

図 2-6-4 蒸気成分経時変化図 (10) -ZK357-

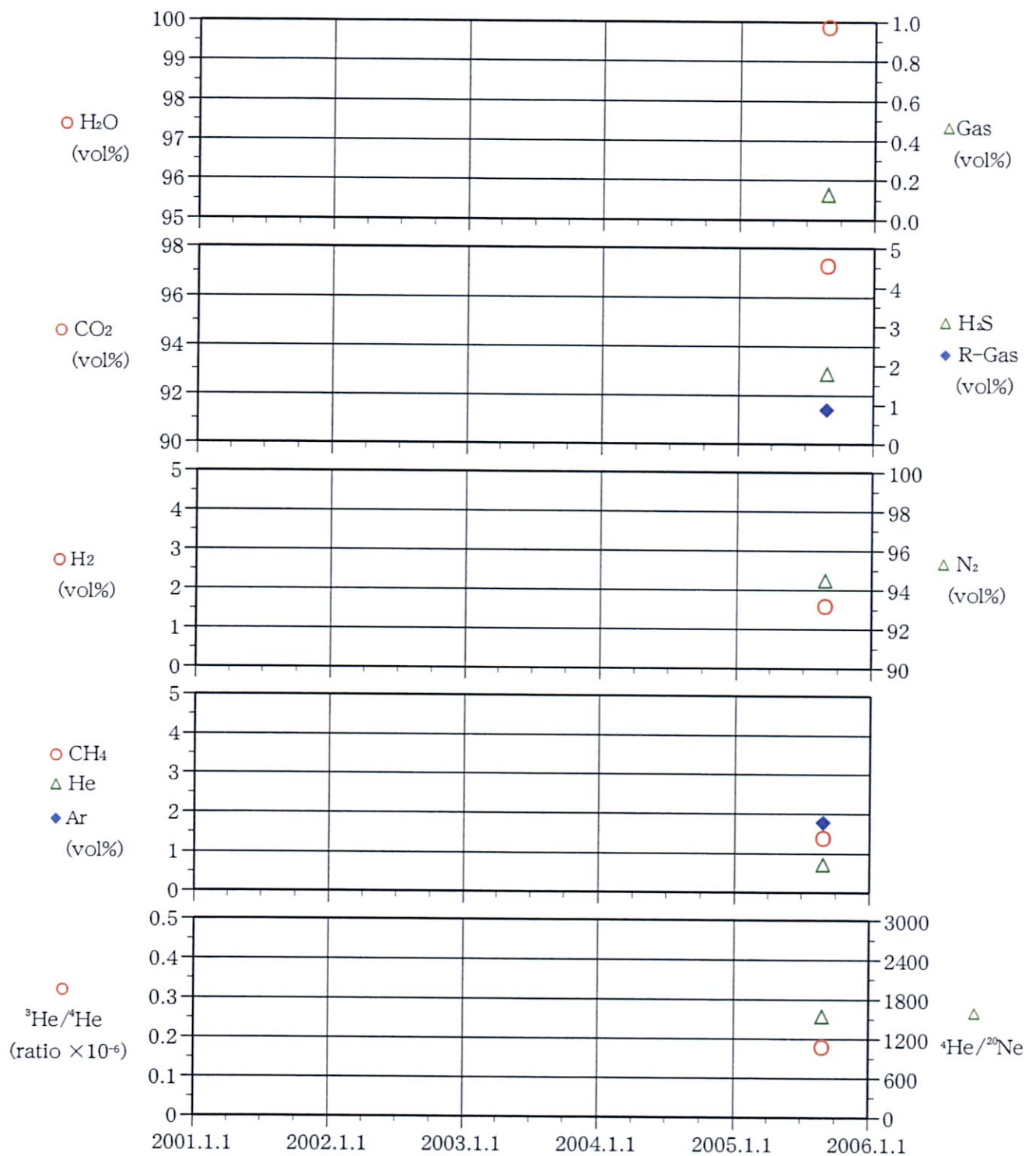


図 2-6-4 蒸気成分経時変化図 (11) -ZK358-

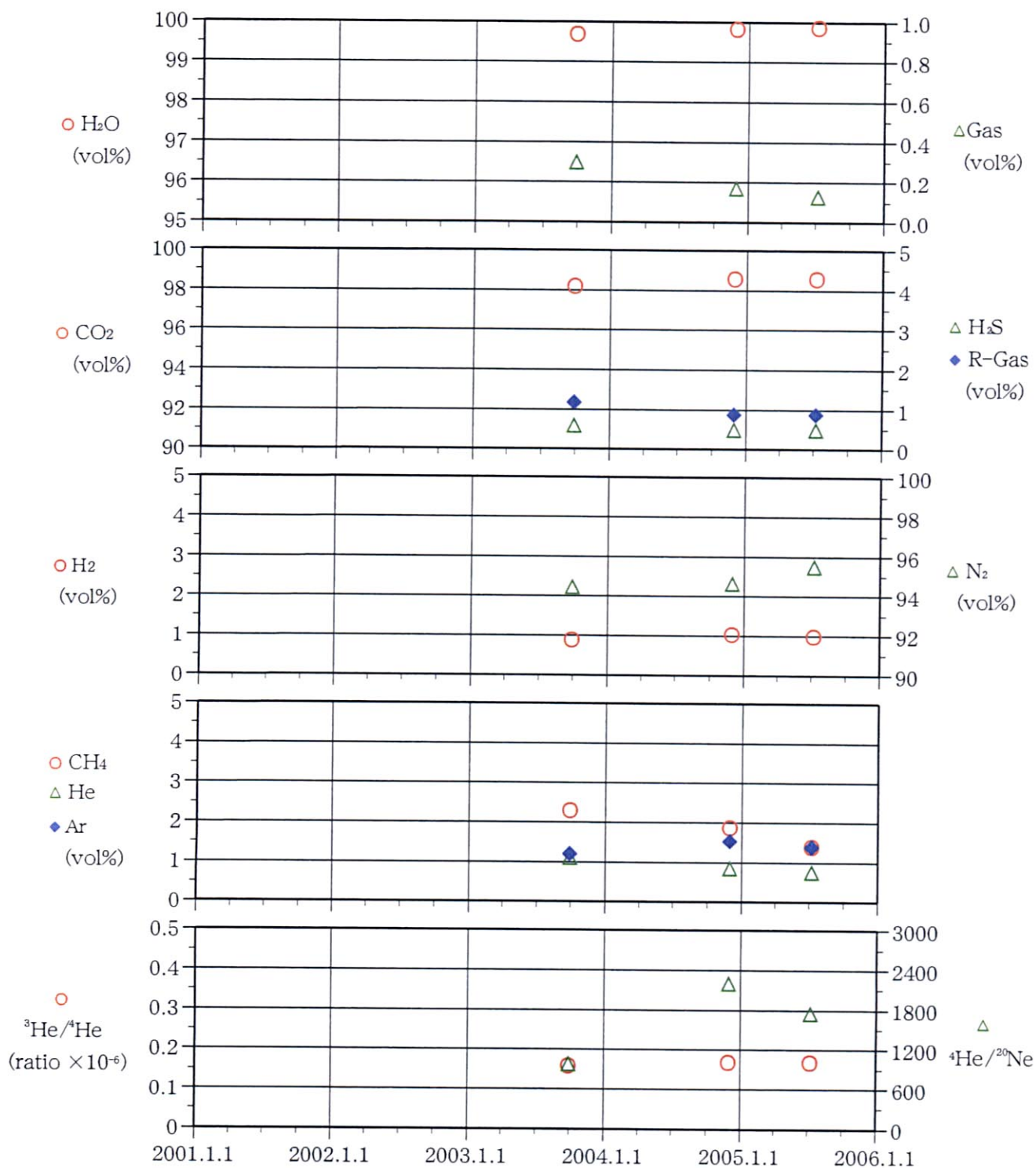


図 2-6-4 蒸気成分経時変化図 (1 2) -ZK359-

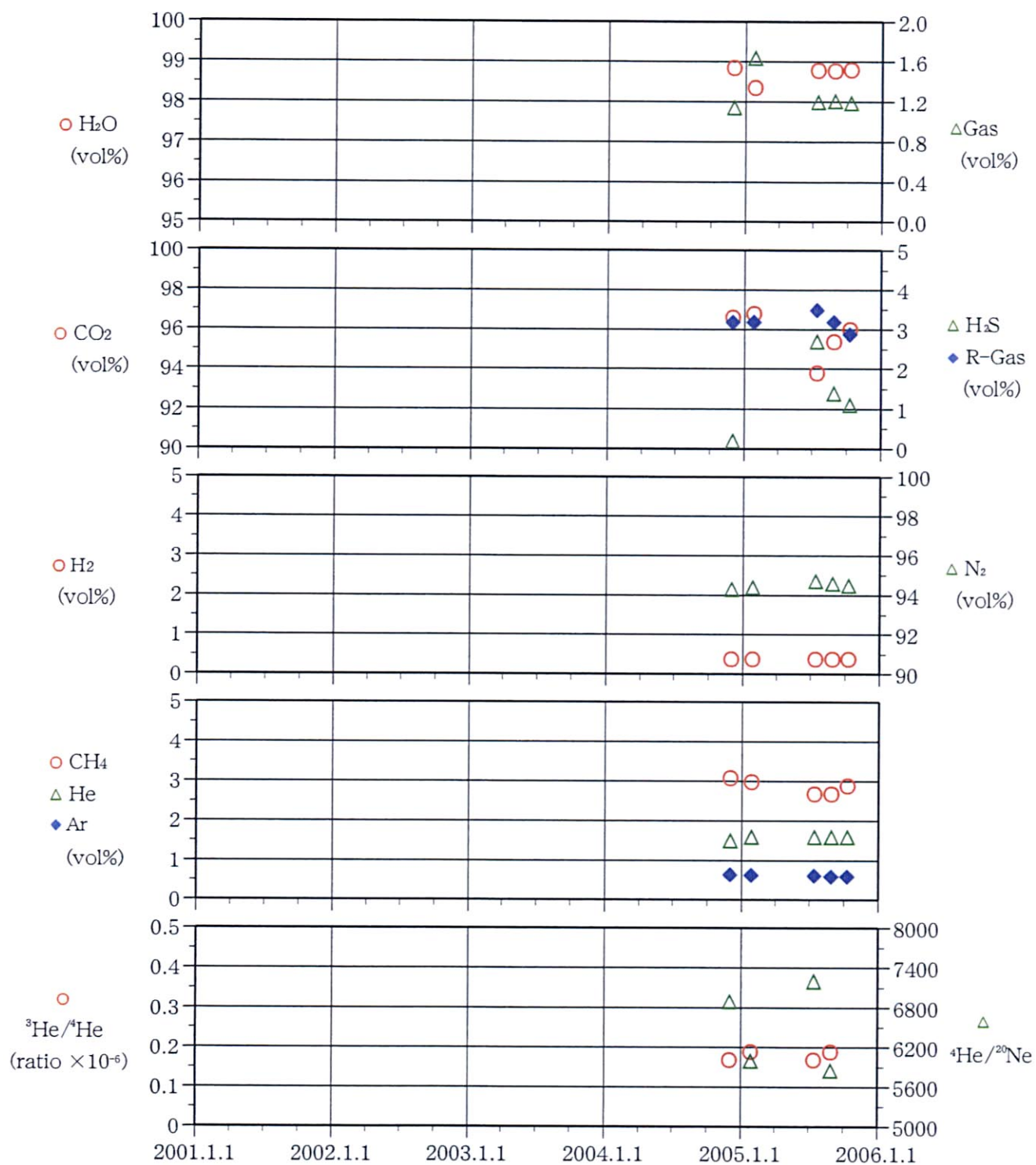


図 2-6-4 蒸気成分経時変化図 (13) -ZK4001-

噴気期間中の ZK4001 の SiO_2 濃度はほぼ安定しており、流体温度低下の兆候は認められない。

ZK4001 熱水中 Ca 濃度は減少傾向を示す。ZK4001 噴出物の分析結果では、炭酸カルシウムスケール（アラレ石）が確認されている。熱水性状及び噴出物の分析結果の両面から、坑井内もしくは貯留層にてスケール生成の可能性が指摘される。

噴気期間中の ZK4001 の蒸気性状は、ガス濃度が 1.1～1.6 Vol%、ガス中の硫化水素濃度が 0.05～2.7 Vol% と変動が大きい。データの蓄積が少ないため変動のメカニズムは不明である。

深部貯留層のガス濃度は、浅部貯留層のガス濃度 (0.05～0.37 Vol%) に比べて高いことから、新規発電設備ではガス抽出機の容量を大きくする必要がある。また、ガス濃度が安定していないことから、今後生産継続に伴いガス濃度がさらに上昇する可能性もある。

一般的に、ガス濃度の変化は、流体熱量が増加し熱水に対して蒸気の割合が増加すると、ガス濃度も上昇することが多い。また、還元熱水や地表水が深部貯留層に流入すると、ガス濃度は低下することが多い。

(iv) 地化学調査のまとめ

地化学調査から以下のことが明らかとなった。

