

2-5 原有深部井(ZK4001 井)的喷汽试验及结垢试验

2-5-1 喷汽试验

到目前为止,羊八井地区虽然钻了两孔深部井 ZK4001、ZK4002,但是在 ZK4001 井用端压(Lip pressure)法仅进行过大约两周的简易喷汽试验,没进行把蒸汽和热水分离开的长期喷汽试验测量,因此没能对钻井进行充分的评价。为此,JICA 调查的原定计划是对 CJZK3001 井和 ZK4001 井进行长期喷汽试验,在调查钻井特性的同时获取进行热储层评价所需的各项数据。虽然对 CJZK3001 井实行了引喷,但没有实现连续喷汽,故只对 ZK4001 井实施了长期喷汽试验。

(i) 喷汽试验的结果

(1) 2004 年喷汽试验

ZK4001 的喷汽试验从 2004 年 10 月 21 日开始,到 2005 年 2 月 26 日结束。在 11 月 10 日以后,由于结垢附着导致减压伐堵塞并有岩屑(岩片、岩粉)从地下喷出而中断试验,之后又开始了试验而且继续了 3 个月。

可是 2004 年度喷汽试验在内容还不充分的情况下就结束了。在同时实施的钻井特性试验(第 1 次特性试验)中,由于喷汽状态不稳定,致使试验结果的精度变得较低。

(2) 2005 年度喷汽试验

2005 年的长期喷汽试验,从 2005 年 7 月 12 日开始到 10 月 9 日结束,共进行了 90 天。

1) 长期喷汽试验

长期喷汽试验结果的概要如下表所示。

项 目	单位	喷汽开始后的天数(月/日)				衰减率% (参考)
		8(7/19)	30(8/10)	60(9/9)	88(10/7)	
井口压力	MPa G	1.80	1.72	1.50	1.43	-20.6
流量测定压力	MPa G	0.52	0.52	0.64	0.64	
蒸汽流量	t/h	53.6	51.5	50.3	48.6	-9.3
热水流量	t/h	257.3	253.8	268.9	232.3	-9.7
总流量	t/h	310.9	305.3	319.2	280.9	-9.6
两 相 流 焓 (Enthalpy)	kJ/kg	1027	1017	1034	1053	+2.5
【井口压力换算】						
蒸汽流量	t/h	22.2	21.6	29.8	30.5	+37.4
热水流量	t/h	289.0	284.0	289.0	250.0	-13.5

2) 特性试验

对于 2005 年喷汽试验时的特性试验,在喷汽试验开始、中间和结束阶段共进行了 3 次试验(即第 2~第 4 次特性试验)。详细的试验结果见图 2-5-4。根据上

