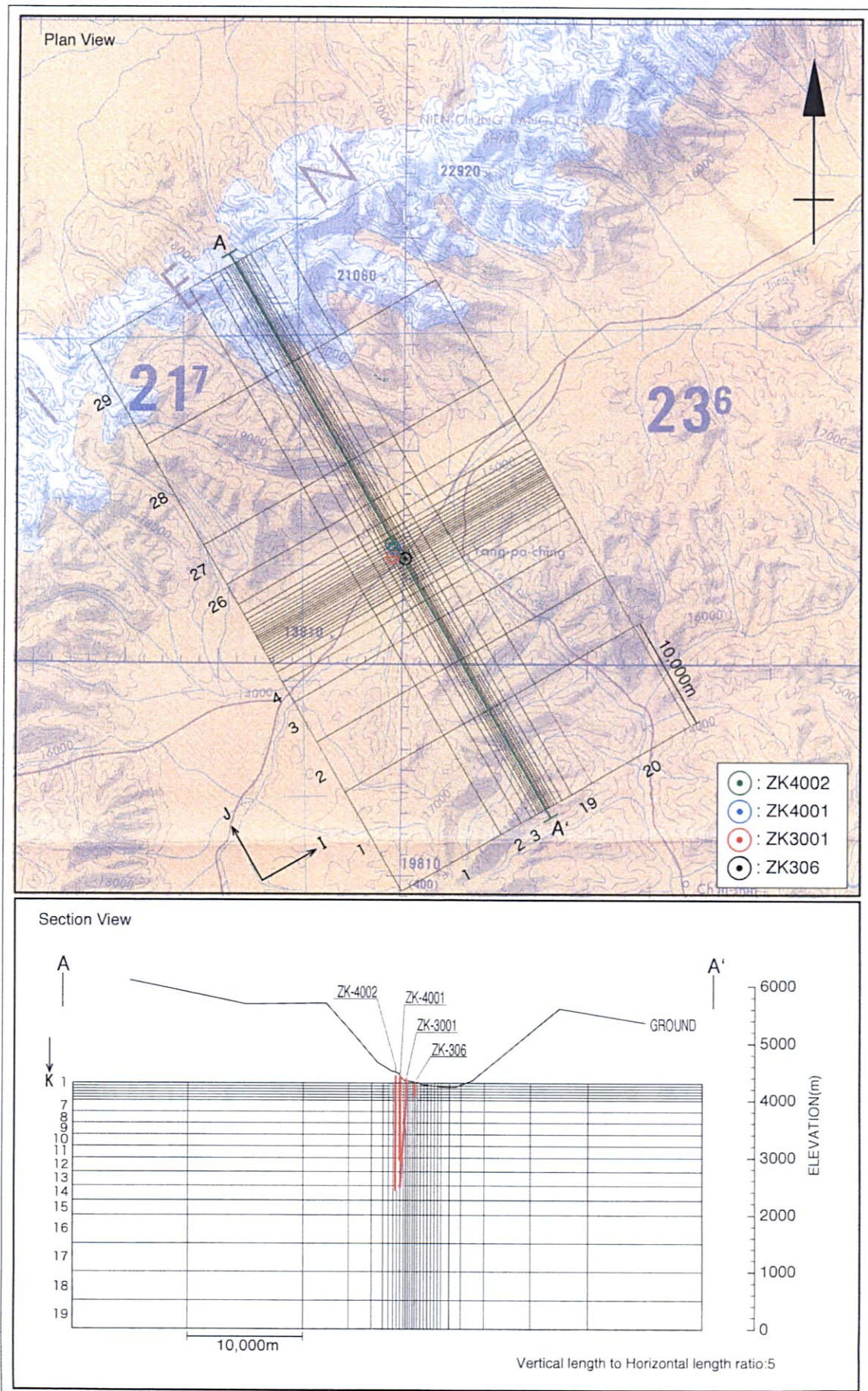
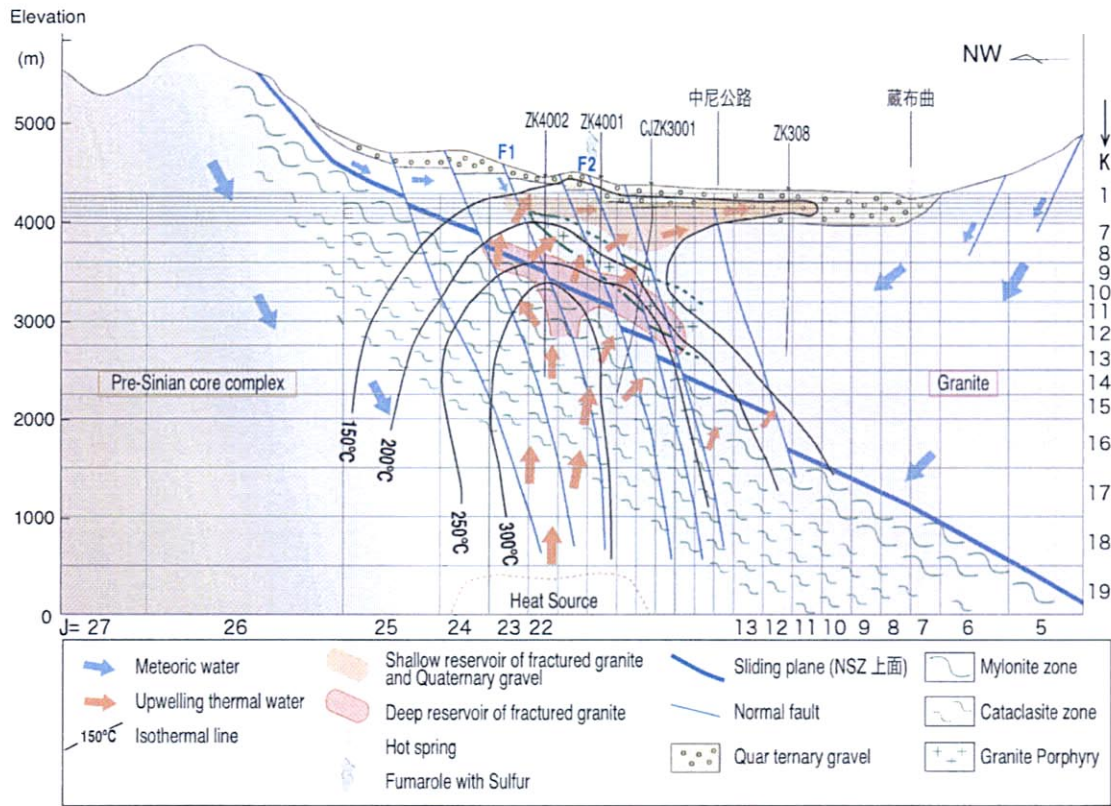