- ・羊八井の浅部熱水は ZK4001 に代表される深部熱水と地表水の混合で生成している。
- ・深部貯留層から生産を行う場合、浅部貯留層との干渉は避けられない。
- ・ZK4001 の SiO_2 濃度はほぼ安定しており、流体温度低下の兆候は認められない。
- ・ZK4001 熱水中 Ca 濃度は減少傾向を示し、坑井内もしくは貯留層にてスケール生成の可能性はある。
- ・深部貯留層のガス濃度は、浅部貯留層のガス濃度に比べて高い。生産継続によりさらにガス濃度が高くなる可能性がある。

2-6-2 水位観測

羊八井地域の貯留層圧力の経時変化を評価する目的で、2004年6月から地熱地域内の坑井について水位観測を行った。観測を行った坑井は、ZK203, ZK313, ZK346, ZK353 の4本であり、いずれも浅部貯留層中に掘削されたものである。水位観測結果を、表2-6-6と図2-6-5に示す。

ZK203 は地熱発電所の南東方に位置し、坑口の海拔標高は 4,297m である。坑内水位は、地表から約 18m 深にある (海拔標高 4,279 m)。坑内水位は年間を通してほぼ一定であり、その水位変化はごく小さい。

ZK313 は地熱発電所の南東方向の約 1.2 km の地点に位置し、坑口の海拔標高は 4,283 m である。坑内水位は、地表から約 10m 深にある (海拔標高 4,273 m)。坑内水位は年間を通してほぼ一定であるが、9月～12月にかけて若干低下傾向が見られる。

ZK346 は、地熱発電所北西方約 510 m の地点に位置し、坑口の海拔標高は 4,334 m であり、4本の観測井のなかで最も高所である。坑内水位は、地表から約 60 m 深にある (海拔標高 4,274 m)。坑内水位は年間を通してほぼ一定である。