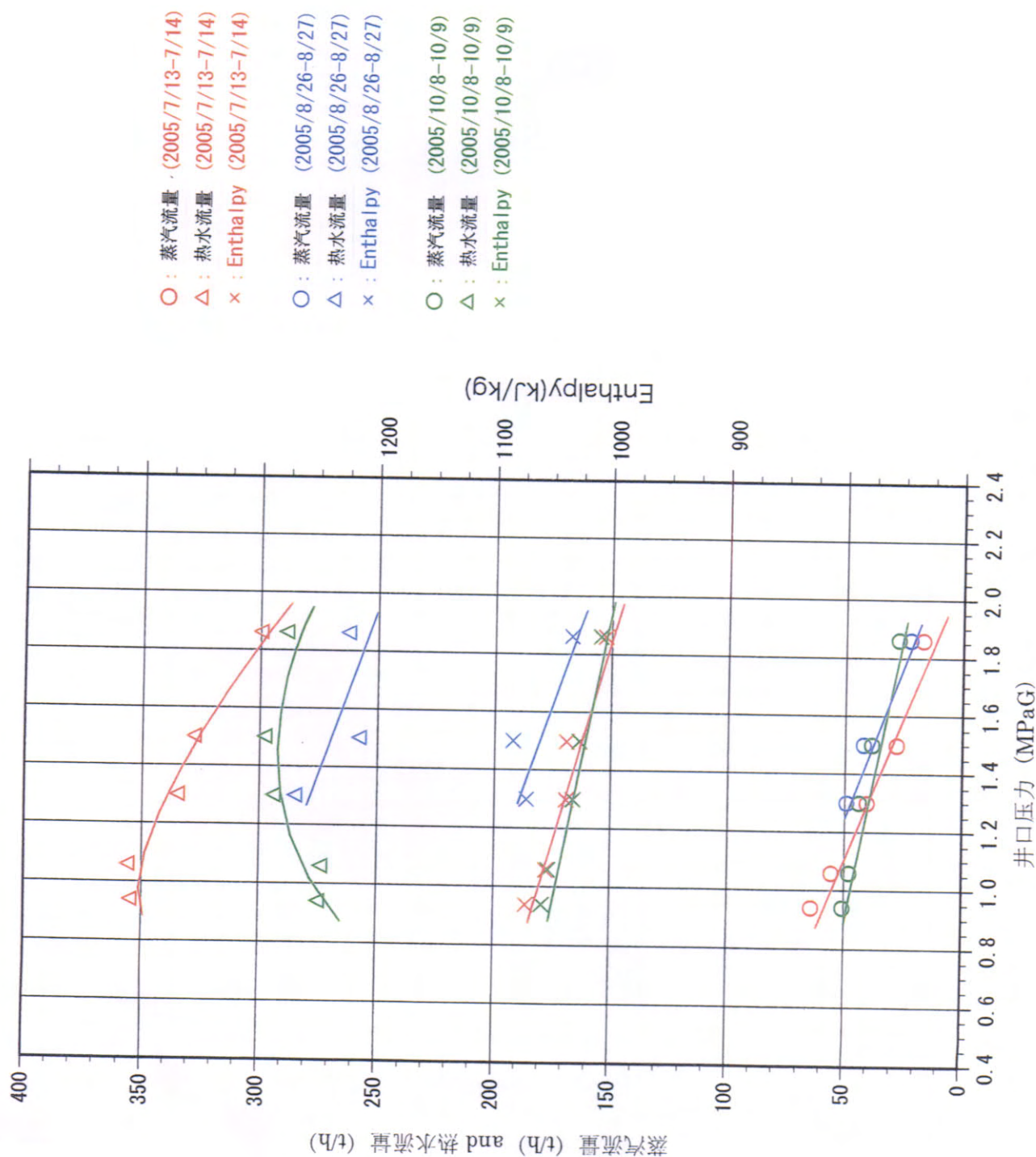


图 2-5-4 ZK4001 流量特性

述结果，长期喷汽试验的前后，热水流量的减少比较明显，但蒸汽流量和两相流热量却没有太大的变化（减少）。

（ii）喷汽试验的化学结果

与 ZK4001 井的长期喷汽试验同时进行了地热流体化学调查，其结果在 2.6.2 地球化学追踪调查中有记述。

（iii）喷出物试样的调查

使用喷汽试验时喷出的岩石试样，进行了岩石薄片显微镜观察、X 射线衍射分析和流体包裹体测定。

喷出试样虽然全部来自断层碎裂岩，但仍然是糜棱岩和碎裂岩受到破碎而生成的。这表明以上现象是由于断层运动（延性变形～脆性破坏）在同一地点重复发生而引起的。

从喷出试样的存在形式来看，ZK4001 深部热储层沿断层发育，此断层从糜棱岩形成时期（约 8Ma）到现在一直持续活动着。此次试样是从深度 950～1,336 m 的热储层中喷出来的。

2-5-2 结垢试验

（i）试验结果

ZK4001 井在 2004 年 10 月 21 日开始了喷汽试验，但是在管道的减压阀下部发现有结垢。因为结垢对地热发电运行有很大的影响，所以在 2005 年度 ZK4001 井喷汽试验时，进行了结垢试验。并且由于 ZK4001 井长期喷汽，对结垢生成的防止也进行了讨论。

最终结果的总结如下所示：

试验片 No.	1	2	3
流体的种类	蒸汽+热水	热水	热水
流 量	330~260 t/h	260~210 t/h	
流送天数	90 - 4 = 86 天		
安装位置	井口 2 次阀下部	热水流量调整阀门下部	ZK4001 场地到闪蒸槽之间的热水管道的中间部位
结垢	微量	无	无