図2-8-3 解析範囲とグリッド分割（全体）



羊八井地熱田水熱系統概念模型図

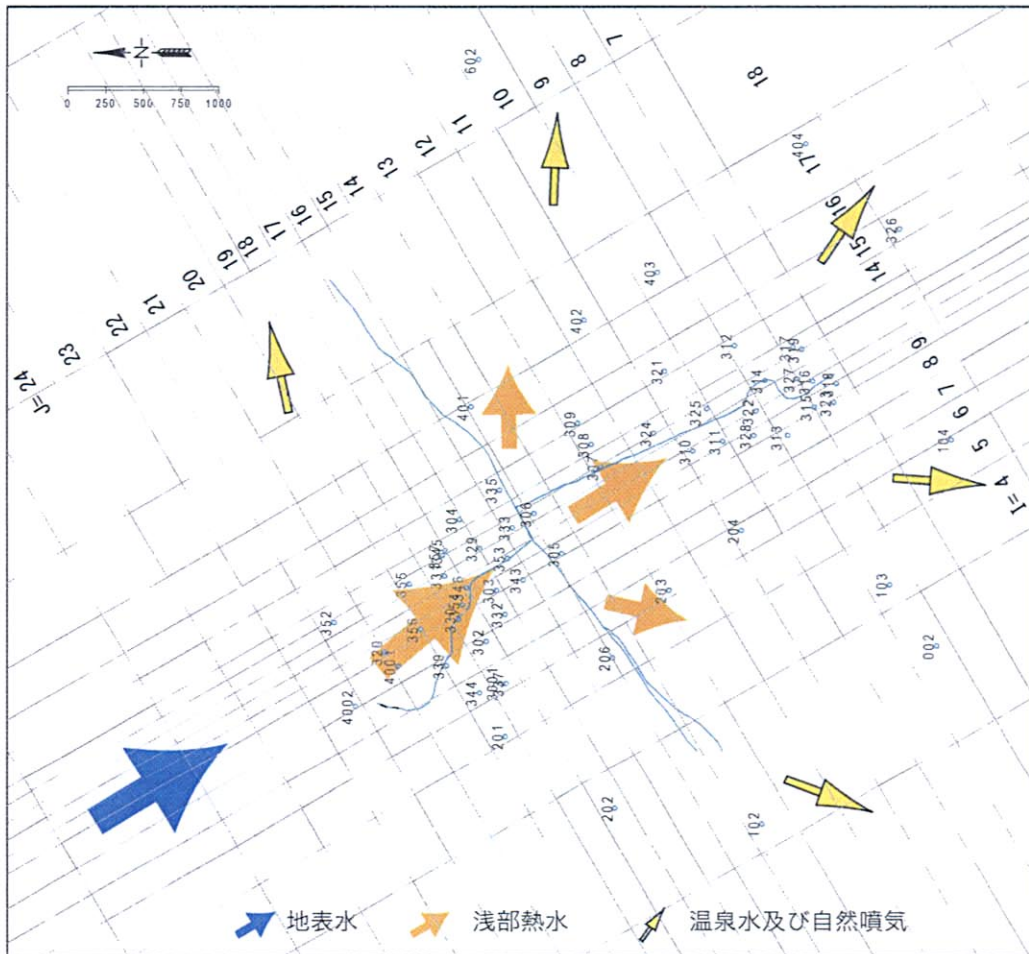


図2-8-4 解析範囲とグリッド分割 (中央)

えられる。そこで、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。一方、中尼公路又は蔵布曲に沿った北東－南西方向は、北西－南東方向に比べて近隣に大きな山脈はなく、また地表の地熱兆候分布の境界も不明瞭である。そこで、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、 $(NE-SW) \times (NW-SE) \times (DEPTH) = 2.91\text{km} \times 5.48\text{km} \times 4.3\text{km}$ 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

熱伝導タイプの坑井内温度分布を示す坑井より、平均的な温度勾配は 3.7℃/100m 程度と見積もられる。本地域の平均的な海拔 4,300m の地表温度を 10℃とすると、解析範囲の下面である海拔 0m へ温度勾配から外挿して求められる温度は 170℃となる。これから初期温度分布は、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。

初期貯留層圧力は、地下水の水頭が地表にあると仮定して、上記の貯留層温度分布の静水柱圧力より初期貯留層圧力分布を決定した。なお、大気圧は、本地域の平均的な大気圧 0.06MPaA を用いた。