ZK353 は、4本の観測井のなかで地熱発電所に最も近接しており、発電所西方約 290 m

表2-6-6 水位観測結果(その2)

日付	ZK203		ZK313		ZK346		ZK353	
	水位 (m)	水温 (°C)	水位 (m)	水温 (°C)	水位 (m)	水温 (°C)	水位 (m)	水温 (°C)
2004/10/13	16.80	53	8.40	65	58.10	85	47.90	85
2004/10/16	16.90	51	8.50	65	59.10	85	48.50	85
2004/10/18	16.90	52	8.60	67	59.00	84	48.50	84
2004/10/21	16.80	53	8.50	66	59.00	84	48.60	84
2004/10/27	16.80	54	8.60	65	59.10	84	48.60	84
2004/10/28	16.80	53	8.60	65	59.00	84	48.50	84
2004/10/29	16.90	54	8.60	64	59.20	85	48.50	85
2004/10/30	16.90	53	8.50	65	59.10	85	48.60	85
2004/10/31	16.80	53	8.60	65	59.00	85	48.60	85
2004/11/1	16.80	48	7.40	61	60.00	87	48.60	87
2004/11/2	16.90	50	7.80	63	60.10	88	48.40	88
2004/11/3	16.80	50	8.00	63	59.10	88	48.50	88
2004/11/4	16.90	50	8.10	64	59.40	90	48.60	90
2004/11/5	16.60	51	8.30	64	59.60	90	48.60	90
2004/11/6	16.80	52	8.20	63	59.80	90	48.50	90
2004/11/7	16.40	51	8.50	64	59.40	97	48.40	97
2004/11/8	16.90	53	8.60	64	59.20	97	48.60	97
2004/11/9	16.90	53	8.70	65	59.30	97	48.80	97
2004/11/11	16.80	51	7.40	61	60.00	97	48.60	97
2004/11/17	16.80	48	8.80	65	59.60	97	49.00	97
2004/11/25	16.90	50	8.60	65	59.60	94	49.60	94
2004/11/30	16.80	50	8.70	65	59.60	95	49.50	95
2004/12/2	17.20	51	9.50	65			49.60	95
2004/12/6	17.30	51	9.60	65			49.10	94
2004/12/11	17.20	52	9.30	64			49.60	94
2004/12/12	17.30	53	9.20	64			49.10	96
2004/12/13	17.40	53	9.20	64			49.00	96
2004/12/14	17.50	52	9.20	64			49.60	95
2004/12/15	17.40	51	9.20	66			49.60	94
2004/12/16	17.50	51	9.20	63			49.80	96
2004/12/17	17.40	51	9.20	65			49.60	96
2004/12/18	17.40	51	9.60	65			49.50	96
2004/12/23	17.40	51	9.50	65			50.00	96
2004/12/27	17.40	51	9.50	65			50.00	96
2004/12/31	17.50	51	9.60	69			49.90	97
2005/1/5	17.80	54	10.40	69			50.80	74
2005/1/12	17.90	54	10.40	68			50.30	74
2005/1/19	18.70	55	10.06	68			49.80	73
2005/1/26	18.00	55	10.40	68			47.60	77
2005/2/2	17.96	54	11.00	70			47.94	70
2005/2/9	18.10	55	10.54	69			47.80	74
2005/2/16	18.23	54	10.75	72			46.04	60
2005/2/23	18.37	54	10.84	70			46.55	70
2005/3/1	18.35	55	10.87	70			46.80	70
2005/3/8	18.70	56	11.00	67			40.80	68
2005/3/15	18.63	56	11.07	71			46.80	71
2005/3/22	18.80	56	11.05	71			50.80	91
2005/3/29	18.90	54	11.20	69			51.80	97
2005/4/5	19.00	56	11.00	77			51.20	93
2005/4/12	19.10	56	11.40	78			51.90	91
2005/4/19	18.93	56	10.90	71			37.83	68
2005/4/26	18.92	56	11.14	73			38.80	68
2005/5/3	18.99	56	10.00	68			51.50	98

表2-6-6 水位観測結果(その1)

日付	ZK203		ZK313		ZK346		ZK353	
	水位 (m)	水温 (°C)	水位 (m)	水温 (°C)	水位 (m)	水温 (°C)	水位 (m)	水温 (°C)
2004/6/17	17.50	56	9.60	72	60.20	53	36.70	52
2004/6/18	17.10	56	9.50	67	22.30	69	47.20	61
2004/6/19	17.50	57	9.60	67	22.90	58	42.70	54
2004/6/20	17.60	54	9.60	58	28.50	64	44.10	56
2004/6/21	17.60	55	9.60	69	27.50	67	46.10	65
2004/6/22	17.60	56	9.50	70	29.30	64	45.30	65
2004/6/23	17.60	55	9.50	69	30.30	68	49.40	66
2004/6/24	17.70	57	9.50	69	34.30	74	49.40	68
2004/6/25	17.70	56	9.50	69	45.90	74	49.50	64
2004/6/26	17.70	54	9.50	69	35.60	73	49.50	64
2004/6/27	17.70	54	9.60	69	35.60	73	49.50	64
2004/6/28	17.70	56	9.60	69	30.60	75	49.50	69
2004/6/29	17.70	57	9.60	68	42.10	76	49.50	68
2004/6/30	17.70	53	9.50	66	35.30	74	49.50	68
2004/7/1	17.70	53	9.60	71	47.30	81	49.60	68
2004/7/2	17.70	55	9.60	67	45.70	73	50.00	68
2004/7/3	17.70	53	9.60	68	41.60	78	49.60	71
2004/7/4	17.70	53	9.60	68	46.30	76	49.70	71
2004/7/5	17.60	55	9.60	65	48.10	76	49.70	71
2004/7/6	17.70	54	9.60	68	35.00	74	46.30	74
2004/7/7	17.70	54	9.60	69	40.00	73	47.00	72
2004/7/8	17.50	53	9.60	64	44.40	81	48.50	78
2004/7/9	17.70	56	9.60	68	42.60	73	49.40	81
2004/7/10	17.70	56	9.60	64	36.00	73	48.00	71
2004/7/11	17.30	55	9.60	68	27.30	76	49.50	75
2004/7/12	17.80	55	9.50	67	42.40	72	49.20	75
2004/7/13	17.70	56	9.60	69	47.10	75	49.40	76
2004/7/14	17.70	56	9.60	68	37.20	73	49.60	73
2004/7/17	17.80	55	9.60	66	58.10	76	49.60	79
2004/7/21	18.10	55	9.50	66	58.40	76	49.50	79
2004/7/24	17.80	56	9.70	66	61.10	88	50.00	77
2004/7/28	18.00	52	9.60	65	60.40	73	50.00	70
2004/8/1	17.90	55	9.50	68	58.40	76	49.80	79
2004/8/5	17.90	55	9.40	65	59.10	76	49.80	68
2004/8/8	17.80	55	9.50	65	60.00	75	49.60	73
2004/8/11	17.80	55	9.40	66	60.40	76	49.80	72
2004/8/15	17.80	53	9.50	65	60.10	76	49.70	78
2004/8/18	17.20	53	9.30	66	60.30	75	49.70	76
2004/8/22	17.80	55	9.50	66	59.50	80	49.60	74
2004/8/25	17.50	53	8.80	66	59.60	84	49.10	96
2004/8/30	16.70	53	8.40	68	58.30	88	49.10	90
2004/9/1	17.40	55	9.40	65	59.30	83	49.90	85
2004/9/4	17.40	54	8.70	68	59.10	90	49.80	85
2004/9/8	17.10	55	8.60	68	59.10	87	48.80	85
2004/9/11	17.20	54	9.50	68	59.10	87	49.80	85
2004/9/15	17.30	54	9.50	68	60.10	87	49.10	85
2004/9/19	17.30	55	8.50	67	60.10	87	48.60	85
2004/9/23	16.70	54	7.80	64	59.10	87	48.70	85
2004/9/26	17.50	52	7.30	63	57.50	88	47.30	85
2004/9/29	17.40	54	7.40	61	58.20	91	48.40	85
2004/10/3	16.90	51	7.90	65	58.10	87	47.60	85
2004/10/7	16.90	52	8.50	65	58.20	87	47.80	85
2004/10/10	16.70	51	8.50	65	58.20	87	47.80	85