① 在本此试验中，几乎没有在试验片内部观察到结垢。但是在热水箱的排水阀等热水储集部位观察到了估计是硅岩（SiO₂）的白色高硬度垢。由本次试验来看，ZK4001 井的热水在比本次测试条件温度低的领域，很有可能会沉积相当多的硅岩垢。

（ii）结垢的解决方案

在本次结垢试验中，试验片上没有观察到有显著的垢生成。不论热水中含有大量的垢成分，没有垢生成的原因推测是，在本试验中，试验片内流动的水温度高于垢成分的沉淀温度（饱和温度）。这一点可以从，在热水储集部（热水箱的排水阀所用喷嘴等）

温度降低后的热水中观察到有硅岩垢生成来证实。利用 ZK4001 井发电时,汽水分离器的运转压力和热水的回灌温度等还需要慎重探讨。

井内可能有文石垢生成。虽然到目前为止的喷气试验还没有引起生产障碍,但在今后的长期生产中,由于文石垢使井内变狭窄,可能会造成生产流量的减少。文石是碳酸岩矿物,可以通过注入药液或者和浅部生产井一样用机械除去方式来处理。

2-6 地热热储层的追踪调查

2-6-1 地化学的追踪调查

在进行 ZK4001 井长期喷气试验的同时,为了分析深部热储层与浅部热储层的关系,追踪调查了 ZK4001 井及原有浅部生产井所生产地热流体的化学性状的变化。

(i) Cl-Ent (氯-焓) 混合模型

在图 2-6-2 中,代表 ZK4001 井的深部热水和地表水、温泉水呈直线分布,在中间把原有浅部井热水的值也点了上去。从而可以确认,羊八井的浅部热水是由 ZK4001 井代表的深部热水与地表水混合形成的。这与中国方面曾推测的模型相同。在实际的混合过程中,不是地表水直接流入高温热储层,而是与浅部热水和地表水中间成分的流体(即温泉水)混合,这样考虑比较自然。羊八井地区端员组成的热水成分如下所示。

- 4001 深部热水: SiO_2 温度 260°C , Cl 浓度 650 mg/L (深部换算值)
- 浅部热水: SiO_2 温度 $170\sim 180^\circ\text{C}$, Cl 浓度 $350\sim 430\text{ mg/L}$ (深部换算值)
- 地表水: 温度 10°C , Cl 浓度 0 mg/L
- 温泉水: 温度 $80\sim 100^\circ\text{C}$, Cl 浓度 $150\sim 200\text{ mg/L}$

(ii) 浅部热储层与深部热储层的相干关系

原有浅部井在 ZK4001 井的长期喷汽试验之前及喷汽期间显示了以下的变化。

- ZK4001 喷汽试验之前: SiO_2 浓度, Cl 浓度比较稳定 (生产量稳定)。
- ZK4001 喷汽试验的前期: 查明 SiO_2 浓度, Cl 浓度均有下降。
- ZK4001 喷汽试验的后期: SiO_2 浓度, Cl 浓度恢复正常。

根据 Cl-Ent 混合模型,考察了 ZK4001 井喷汽试验前期浅部热水的变化,可以说浅部井中 SiO_2 浓度及 Cl 浓度的下降是由于深部热水的混入比例减少的缘故。伴随 ZK4001 井喷汽的同时,深部热储层的压力降低,因而向浅部热储层供给的深部热水也有所减少。

在 ZK4001 井喷汽试验的后期,确认了 SiO_2 浓度及 Cl 浓度恢复正常的浅部井。这种状态在其它的地热田也有确认了的例子,从下述可以推测其原因。

由于来自深部的高温流体减少,浅部井周边热储层的压力也降低。由于压力的降低,从不同的流动路径来的与浅部热水相同的流体流入井内。ZK4001 井喷汽试验后期的推测是否正确有待于今后继续实施地球化学调查来验证。

