

典型高温地热系统——羊八井热田基本特征

多吉

(西藏自治区地质矿产勘查开发局地热地质大队, 拉萨 850032)

[摘要] 羊八井热田是属于陆陆碰撞板缘非火山型高温地热田。热田是由3个不同能的热储层构成, 即浅层、深部第一和第二热储层, 实质上它们属同一个水力系统, 是一个完整的地热系统的不同部位。浅层热储由第四系松散沉积物及部分基岩风化壳构成, 其埋深在地表以下180~280 m, 热储温度130~173℃, 水质类型为 $\text{Cl}^- - \text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ 型水, 属深部热流体与冷水混合的产物, 流体以液相为主。深部热储由变质杂岩体中的滑离断层系构造空间构成, 属基岩裂隙型脉状或带状热储, 其中深部第一热储埋深为950~1350 m, 最高温度259.6℃; 深部第二热储位于1850 m深, 热储最高温度可达329.8℃, 深部热流体水质类型均属 $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ 型, 气体组份中 CO_2 占主导地位。

[关键词] 高温地热; 热储层; 成因; 羊八井; 西藏

[中图分类号] TK521 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)01-0042-06

1 引言

西藏自治区位于中国西南边陲, 是素有世界屋脊和地球第三极之称的青藏高原的主体。高原特殊的大地构造环境下形成的地热资源分布广泛、种类繁多、成因独特, 不但具有巨大的资源开发利用潜力, 而且对研究青藏高原的隆升及区内丰富矿产资源的成因方面都具有重要的意义。

根据《西藏地热》^[1]及后续地热地质工作的成果^{①~⑤}, 采用4种地球化学地热温度计进行计算, 西藏境内已发现热储温度高于150℃的地热田131个, 其中8个热田的热储温度超过200℃。这些高温热田集中分布在沿雅鲁藏布缝合线及两侧近代活动构造带内。羊八井热田是我国目前已知的热储温度最高的地热田, 其深部热储平均温度252℃, 最

高记录达329.8℃。

热田地质勘查工作开始于1976年, 在勘查阶段钻了45口勘探井, 开展过地球物理、地球化学和地热地质等综合勘查工作。圈定42 km²的热田面积, 并于20世纪80年代开始陆续钻了25口生产井和13口回灌井。

自1977年9月羊八井热田第一台1 MW 试验机组发电成功, 到1991年装机容量已扩大到25.18 MW, 年发电量可达 1×10^8 kW·h。然而, 直至目前可开发利用的只是地热田中补给能力有限的浅层资源。经过20余年的开发, 浅层资源的能量和质量均出现明显的下降, 已无力满足现有25.18 MW 装机容量发电机组的正常运行, 同时, 热田有效生产面积也在急剧萎缩, 原有的地表热显示景点均已消失。

[收稿日期] 2002-07-29

[作者简介] 多吉(1953-), 男(藏族), 西藏加查县人, 中国工程院院士, 西藏地、热地质大队教授级高级工程师

① 多吉, 等. 西藏羊八井地热田北区深部资源普查报告. 西藏地热地质大队, 1996

② 多吉, 等. 羊八井热田深部高温资源开发性勘探ZK4001完井地质报告. 西藏地热地质大队, 1996

③ 多吉, 等. 羊八井热田深部高温热储形成机制研究报告. 西藏地热地质大队, 1998

④ 王代昌, 等. 羊八井热田形成地质条件及资源评价. 西藏地热地质大队, 1988

⑤ 覃昌龙, 等. 西藏地热区划. 西藏地热地质大队, 1989

鉴于上述情况，1993 年开始对热田北区升流区断续开展了深部资源的地质勘查工作，并在 1993 年和 1997 年分别钻了 2 口深井。深部钻探资料表明热田深部存在高温地热流体，其流体具有不结垢、热焓值高、产量稳定等显著特点。其中 1997 年施工完井的 ZK4001 孔，单井发电潜力可达 12.58 MW，单井汽水总量可达 302 t/h，井口工作温度 200 ℃，工作压力 14.7 MPa，具有很高的开发价值。

2 地质背景

2.1 大地构造背景

全球性环带状分布的地热异常带的形成和发展与全球板块构造活动有着密切关系。根据板块构造学原理，地球的刚性外壳即岩石圈由于其下部软流圈的不均匀运动而破裂成若干个板块，它们在软流圈上相互滑动或飘移。在各板块的边界部位由于相互作用而引起岩浆活动及与其伴随的地热活动，因而在全球范围内形成岩浆活动和与此相关的地热异常的环带分布格局。即环太平洋热带和地中海—喜马拉雅热带^[2]。羊八井热田是地中海—喜马拉雅热带中的大陆非火山型高温热田之一。

地学界普遍认为：印度板块向北飘移与欧亚板块发生碰撞，并向其下部俯冲，致使中生代的一片汪洋隆起为世界最高的陆地。同时，印度板块俯冲到欧亚板块下部的边缘部分被加热熔融，并沿上板片的构造薄弱地带上浮，为形成和发展青藏高原丰