(iii) 境界条件

(1) 上方境界

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。地表面が解析範囲の上限である海拔 4,300m より上部にある場合は、地表から海拔 4,300m までの静水柱圧力を設定し、温度については上方境界を 10℃に設定した。一方、地表面が解析範囲の上限の海拔 4,300m より下部にある場合の地表面の標高は、海拔 4280m 程度であり、地表と解析範囲の上面との差 20m は無視できる。本解析では、地表面が解析範囲の上限の海拔 4,300m より下部にある場合の地表面の標高は 4300m とし、上面に大気圧 0.06MPaA 及び大気温度 10℃の境界条件を設定した。上方境界の圧力分布を図 2-8-5 に示す。

(2) 側方境界

側方境界は、以下の根拠を基に流体及び熱の移動に関して閉鎖境界とした。

- ① 側方境界は開発地域から十分に遠く離れている。
- ② 北西－南東方向については、解析範囲を分水嶺に設定しているため、これより外側より流体が流入する量はほとんどないと考える。

(3) 下方境界

下方境界は、熱伝導タイプの坑井内温度分布における坑井の平均的な温度勾配 3.7℃/100m 及び基盤層の熱伝導率 3.0W/m·K から、下面全域に 0.10W/m² の熱流束を設定した。また、流体流入を図 2-8-6 に示すように、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。流入量は自然状態シミュレーションにおけるキャリブレーションより最終的に 50kg/s と設定した。