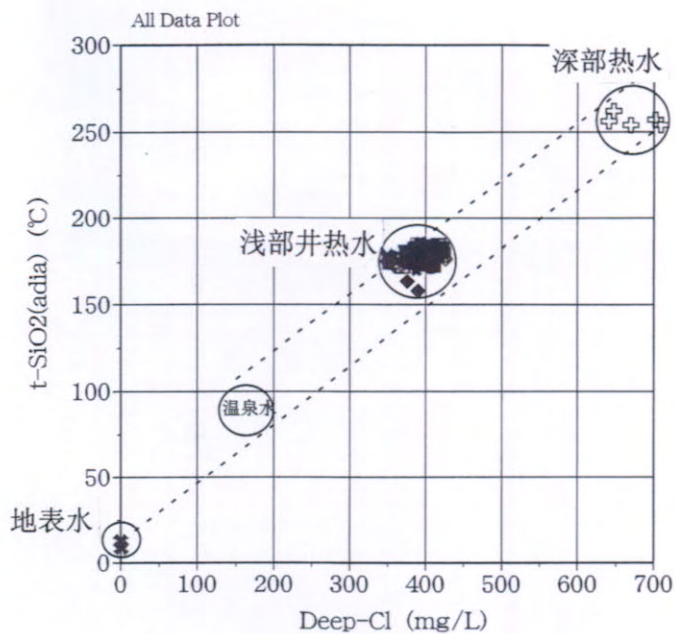
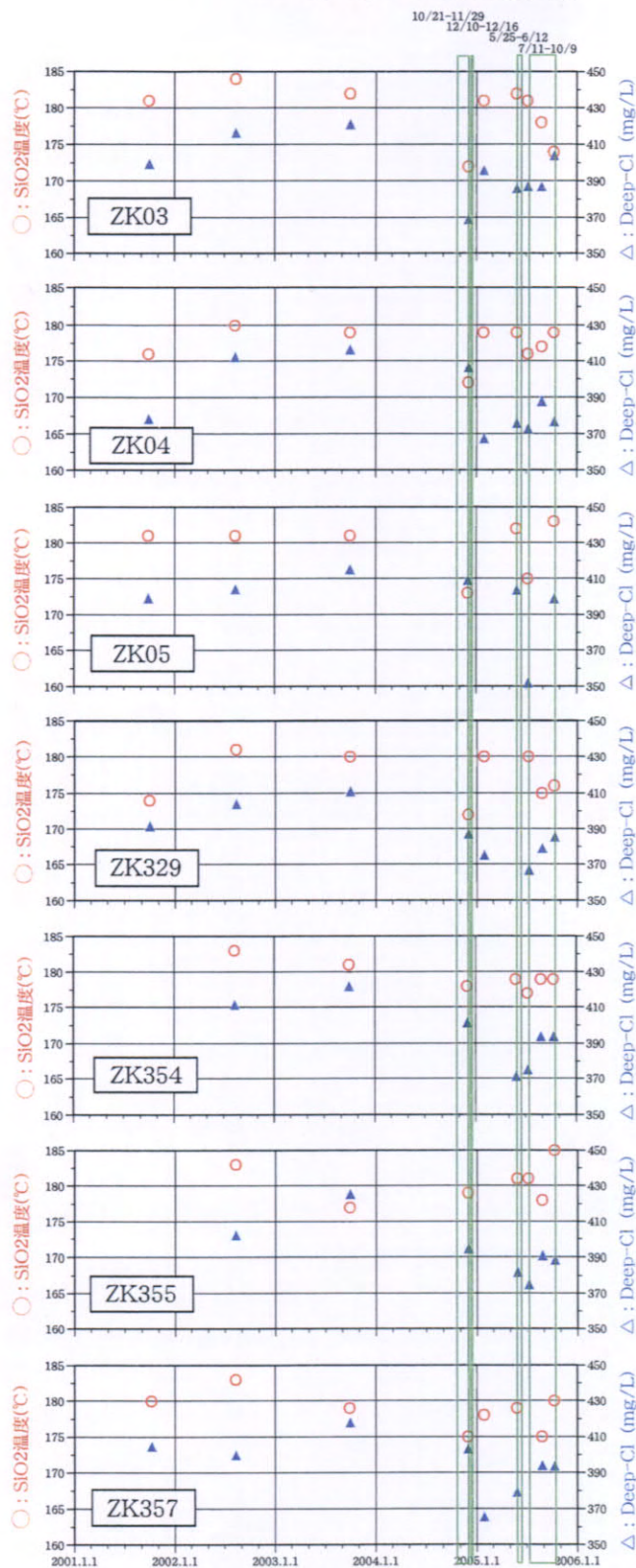
根据 ZK4001 井喷汽试验之前浅部热水稳定的性状及 ZK4001 井喷汽试验时的两种状态,明确了羊八井深部热储层与浅部热储层的相干性。在深部热储层进行生产时,对浅部热储层的影响是不可避免的,这一点从地球化学调查得到了证实。