表2-6-6 水位観測結果(その3)

日付	ZK203		ZK313		ZK346		ZK353	
	水位 (m)	水温 (°C)	水位 (m)	水温 (°C)	水位 (m)	水温 (°C)	水位 (m)	水温 (°C)
2005/5/10	18.93	56	10.40	69			51.55	99
2005/5/17	19.25	56	11.10	70			51.80	98
2005/5/24	19.25	56	10.95	69			51.45	99
2005/6/1	19.15	56	10.75	69	61.10	78	51.15	95
2005/6/8	19.10	54	10.25	69	61.20	79	51.05	94
2005/6/15	19.40	55	10.80	69	61.30	86	51.20	96
2005/6/22	19.17	55	11.05	69	61.74	91	51.45	91
2005/6/29	18.90	54	11.15	69	61.10	99	51.53	93
2005/7/5	19.50	56	8.90	69	59.40	83	51.80	78
2005/7/12	19.50	56	10.70	70	60.10	84	51.40	98
2005/7/15	19.40	55	10.10	69	61.40	84	51.30	82
2005/7/18	19.40	54	10.60	71	61.50	80	51.30	78
2005/7/21	19.40	54	10.60	72	61.80	80	51.20	78
2005/7/24	19.40	54	10.70	69	61.60	99	51.40	92
2005/7/27	19.40	54	10.70	69	59.10	74	51.50	75
2005/7/30	20.10	57	11.70	73	48.70	78	51.80	75
2005/8/2	19.60	57	11.90	69	39.10	78	51.80	77
2005/8/5	19.70	58	11.90	71	43.10	75	51.80	75
2005/8/8	19.60	55	10.96	73	61.90	82	51.80	85
2005/8/11	19.55	57	11.00	73	39.60	72	51.10	75
2005/8/14	19.60	54	11.30	71	34.00	68	41.40	63
2005/8/17	19.75	56	11.30	72	40.00	68	47.60	67
2005/8/20	19.80	55	11.30	72	62.90	83	52.10	92
2005/8/23	19.80	56	11.40	72	62.90	95	52.00	93
2005/8/26	19.80	57	11.30	71	62.40	85	52.00	85
2005/8/28	19.80		11.60	55	62.50		51.80	
2005/9/2	19.80	55	12.70	72.2	44.00		51.90	96
2005/9/5	19.90	56	11.80	74				
2005/9/8	19.70	55	12.00	70				
2005/9/11	19.80	56	12.00	72				
2005/9/14	19.70		11.20		52.00		51.40	
2005/9/18	19.90		11.10		62.00		51.80	
2005/9/22	19.70		11.10		64.20		51.60	
2005/9/25	19.70		11.20		62.10		51.40	
2005/9/28	19.70		11.30		62.10		51.40	
2005/10/1	19.70		11.10		61.80		51.20	
2005/10/4	19.40		10.80		66.00		51.30	
2005/10/7	19.60		11.10		62.80		51.30	
2005/10/10	19.60		11.20		62.00		51.40	

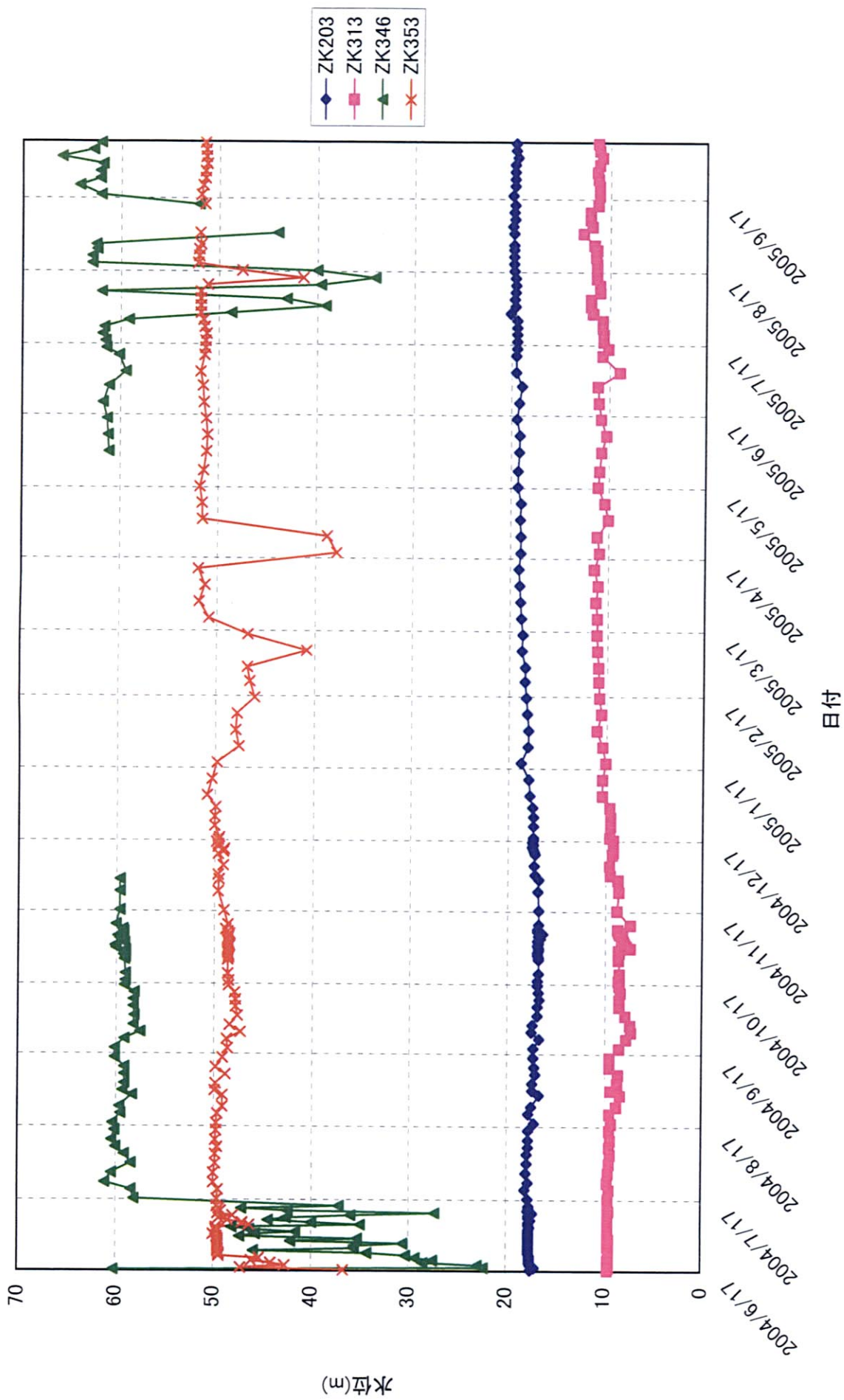


图2-6-5 水位观测结果

の地点に位置し、坑口の海拔標高は 4,321 m である。坑内水位は、地表から約 50 m 深にある（海拔標高 4,271 m）。年間を通してほぼ一定であるが、ZK313 と同様 9 月～12 月にかけて若干低下傾向が見られる。