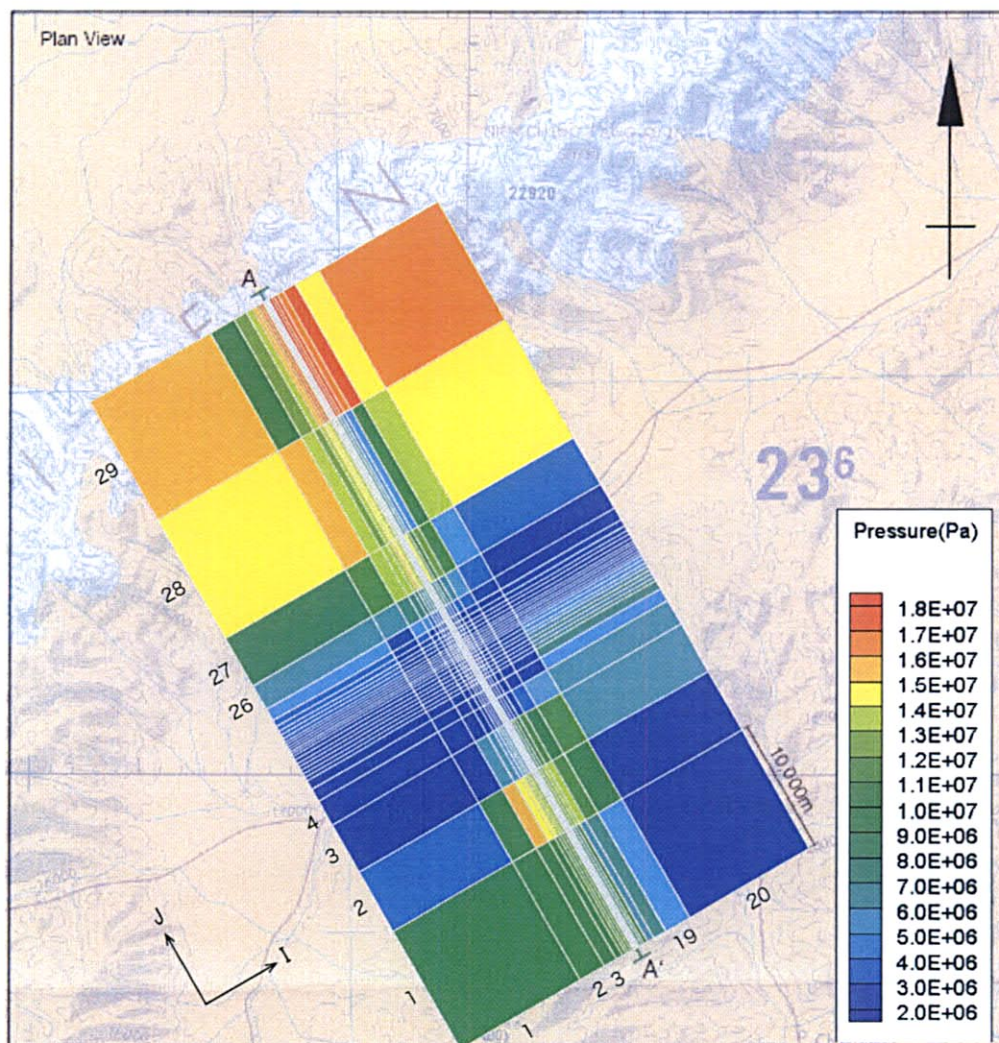
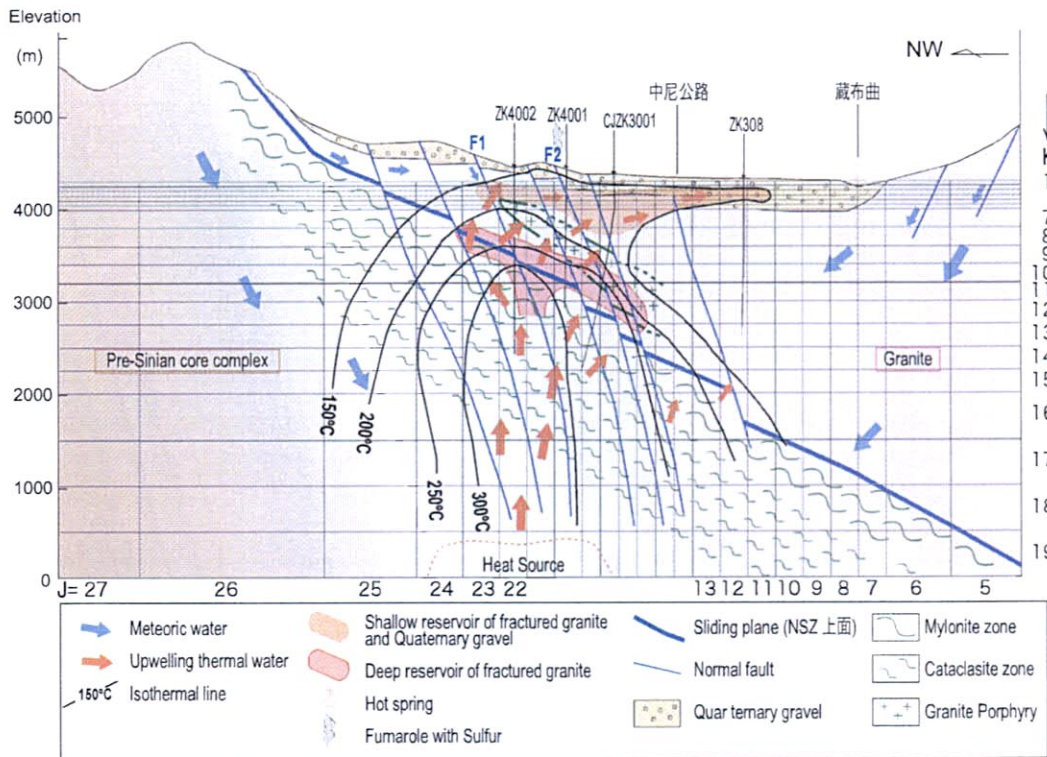
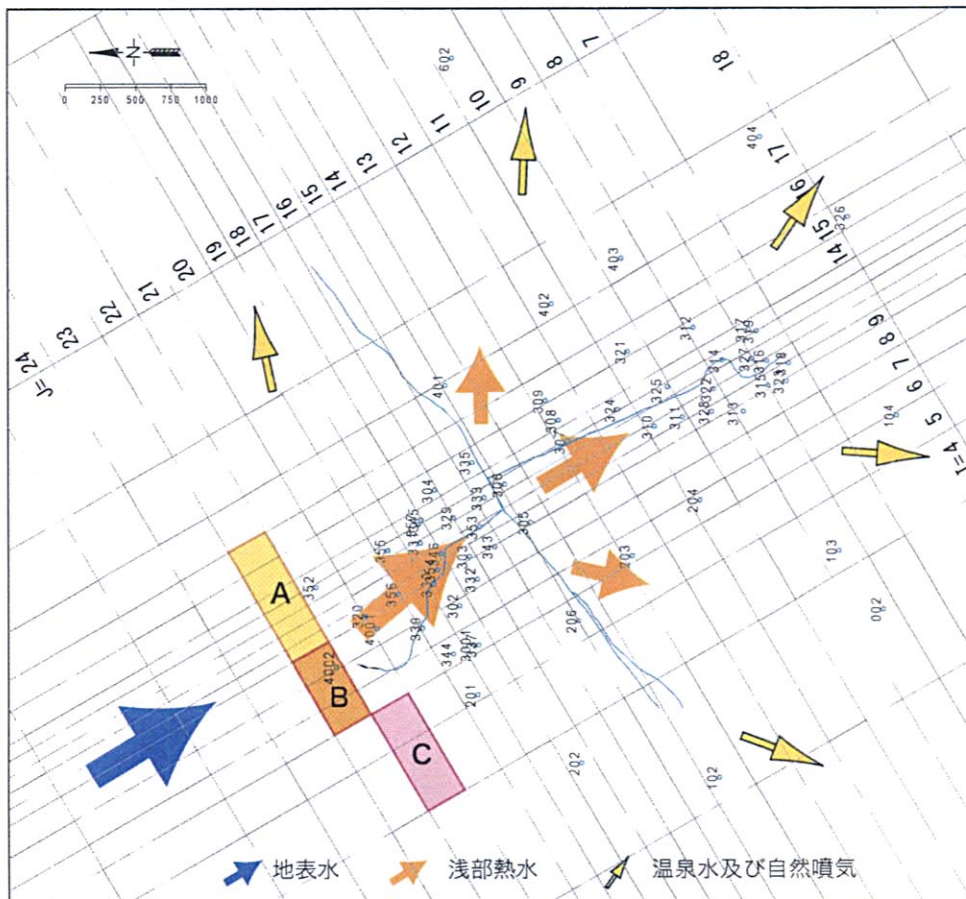


図 2-8-5 上方境界の圧力平面分布



羊八井地熱田水熱系統概念模型図



領域	熱水流入量(kg/s)	熱量(MW)
A	15	22
B	25	37
C	10	15

図2-8-6 下方境界の質量流速分布

(4) 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。ただし、コア物性試験が実施されていない深度の岩石物性値は、一般的な値を用いた。岩石物性値の一覧表を表 2-8-1 に示す。

(5) 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およ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 2-8-7~26 に示す。