(iii) ZK4001 井的流体性状

喷汽期间 ZK4001 井的 SiO_2 浓度几乎稳定,流体温度没有下降的迹象。

ZK4001 井热水中的 Ca 浓度呈现了降低的趋势。从 ZK4001 井喷出物的分析结果确认有碳酸钙垢(文石)。从热水性状及喷出物的分析结果两者来看,在井内或者热储层可能

4001 喷汽期间(除了少量喷汽外)



混合模型端成分

- 4001 深部热水 (SiO₂温度 260℃, Cl 浓度 650mg/L; 深部换算值)
- 浅部热水 (SiO₂温度 170-180℃, Cl 浓度 350-430mg/L; 深部换算值)
- 地表水 (温度 10℃, Cl 浓度 0mg/L); 没直接流入热储层
- 温泉水 (温度 80-100℃, Cl 浓度 150-200mg/L); 实际流入热储层

图的说明

二氧化硅 (SiO₂) 浓度: 与地层温度成比例且浓度较高。

流体温度指标 羊八井 SiO₂ 温度与流体温度接近。

Cl 浓度: 地表水—低浓度, 深部热水—高浓度, 无化学反应的物质

深部热水和地表水的混合指标

对 SiO₂ 浓度的变化敏感

SiO₂ 浓度降低 → 流体温度降低, 深部热水比例减少

Cl 浓度降低 → 深部热水比例减少=地表水比例增加

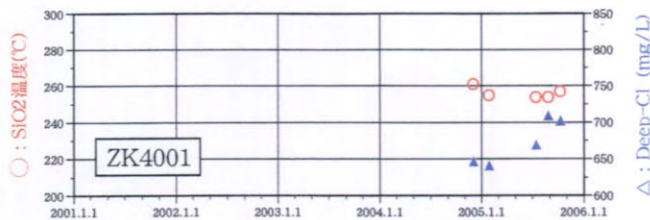


图 2-6-2 Cl-Ent 混合模型图

有垢生成。

(iv) 地球化学调查的总结

从地球化学调查明确了以下几点：

- 羊八井的浅部热水，是由 ZK4001 井代表的深部热水与地表水混合形成的。
- 在深部热储层进行生产时，与浅部热储层的相互影响是不可避免的。
- ZK4001 井的 SiO_2 浓度几乎稳定，流体温度没有下降的迹象。
- ZK4001 井热水中的 Ca 浓度呈现了降低的趋势，在井内或者热储层可能有垢生成。
- 深部热储层气体的浓度比浅部热储层要高。在继续生产中，气体浓度有可能会更高。

2-6-2 水位观测

为了评价羊八井地区热储层压力的历时变化，从 2004 年 6 月开始，对地热田里的钻井进行了水位观测。实施了观测的钻井有 4 孔，ZK203，ZK313，ZK346，ZK353。这 4 孔井都钻在浅部热储层中。

从以上观测结果来看，代表浅部热储层水位的 4 孔观测井的井内水位是比较稳定的。

2-7 地热系统模型

2-7-1 地质构造

(i) 羊八井广域地质构造和地热构造

西藏地热地质大队、「喜马拉雅-青藏高原深部探测(INDEPTH)」及其它调查研究，对包括羊八井在内的广域地质构造进行过探讨。吴珍汉等(2003)著的「青藏高原腹地的地壳变形与构造地貌形成演化过程」一书中对这些成果进行了总结。在此，引用这些内容，对羊八井周边的广域地质构造给予概述。