以上の水位観測結果から、観測井 4 本の坑内水位によって代表される浅部貯留層の水位は比較的安定していると考えられる。

2-7 地熱系モデル

2-7 地熱系モデル

2-7-1 地質構造

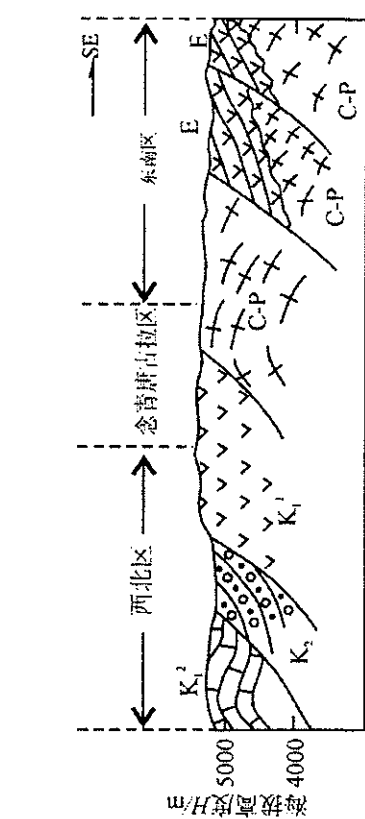
(i) チベットの広域地質構造と地熱構造

羊八井を含む広域地質構造については、西藏地熱地質大隊や、「ヒマラヤー青藏高原深部探測(INDEPTH)」, その他の調査研究が発表されている。これらの成果は、呉珍漢ら(2003)「青藏高原腹地的地殻変形与構造地貌形成演化過程」にまとめられているので、ここではこれを引用して、羊八井周辺の広域地質構造について述べる。

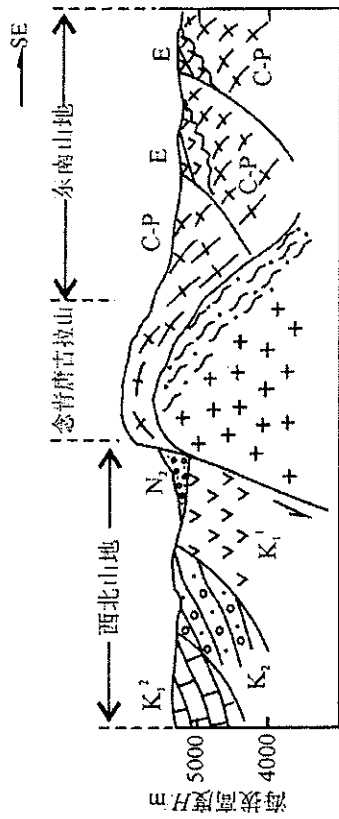
以下に、呉珍漢ら(2003)の第四章第三節「四、当雄—羊八井、盆地—山地構造地形の発展過程」を引用する。

『各種の観測資料を総合すると、この地域の構造地形の発展は 28~20Ma, 20~18Ma, 18~8 Ma, 8~5 Ma, 5~2 Ma, 1.5~0 Ma の多くの異なる段階の構造運動によって、序々に現在の盆地—山地分布の構造が形成されたものである。

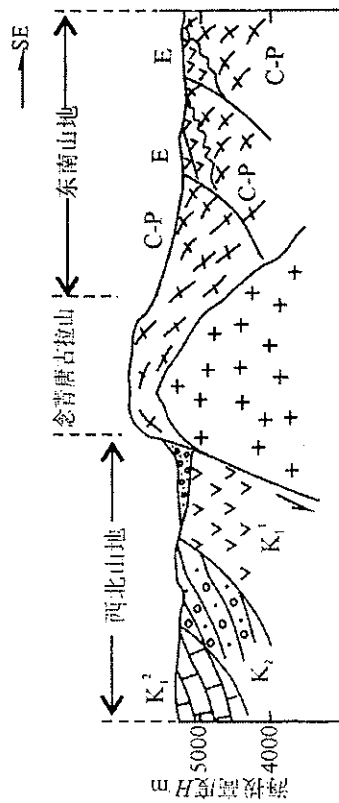
- ①漸新世晩期~中新世初期(28~20Ma) カンティス—ラサ地塊では強烈な圧縮力による地殻の短縮と厚度増加が発生し、カンティススラスト構造(GTS)と旁多逆断層構造が形成され、納木錯構造帯でも逆断層構造運動が発生し、地層の地域性褶曲と早期の地層の構造的上昇を導いた。強烈な構造圧縮は断塊山地と圧縮陥没盆地の分布を導き、起伏のある地形景観を形成した(図 2-7-1 a)。圧縮短縮増厚の過程で、重力均衡により地表の海拔高度は序々に増加した。
- ②中新世早期(20~18Ma) 長期の強烈な圧縮により地殻は巨大な短縮となり地殻の厚さは倍加し、倍加した地殻は重力均衡により浮上して海拔 4500~5500m の高度となった。この地域ではこの後構造地形の発展段階に入った。地域の構造活動性は相対的に弱く、削剥と平坦化が主となり、ゆるい高原面が形成された(図 2-7-1 b)。地域の構造環境は、圧縮短縮の環境から伸展横ずれ的なものに重大な転換が起こった。同時に厚くなった地殻の 17~20km の深度には局所的な部分溶融が形成され、部分溶融体の頂部には花崗岩マグマが分別集中した。
- ③中新世中晩期(18~8 Ma) 地殻は地域性の伸展構造環境に変化し、上部地殻の下部(13~20km)では継続的に大規模な局部溶融が続き、大量の花崗岩マグマが念青唐古拉に沿って流動貫入し固結した。マグマの浮力作用の下、念青唐古拉山脈は序々に隆起を開始し、東西両側の旁多山地と納木錯地塊は相対的に下降した(図 2-7-1 c)。
- ④中新世末期(約 8~5 Ma) 念青唐古拉地塊と東南部の羊八井—当雄—旁多地塊の間では、地域性の滑離デコルマ運動が発生し、念青唐古拉山東部に NE 方向に延びる大型の低角度靱性剪断帯(NSZ)を形成し、念青唐古拉山の NW 方向への傾動と旁多山地の ES 方向の滑離デコルマ運動が発生した(図 2-7-1 d)。
- ⑤鮮新世—早期更新世(5~2 Ma) 念青唐古拉山の東側では断裂沈降が発生し、念青唐古拉山脈の急速な上昇に伴い両側の地塊では急速な断裂沈降が発生した。序々に羊八井—当雄断裂沈降谷地が形成され、当雄、寧中、拉多崗、羊八井の断裂沈降盆地が発達し、北東—北北東向きの盆地—山地構造地形が形成された。羊八井—当雄盆地の両側、すなわち盆地と山脈の間には NE 走向で高角度傾斜の境界正断層が