2-8-3 自然状態シミュレーション

(i) 条件設定

自然状態シミュレーションは、貯留層圧力・温度がおよそ準定常となる 10 万年まで計算した。

(ii) 計算結果

10 万年後の温度分布断面図および熱水の流速ベクトル図(図 2-8-27)から、流体の流動モデルで示された ZK4002 の深部から熱水が上昇した後に、海拔 4,000m 以浅の浅部で水平方向に流れが変わり、南部地域に流動する流体の流動状況がよく再現されている。

また、10 万年後の温度分布平面図および熱水の流速ベクトル図(図 2-8-28)から、流体の流動モデルで考えられた浅部貯留層における北西から南東への流動を計算結果ではよく再現していることがわかる。

坑井内温度については、発電所開発後に測定された結果はあるが、発電所開発前のものはない。そこで、開発後に測定された坑井内温度分布を自然状態のマッチングデータとして使用した。本地域では還元をほとんど実施していないため、開発後に測定された温度であっても自然状態と比べて大きく低下していることはないと考えられ、開発後の測定結果であっても問題はないと考える。ただし、測定時のスタンディングタイムが不詳であるため、測定結果は貯留層温度の下限値とみなした。坑井内温度の測定結果と計算結果の比較を図 2-8-29 に示す。深部井 CJZK3001, ZK4001, ZK4002 において、浅部では計算結果の温度が若干高いものの、測定結果と計算結果の温度分布が概ねマッチングしている。また、ZK308 では海拔 4,000~4,300m 付近の地層で側方流動している状況をよく再現できている。また、南部生産井の南限である ZK319 では測定結果と計算結果の温度分布が概ねマッチングしている。浅部貯留層の広がり限定する周辺の井戸である ZK002, ZK102, ZK202, ZK401, ZK404, ZK352, ZK4001 などでは測定結果と計算結果の温度分布が概ねマッチングしている。従って、本数値モデルでは実際の浅部貯留層の大きさを概ね再現していると考えられる。

2-8-4 ヒストリーマッチング

(i) 条件設定

表 2-8-1 岩石物性値一覧表

	適用範囲	物性値	備考
密度	全体	2,600kg/m ³	コア物性試験(2005)参照
孔隙率	海拔 4,000~4,300m	20%	深部ほど減少するように設定した
	海拔 3,400~4,000m	10%	
	海拔 0~3,400m	5%	
熱伝導率	海拔 4,000~4,300m	1.5W/(m·K)	堆積岩に相当する
	海拔 3,400~4,000m	2.7W/(m·K)	コア物性試験(2005)参照
	海拔 0~3,400m	3.3 W/(m·K)	基盤岩に相当する
比熱	全体	1,000J/kg·K	コア物性試験(2005)参照