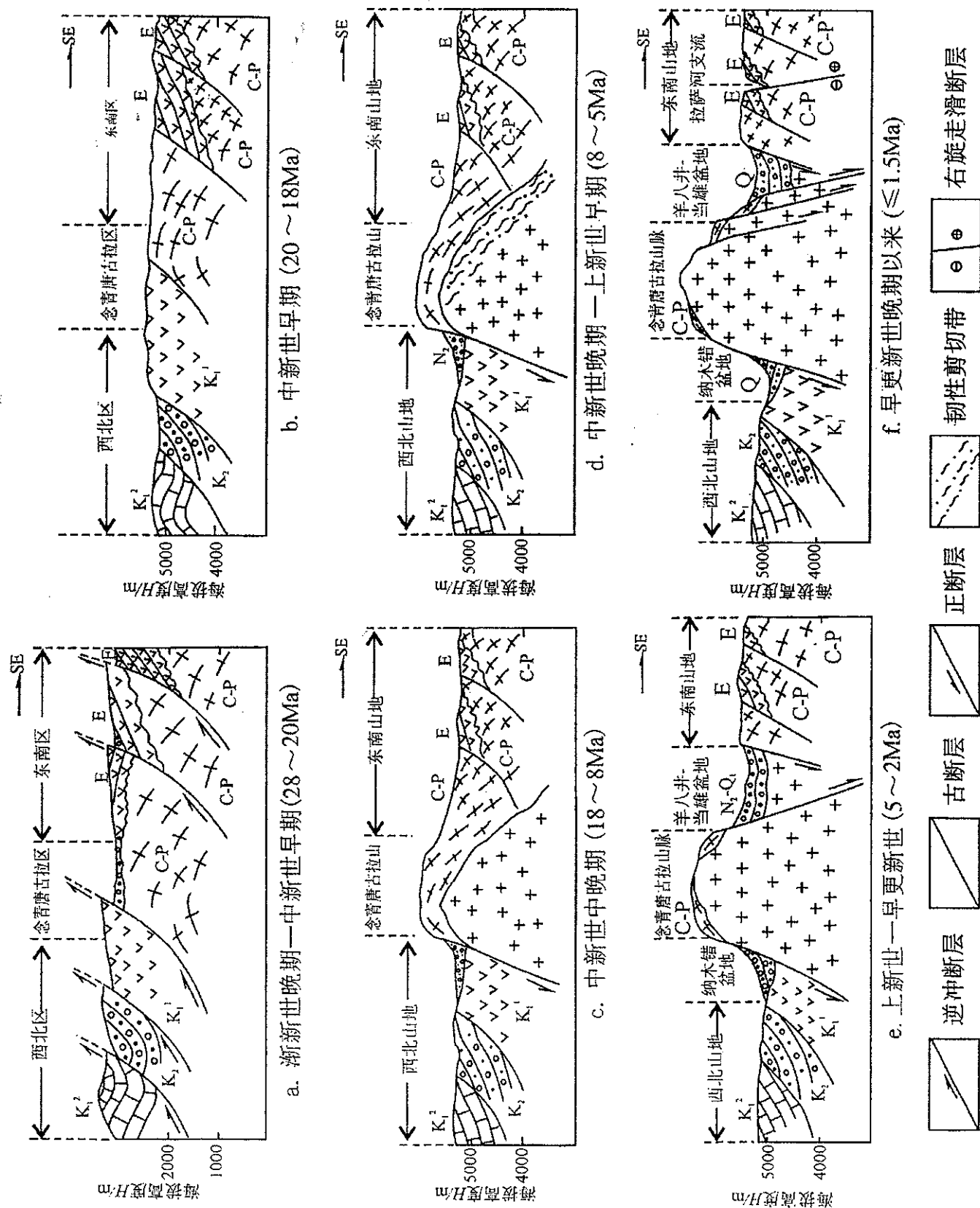
以下引用了吴珍汉等(2003)在第四章第三节的内容：「四，当雄—羊八井，盆地—山地构造地形的发展过程」。

『综合各种观测资料，认为测区构造地貌演化经历了 28~20Ma、20~18Ma、18~8Ma、8~5Ma、5~2Ma、1.5~0Ma 多个不同阶段，逐步形成现今中部盆地—山相间的构造地貌格局。