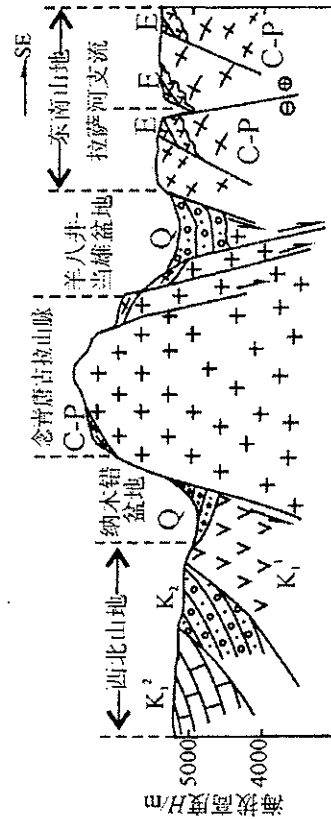
a. 渐新世晚期—中新世早期 (28~20Ma)



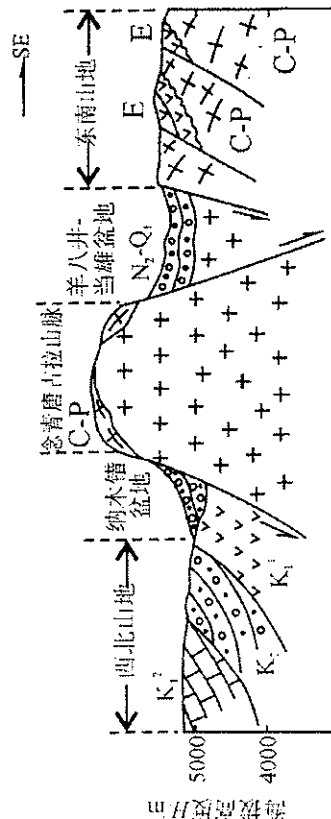
b. 中新世早期 (20~18Ma)



c. 中新世中晚期 (18~8Ma)

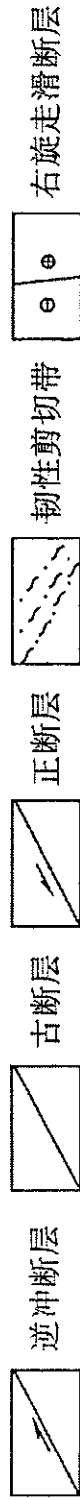


d. 中新世晚期—上新世早期 (8~5Ma)



e. 上新世—早更新世 (5~2Ma)

f. 早更新世晚期以来 (≤ 1.5 Ma)



出典： 吳珍漢・葉培盛・胡道功等(2003)

图 2-7-1 于 羊八井 地区 构造地貌形成过程模式图

形成された。後で形成された高角度境界脆性断層は前に形成された低角度のマイロナイト帯(靱性剪断帯)を切って、両山地の内側には比較的平坦な盆地面が形成された。同じ時期に念青唐古拉山脈の西北部では納木錯西岸山地が上昇を開始し、納木錯盆地が断裂沈降を開始し、念青唐古拉西縁境界正断層が形成された(図2-7-1 e)。

- ⑥早更新世晚期以降(1.5~0 Ma) 羊八井—当雄盆地の伸展性断層活動と盆地の断裂沈降はさらに激しくなった。盆地面の海拔高度は序々に低下し、平均海拔高度は4400mまで低下した。同時期には古仁拉—羊八井、車瑪千拉—旁多、申錯—曲古などのNW走向の横ずれ断層が形成され、NW走向断裂帯に沿って序々に古仁曲、藏布曲、ラサ川上流旁多支流と、羊八井峡谷、烏魯龍峡谷、曲古—九子拉峡谷、及び多くの川流当の構造地形が形成された(図2-7-1 f)。晩更新世—完新世には西北部では納木錯盆地と面積が10万km²に達する古大湖が形成された。古大湖は序々に退縮する過程の中で、最高139mに達する多段の湖岸段丘を形成した。

第四紀中晩期の断裂活動や河流浸食と風化剝削は様々な山地の平坦面や山頂面の裂解で激しくなり、序々に盆地—山地が伴って分布する構造、すなわち厳しい山岳地形と規律的に分布する谷、水系の網が形成された。現在の河川には2~6段の河岸段丘が発達し、河流の浸食は激しくなり、旁多山地や念青唐古拉山では深く切り込んだ峡谷が形成され、最終的に現在見られるような特色ある地形環境が出現した。

(ii) 羊八井の地質構造

(1) 地質層序

羊八井地熱地域の地質は、下位から念青唐古拉群、花崗岩類、古第三系及び第四紀堆積物に大別される。

① 念青唐古拉群

念青唐古拉群は、羊八井地熱地域の北西方の念青唐古拉山脈に分布する。念青唐古拉群は先震旦系であり、片麻岩、結晶片岩、花崗岩等からなる。

② 花崗岩類

花崗岩類は、燕山期花崗岩、喜山期花崗岩、花崗斑岩等からなる。燕山期花崗岩は燕山期(白亜紀)に貫入したものであり、地熱地域南東部に分布する。喜山期花崗岩は喜山期(白亜紀~第三紀)に貫入したものであり、地熱地域北西部に分布する。花崗斑岩はCJZK3001の深度814~1,350m及びZK4002の深度489~616mに分布することが確認され、花崗岩中に貫入していると考えられるが、貫入年代は不明である。

③ 古第三系

古第三系は各種火山噴出物からなり、念青唐古拉山脈南東麓(地熱地域の北西部)、藏布曲右岸の唐山脈西麓に露出し、羊八井地熱地域の多くの坑井でも分布が確認された。地熱地域北西部において喜山期花崗岩を不整合で被覆する。地熱地域南東部において燕山期花崗岩を不整合で被覆する。

④ 第四紀堆積物

第四紀堆積物は礫、砂、泥からなる氷河堆積物を主体とする。氷河堆積物は

雑多な大きさ、岩種の礫から構成される無層理の岩相である。礫は不淘汰で、表面に擦痕を有するものもある。

(2) 断裂構造

羊八井地域では、低角度の念青唐古拉韌性剪断帯(NSZ)と高角度の正断層群が地熱貯留層を形成する重要な断裂構造である。

① 念青唐古拉韌性剪断帯(NSZ)

INDEPTH の屈折波解析によると、羊八井の地下 1,000~1,500m 付近に北東走向、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)。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