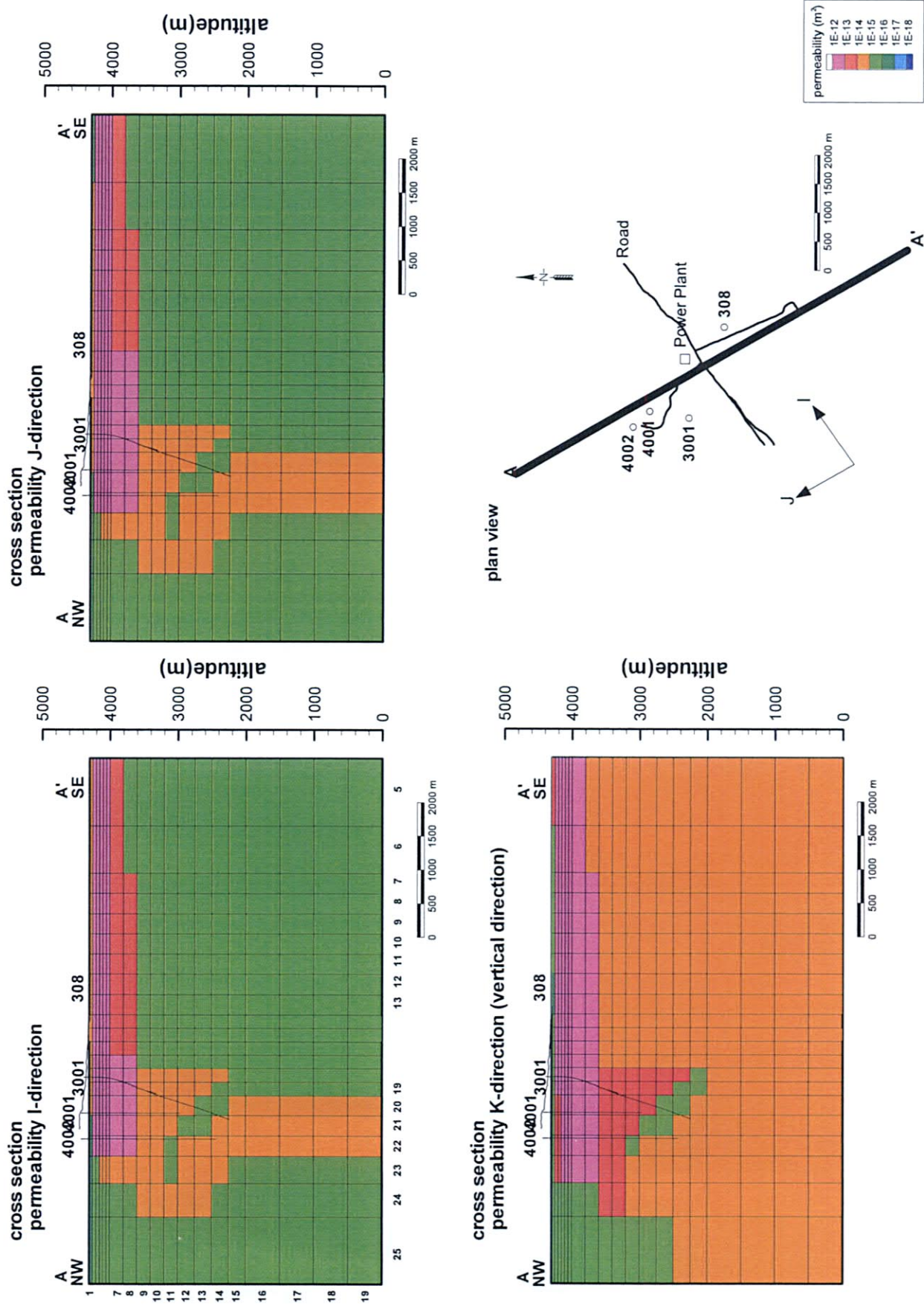


图2-8-7 渗透率分布断面图(断面A-A')

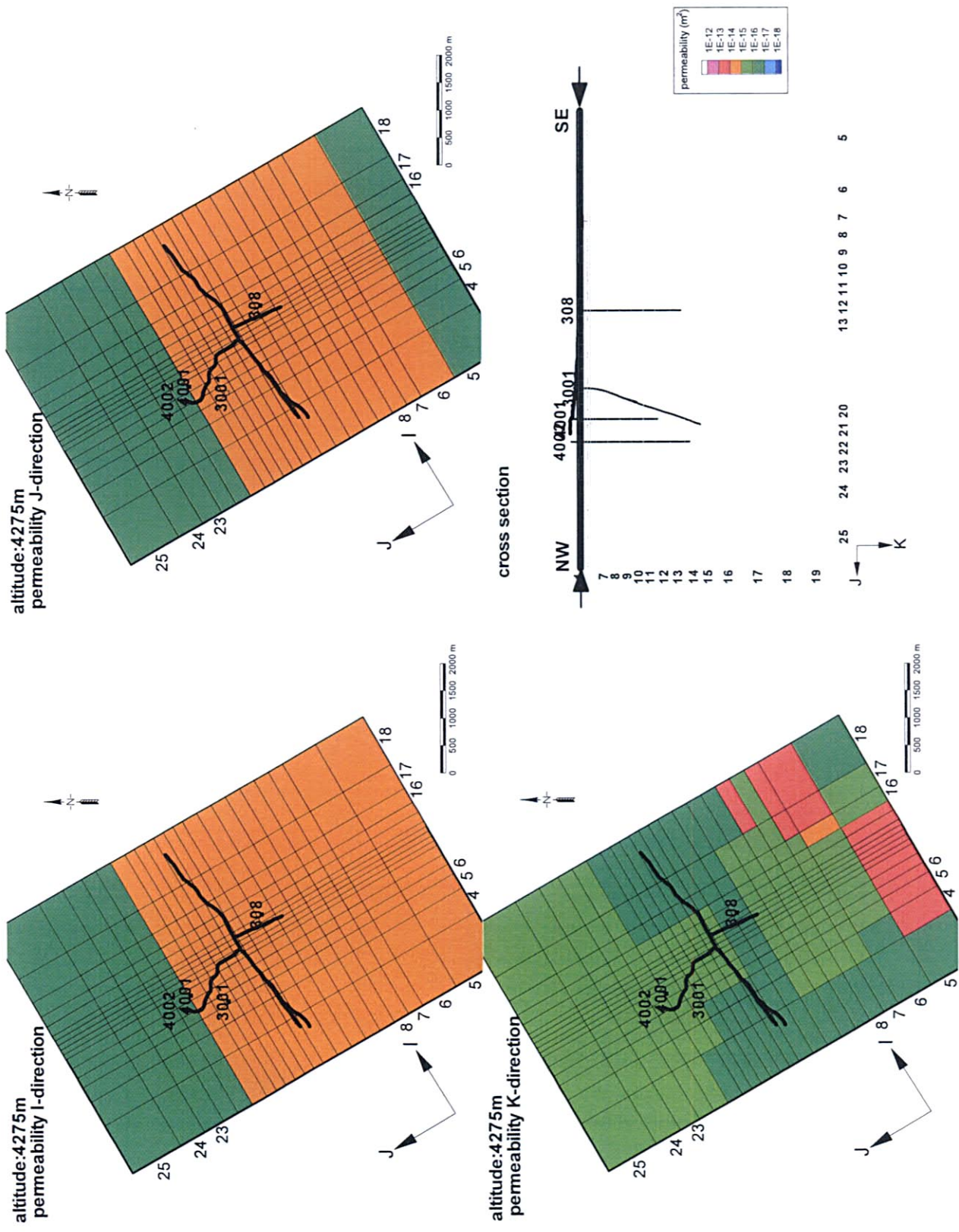


图2-8-8 浸透率分布平面图 (海拔4250 ~ 4300 m)