①渐新世晚期~中新世初期(28~20Ma)，冈底斯—拉萨地块发生强烈挤压缩短地壳增厚事件，形成冈底斯逆冲推覆构造(GTS)与旁多逆冲推覆构造，纳木错构造带也发生逆冲构造运动，导致古近级林子宗组及下伏地层发生区域性褶皱变形和早期岩石地槽的构造隆升；强烈的区域构造挤压导致断块山和压陷盆地相间分布，形成起伏不平的地貌景观(图 2-7-1 a)。在挤压缩短增厚过程中，由于重力均衡效应地表海拔高度逐渐增大。

②中新世早期(20~18Ma)，由于长期强烈挤压，地壳发生巨量缩短，形成双倍地壳；双倍地壳经重力均衡导致地表隆生到海拔 4500~5500m 高度，测区进入地壳挤压缩短增厚期后构造地貌发展阶段，区域构造活动性相对较弱，剥蚀夷平居主导地位，逐级形成缓起伏高原面或高原剥夷面(图 2-7-1 b)。区域构造环境发生自挤压短缩向伸展走滑的重大转换。同时增厚地壳在 17~20km 深度形成局部溶融体，并在局部溶融体顶部分异和汇集花岗质岩浆。

③中新世中晚期(18~8Ma)，地壳转化为区域性伸展构造环境，在上地壳下部(13~



出处: 吴珍汉·叶培盛·胡道功等(2003)

图 2-7-1 西藏当雄羊八井地区构造地貌形成过程模式图

20km)继续发生大规模局部溶融、导致巨量花岗质岩浆沿念青唐古拉发生被动侵位和结晶成岩。在岩浆浮力作用下,念青唐古拉山脉开始缓慢隆升,东、西两侧旁多山地和纳木错地块相对下降(图2-7-1c)。

④中新世末期(约8~5Ma),在念青唐古拉地块与东南部羊八井—当雄—旁多地块之间,发生区域性拆离滑脱事件,形成念青唐古拉山东部NE向展布的大型低角度韧性剪切带(NSZ),导致念青唐古拉山NW方向的掀斜和旁多山地向ES方向拆离滑脱运动(图2-7-1d)。

⑤上新世—早更新世(5~2Ma),在念青唐古拉山东侧发生裂陷,随着念青唐古拉山脉快速隆升,两侧地块发生快速裂陷,逐步形成羊八井—当雄裂陷谷地,发育当雄、宁中、拉多岗、羊八井裂陷盆地,形成北东—北北东向盆—山构造地貌。在羊八井—当雄盆地两侧即盆地与山脉之间,形成NE走向的高角度边界正断层;晚期高角度边界脆性断层切割早期低角度糜棱岩带,形成内部相对平坦的盆地面;同期在西北部形成纳木错西岸山地开始隆升,纳木错盆地开始裂陷,形成念青唐古拉西缘边界正断层(图2-7-1e)。

⑥早更新世晚期以来($\leq 1.5\text{Ma}$),羊八井—当雄地堑伸展断层活动和盆地裂陷加剧;盆地面海拔高度进一步降低,裂陷中心盆地面平均海拔高度降低至约4400m;同期形成古仁拉—羊八井、车玛千拉—旁多、申错—曲古等NW向走滑断层,并沿NW向走滑断裂带逐步形成古仁曲、藏布曲、拉萨河上流旁多支流与羊八井峡谷、乌鲁龙峡谷、曲古—九子拉峡谷及多级河流阶地等构造地貌(图2-7-1f)。晚更新世—完新世在西北部形成纳木错盆地与面积10万km²的古大湖,古大湖在逐步退缩过程中形成最高达139m的多级湖积阶地。

第四纪中晚期断裂活动、河流侵蚀与风化剥蚀加剧了不同山地主夷平面或山顶面的裂解和分异,逐步形成盆地—山相间分布的构造地貌格局,崎岖陡峭的山岳地貌景观和规律性展布的沟谷、水系网络;沿现代河发育2~6级河流阶地,河流侵蚀加剧,在旁多山地和念青唐古拉山形成深切峡谷,最终塑造出现今颇具特色的地貌环境。』