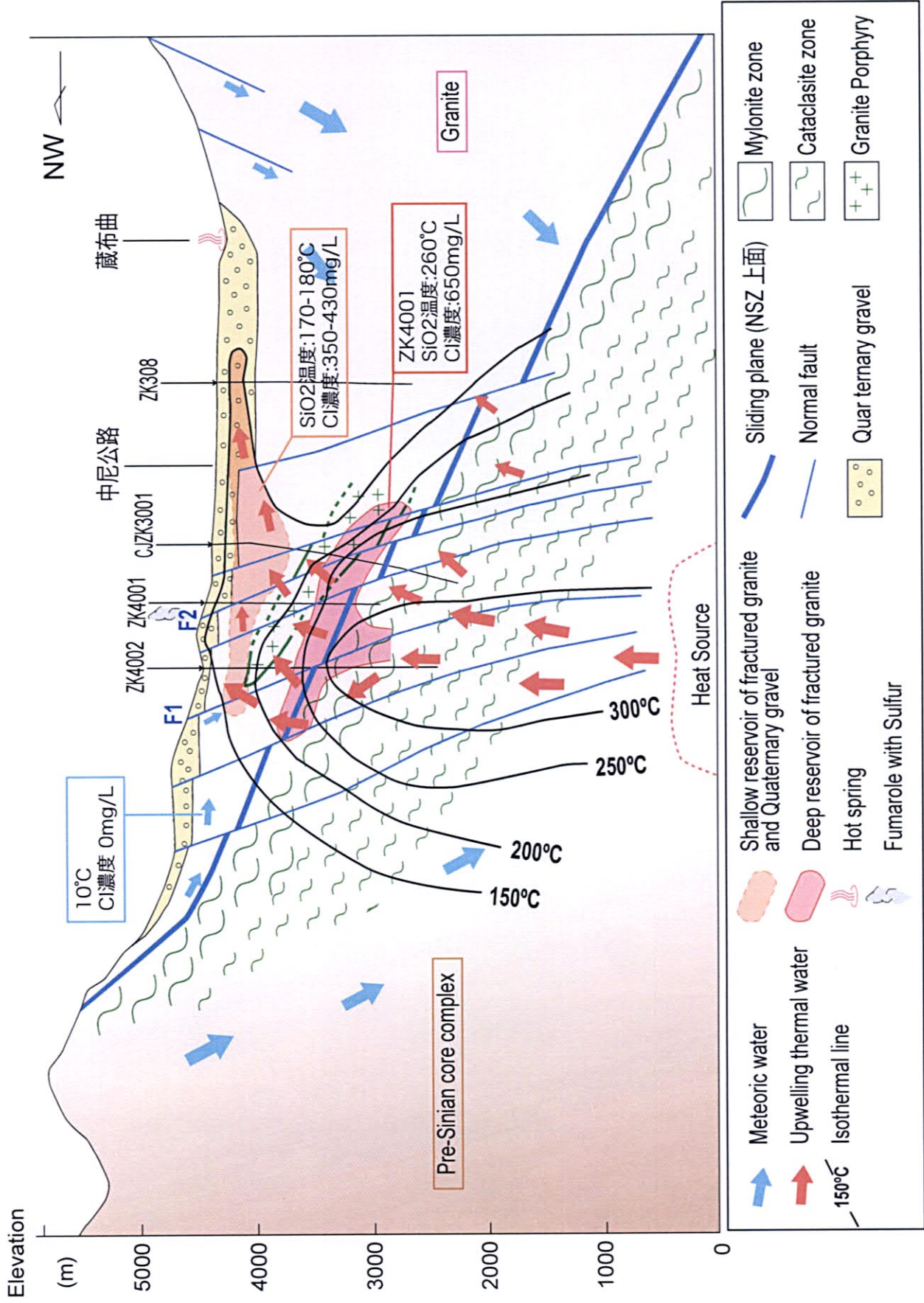
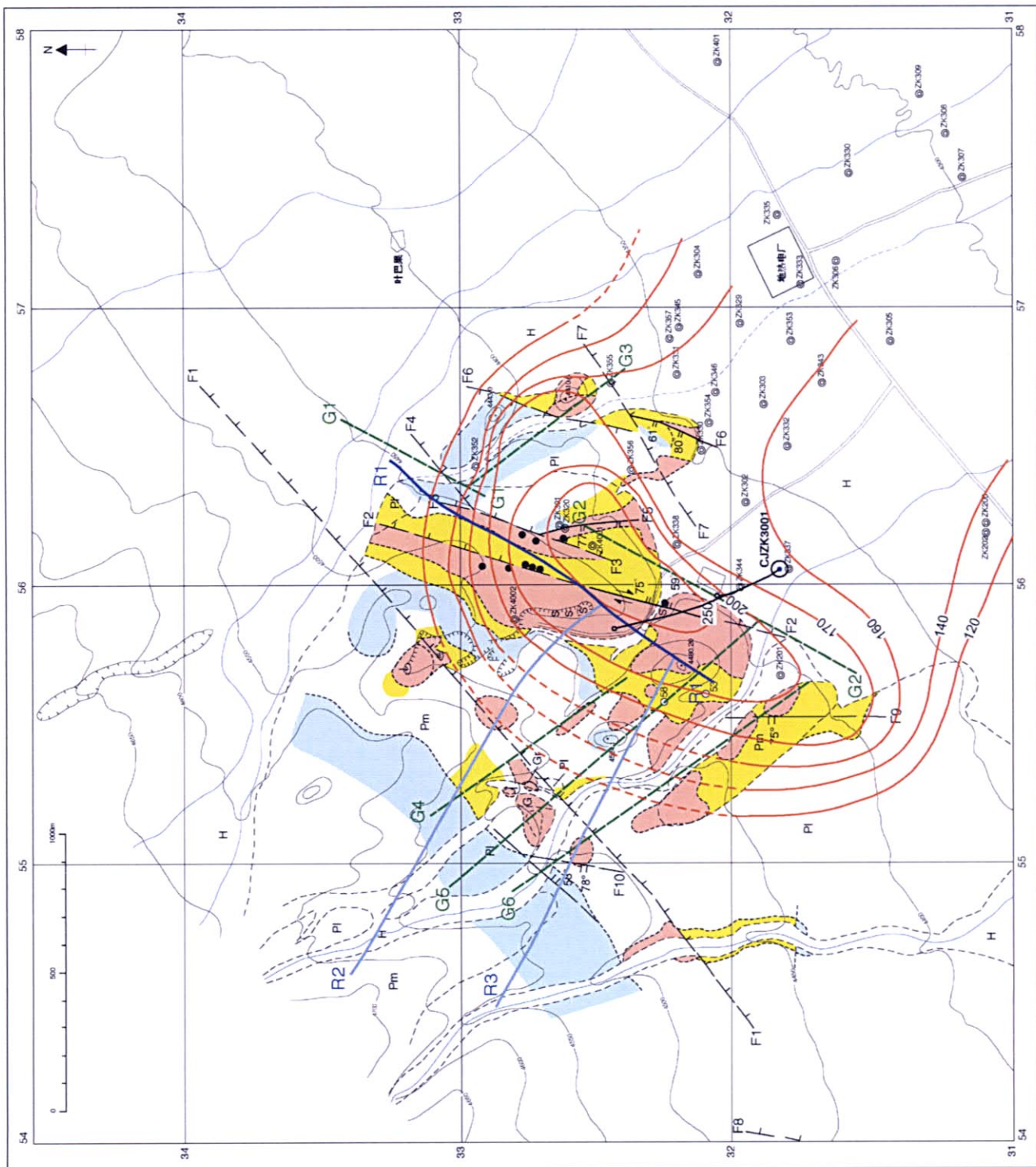


图2-7-2 羊八井地熱田水熱系統概念模型图



LEGEND

- Silicified zone
- Argillic alteration zone
- Non-alteration zone~
Very weak argillic alteration zone
- Observed fault
- - - Estimated fault
- Fumarole
- Hot ground (<math>< 50^{\circ}\text{C}</math>)
- J Gas emission ($\text{CO}_2>>\text{Hz}$)
- - - Boundary of formation
- - - Boundary of alteration zone
- S Sulfur deposit
- Discontinuity of gravity
(assumption density : 2.5g/cm³)
- Subsurface temperature
distribution at 3,800m sea-level
- R1 Clear discontinuity of resistivity
- R2,R3 Discontinuity of resistivity
- CJZK3001 and sidetrack

図 2-7-3 (1) 羊八井地熱地域調査総括図 (その1)