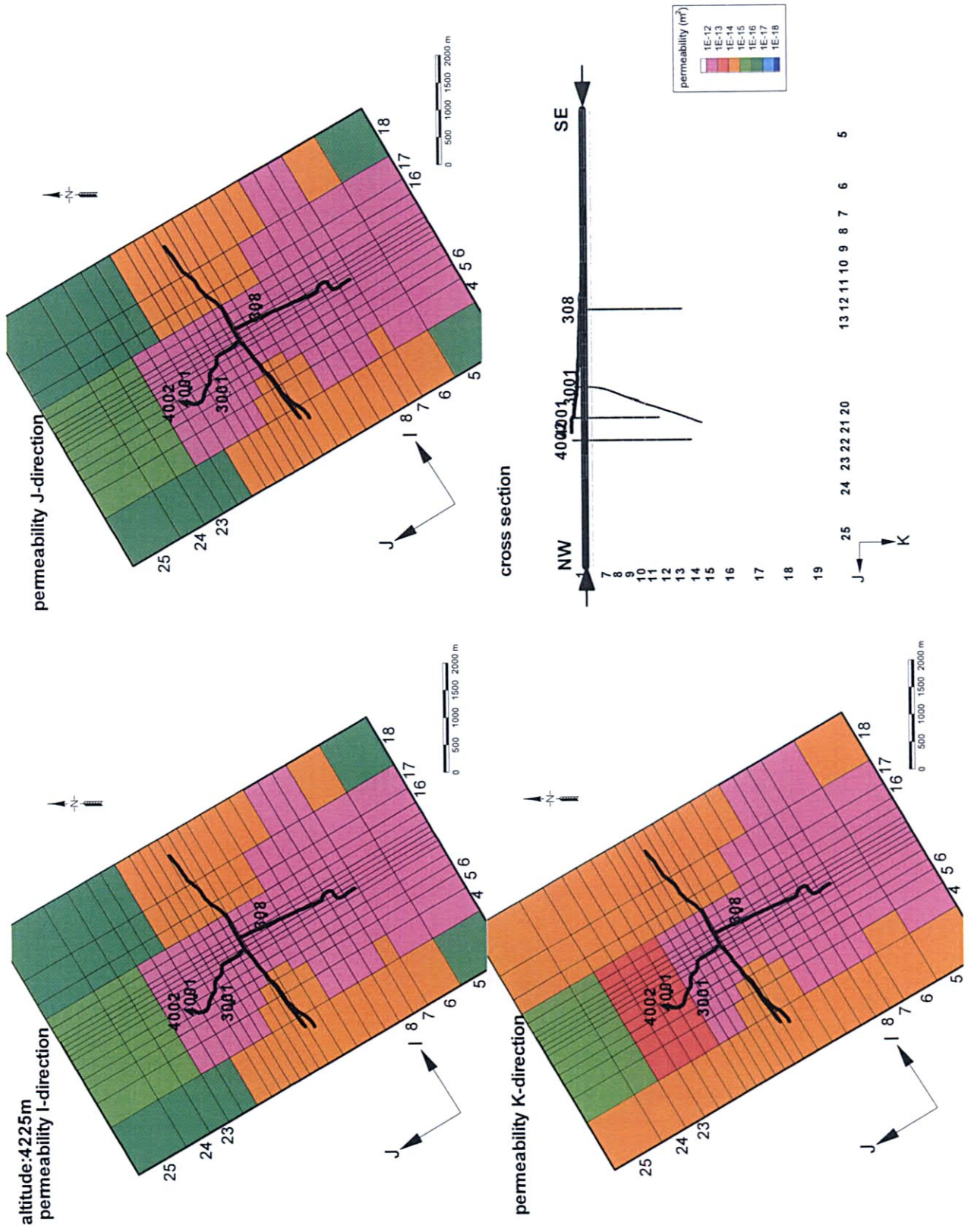


图2-8-9 渗透率分布平面图 (海拔4200 ~ 4250 m)