(ii) 羊八井地区的地质构造

(1) 地质层序

羊八井地热田的地层从下到上大致分为:念青唐古拉群,花岗岩类,下第三系以及第四纪沉积物。

1) 念青唐古拉群

念青唐古拉群分布在羊八井地热田西北方的念青唐古拉山脉。念青唐古拉群是由前震旦系的片麻岩、结晶片岩以及花岗岩等组成。

2) 花岗岩类

花岗岩类是由燕山期花岗岩、喜山期花岗岩、花岗斑岩等组成。燕山期花岗岩是在燕山期(白垩纪)侵入的岩体,分布于地热田东南部。喜山期花岗岩是在喜山期(从白垩纪到第三纪)侵入的岩体,分布于地热田西北部。花岗斑岩被确认分布于CJZK3001井深度814~1,350m和ZK4002井深度489~616m的区间范围内,并且侵入到花岗岩体中,但是侵入时期不明确。

3) 下第三系

下第三系是由各种火山喷出物形成, 出露于念青唐古拉山脉东南山麓(地热田的西北部)和藏布曲右岸的唐山山脉西部山麓。很多羊八井地热田的钻井已确认分布在下第三系。在地热田西北部与喜山期花岗岩呈不整合覆盖接触, 在地热田东南部与燕山期花岗岩呈不整合覆盖接触。

4) 第四纪沉积物

第四纪沉积物主要是由砾、砂、泥等组成的冰河沉积物。冰河沉积物的粒径差异较大, 属于砾构成的无层理岩相。由于砾没被淘汰, 有的表面仍留有擦痕。

(2) 断裂构造

羊八井地区的低角度念青唐古拉韧性剪切带(NSZ)和高角度正断层群是形成地热储层的重要断裂构造。

1) 念青唐古拉韧性剪切带(NSZ)

根据 INDEPTH 的地震波解析, 在羊八井地下 1,000~1,500m 附近, 存在北东走向、向南东约 30 度倾斜的折射波速度构造急变面。该急变面在剪切带具有正断层的性质, 被命名为「念青唐古拉韧性剪切带(NSZ)」。NSZ 的厚度认为有数公里。羊八井地区的 CJZK3001、ZK4001、ZK4002 及 ZK352 井出现的糜棱岩分布区与 NSZ 相当, 而 NSZ 的深度和倾斜度与该地区深部热储层的深度、倾斜度基本一致(图 2-7-2、4)。但是, NSZ 是在 8~5 Ma 前的韧性剪切带中形成的糜棱岩, 而不是脆性的破坏, 所以仅此很难成为形成热储层的裂隙群。另一方面, 羊八井地区分布着多数从 5 Ma 到现在活动的高角度正断层。可能 NSZ 上面的易滑动部分与高角度正断层交叉部位发育的裂隙群是形成深部热储层的原因。而且, 推断该高角度正断层到达的更深部位是来自于深部热源附近地热流体的上升通道。

2) 根据地表调查查明的断层

根据地表调查查明的断层有 10 条(F1~F10)(图 2-7-3(1)、(2))。断层分 3 个系统(NNE-SSW 系, NE-SW 系, N-S 系~NNW-SSE 系), 且都穿过第四系。沿着这些断层, 根据喷气、变质带的有无, 热水蚀变的程度等来评价地热流体的流动程度。F2 被评价为热水流动活跃的断层, 其西北侧的透水性可能比较高。

3) 用物理探测法推测断层

断层 F2 显示有电阻率结构及重力结构。通过 MT 探测的二维解析可以确定, 硫黄村附近显著的 NNE-SSW 系电阻率不连续线反映了断层 F2 的存在(图 2-7-3(1)、(2))。推断这种电阻率不连续线从地表附近一直延伸到深度 1700 m 的地方, 并且形成了西北侧高电阻率区域和东南侧低电阻率区域的分界线。根据重力探测的结果发现, 硫黄村附近 NNE-SSW 方向的重力不连续线也显示了断层 F2 的存在。对于断层 F6, 由于沿 F6 有硅化带和明矾石带分布, 说明地热流体有可能沿 F6 流动(图 2-7-3(1)、(2))。

2-7-2 热源

根据 INDEPTH 的共通中间点反射法地震探测等的调查结果, 羊八井地区地下 14~18km 的深度为存在的部分熔融体的顶部(图 2-7-4)。熔融体的岩浆是热源的根源。羊八井地热田热源的观点分为以下 2 种:

①假定地下 14km 处熔融体温度是 700℃, 从该深度往上到地下 6 km 左右, 热通过热传导