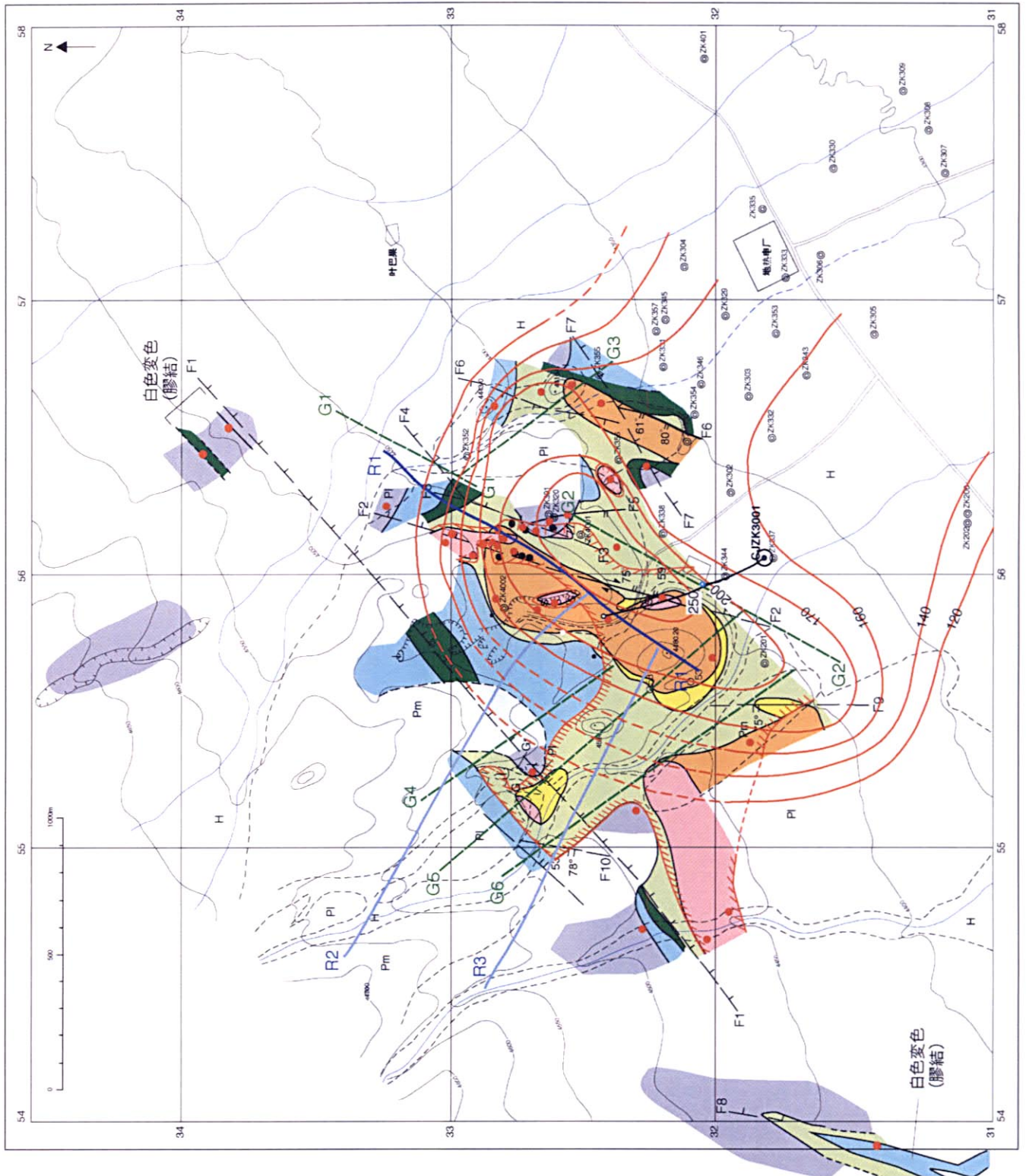
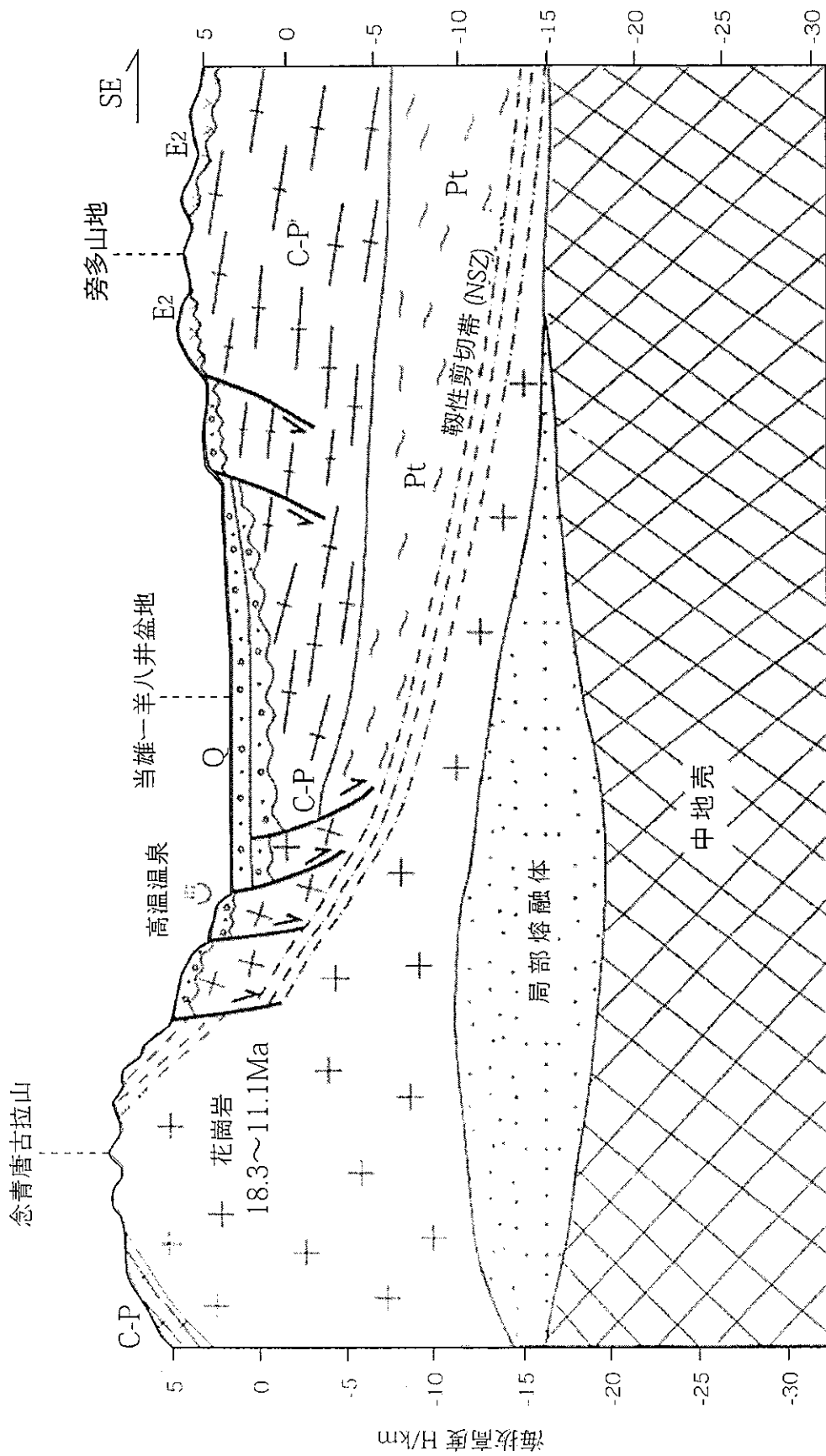


図 2-7-3 (2) 羊八井地熱地域調査総括図 (その 2)



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

出典: 吴珍漠·葉培盛·胡道功等(2003)

图 2-7-4 当雄-羊八井盆地活动断裂构造模式图

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。

2-7-3 地下温度分布

羊八井地域は浅部井が多掘削され、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。