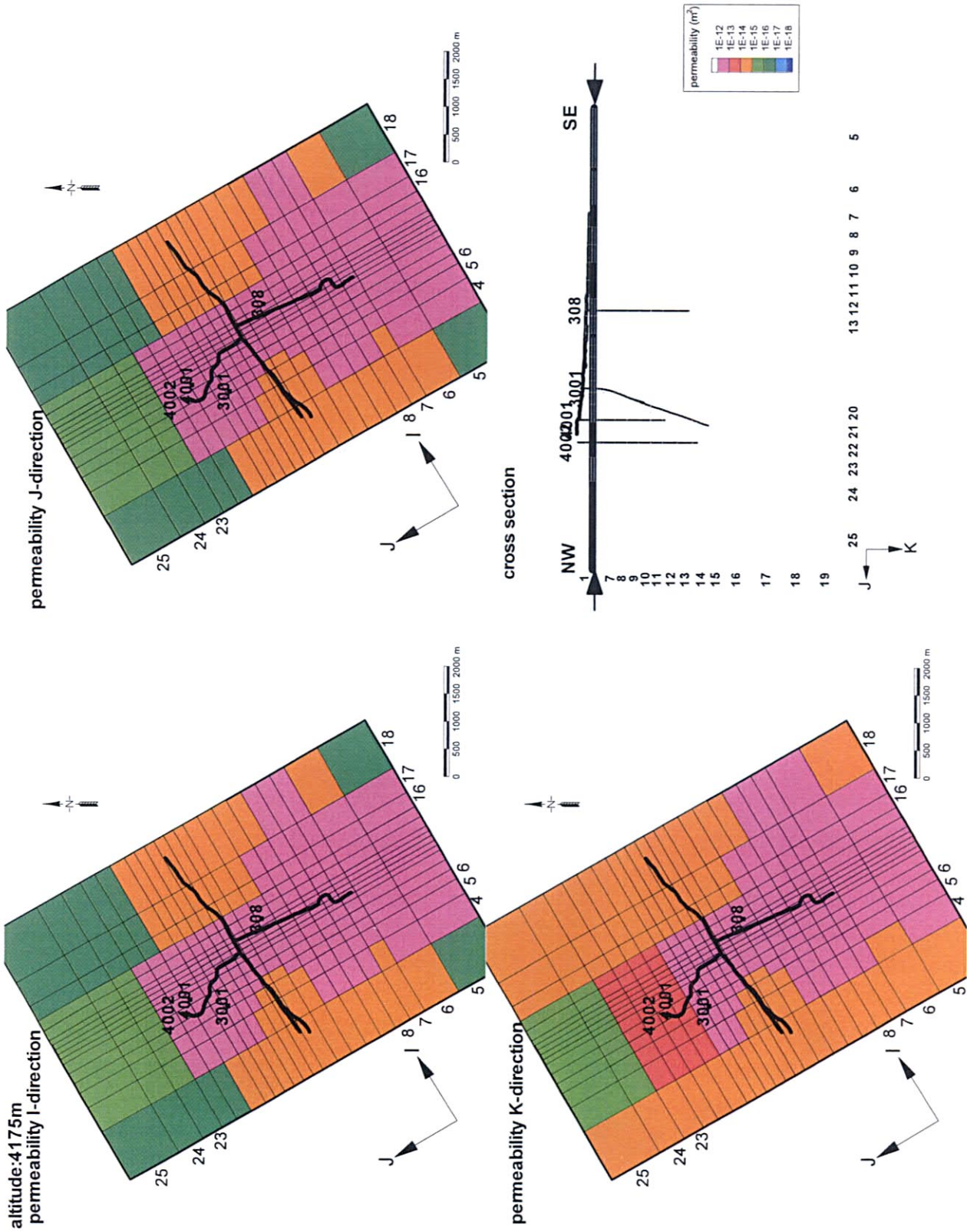


图2-8-10 浸透率分布平面图 (海拔4150 ~ 4200 m)

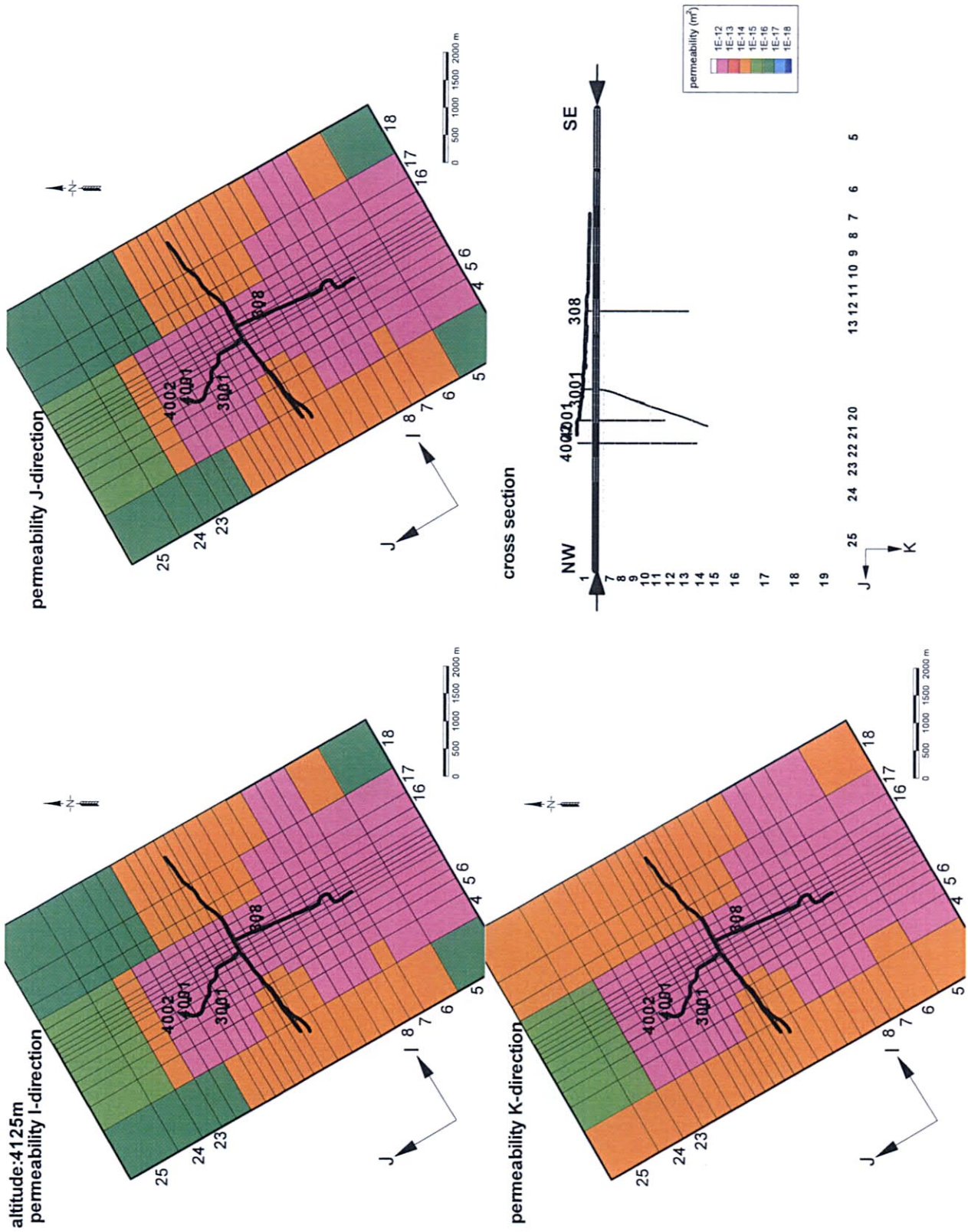


图2-8-11 浸透率分布平面图 (海拔4100 ~ 4150 m)