富多彩的地热活动提供了大地构造和热源条件，构成喜马拉雅热带形成的基本构造背景。

2.2 羊八井盆地地质特征

羊八井盆地属西藏境内走向近北东向的若干条活动构造带当中规模最大，发育较完整的一个断陷盆地。其盆地南端与雅鲁藏布缝合线沟通，北西以念青唐古拉变质岩基底隆起山体为屏障，向北穿过冈底斯火山岩浆弧后沉积盆地南侧。

盆地内部不同时期形成的断层呈阶梯状排列，断裂产状由边缘向盆地中心倾斜，沿断层线发育断层崖及断层三角面，并呈定向成群展布。断陷带的垂直断距达 200 ~ 300 m。自新生代以来该盆地构造活动剧烈，在盆地边缘山坡，第四纪冰期的冰碛层阶梯被北东向断裂剪切错断，现代冲洪积扇以高吊套叠出现。据地震资料记载，1921—1991 年间 4.4 级以上的地震曾发生过 30 次，这些都表明羊八井盆地晚近时期频繁的构造活动特征。

盆地基底的构造为念青唐古拉腹背斜。该背斜轴部由前震旦系变质杂岩体组成，两翼主要由石炭系和白垩系组成。在轴部和翼部之间缺少了震旦系—泥盆系一系列地层，而且其间多为断层接触，并伴有大量的岩浆侵入。这反映了在喜马拉雅板片和冈底斯—念青唐古拉板片碰合之后，地幔隆升，大陆活化，陆内发生析离作用，在拉张上隆环境下底劈作用滑离断层的特征（图 1）。位于该背斜南缘的羊八井断陷盆地及盆地内的水热活动就是在这种断陷作用（滑离断层作用）的构造背景下形成^①。

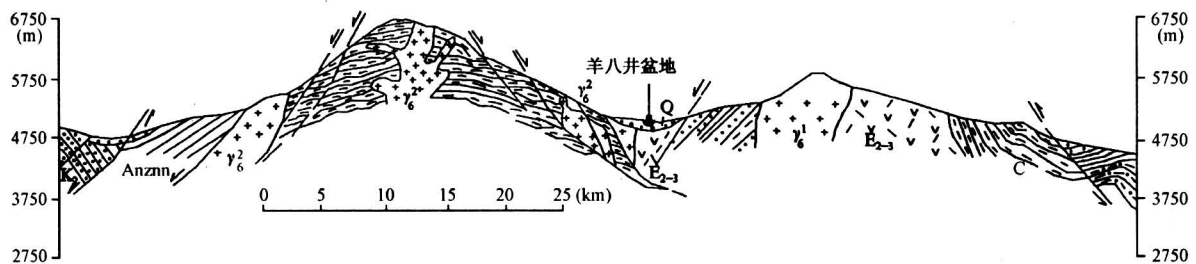


图 1 念青唐古拉地质剖面图

Fig.1 Geological sectional drawing in the Nianqingtanggula Mountain

Anznn—前震旦系念青唐古拉群变质杂岩；C—石炭系变质砂岩及砂板岩；K₁—白垩系下统火山碎屑岩；K₂—白垩系上统火山碎屑岩；E₂₋₃—始—渐新统火山岩；γ₃²—燕山晚期花岗岩；γ₆¹—喜山早期花岗岩；γ₆²—喜山晚期花岗岩；Q—第四系砂砾岩及砾卵石层

热田位于羊八井断陷盆地中心略靠念青唐古拉山南麓。热田南侧为冈底斯火山岩浆弧，北侧为念青唐古拉变质岩体隆升山体。热田高温中心位于念青唐古拉南缘滑离断层带上盘部位。

热田内断裂构造发育，并伴有局部隆起地貌和

① 多吉，等. 西藏羊八井地热田北区深部资源普查报告. 西藏地热地质大队，1996

地面塌陷。以中尼公路为界,热田可分为南、北两区。南区浅部地层为第四系冲洪积层,基底由喜马拉雅山早期花岗岩和部分凝灰岩组成;北区浅部地层以第四系冰碛物为主,见有厚度不等的花岗岩风化壳,基底由念青唐古拉变质杂岩体和喜马拉雅山晚期花岗岩构成。热田南、北两区浅部地层蚀变强烈,蚀变矿物中高岭土占主要地位。

热田内有北东向和北西向两组断裂构造,该两组断裂均属张性活动断裂,它们相互交接或切穿形成棱块状构造格局。

3 热储特征

根据热储层的不同埋深及流体性状的差异将羊八井热田的热储层分为浅层和深层两部分,两者间的关系密切,属同一个水热系统的两个不同部位。但浅层热储是由深部热流体经侧向补给储集于浅部第四系孔隙而成。深部热储则由热流体垂向升流过程中在基岩构造裂隙空间储集、运移形成的热储层。两者在地层中储集形式和流体性状等方面都具有一定的区别,故分别叙述如下:

3.1 浅层热储

这里所指的浅层热储为第四系孔隙型热储,其最大特征是埋深甚浅。热田北区有规模较小的基岩顶部风化壳构成热储空间。浅层热储分布范围约为 14.8 km^2 。根据浅层热储温度场分布特征,其温度南低、北高,热流体具有北西—南东方向侧向补给特征。

热储埋深在地表以下 $180\sim 280\text{ m}$ 间,海拔高程为 $3\ 800\sim 4\ 020\text{ m}$,岩性由第四系冲洪积砂砾石层、冰碛砂砾层、基岩顶部花岗岩风化壳组成。热储顶部由厚度不等的泥砾层或粉砂质粘土层构成盖层。热储底部基岩为喜马拉雅山早期花岗岩和凝灰岩,热田北区局部见有糜棱岩化花岗岩。浅层热储流体温度一般在 $140\sim 160\text{ }^\circ\text{C}$,最高可达 $173\text{ }^\circ\text{C}$ 。流体主要为液态,气体含量较少,水质类型以 $\text{Cl}^- - \text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ 型水为主,属深部流体与地表冷水混合产物,混合后尚未达到新的水岩平衡。矿化度为 1.5 g/L ,气体中 $\varphi(\text{CO}_2)$ 一般大于 90% ,pH值 $7\sim 9$ 。

浅层热储是目前羊八井地热电厂的生产层,其日开采汽水总量约为 $12\ 000\text{ t}$ 。大部生产井的工作温度为 $125\sim 140\text{ }^\circ\text{C}$,工作压力为 $1.76\sim 3.72\text{ MPa}$ 。

3.2 深部高温热储

深部热储分布于热田北区 $3\ 630\text{ m}$ 高程以下。根据钻孔资料及物化探异常,结合地质构造特征分析结果表明:深部热储有效面积约为 3.8 km^2 ,流体的储集和运移,严格受本区断裂构造的控制,流体主要赋存于断裂破碎及构造裂隙空间中,并以此作为储集、运移的空间,以高温热储带的形式存在于一定深度和范围,属较为典型的基岩构造裂隙型热储。热储层岩性为糜棱岩化花岗岩、花岗质糜棱岩和碎裂花岗岩,岩石具有遭受韧性剪切和脆性剪切双重作用之特征。热储层岩石蚀变强度较高,主要蚀变矿物有高岭石、绿泥石、方解石、石英、黄铁矿、伊利石、绢云母,方沸石、白云母、黑云母等,特别是 $1\ 000\sim 1\ 600\text{ m}$ 深度内见有绿泥石、白云母、绢云母等蚀变矿物组合,且呈细脉状产出,表明属热液活动的产物,其形成温度 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,与井内实测温度相当。

热储盖层由强蚀变花岗岩、花岗斑岩及黑云母花岗岩组成,均属不透水岩层,特别是浅部强蚀变花岗岩,原岩中的长石类矿物均被蚀变呈高岭土化,起到良好的隔水作用。

根据ZK4002、ZK4001孔资料表明,羊八井热田深部有两个高温热储层,其中第一热储层位于地表以下 $800\sim 1\ 300\text{ m}$,井温度 $250\sim 278\text{ }^\circ\text{C}$;第二热储层位于 $1\ 800\text{ m}$,其温度大于 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 。

深部第一热储层厚度大于 350 m ,热储层平均温度 $251\text{ }^\circ\text{C}$ 。1997年完井的ZK4001孔,在放喷 30 min 后井口各类参数趋于稳定。放喷测试和观测 15 d ,参数无大的变化,温度和压力略有增大趋势,井口工作温度 $200\text{ }^\circ\text{C}$,工作压力为 14.7 MPa ,单井汽水总流量为 302 t/h ,单井发电潜力可达 12.58 MW ,且流体具有不结垢、产量稳定等优点。该井完井后进行了多次井温测量,在井深 $1\ 125\text{ m}$ 处测得最高温度 $255\text{ }^\circ\text{C}$,虽然几次可测温度均存在不同程度的差异,但井温曲线的变化趋势是一致的。

深部高温流体水质类型属 $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ 型,矿化度为 2.8 g/L ,pH值为 8.66 。特征元素Cl、Na、B和 SiO_2 占各类离子总和的摩尔分数为 85% ,气体组份中 CO_2 占主导地位,其次是 N_2 、 O_2 和 H_2S 气体,常规组份 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Li^+ 、 B^{3+} 等含量明显高于浅层流体,并出现Sr组份,矿化度比浅层高 $1\ 000\text{ mg/L}$,Cl与B之比在 $2.28\sim$

2.30 之间。因此, 可以认为高的 Li、B 等组份含量及 Sr 的出现与深部岩浆热源有直接关系。

深部第一热储层和第二热储层均属基岩构造裂隙型高温热储, 由断裂构造裂隙空间构成, 热流体以脉状或带状形式储集于此空间。

4 成因分析

羊八井热田勘查开发以来, 国内外专家对地热田成因提出过多种不同的看法和认识。专家们从不同角度论述了热田的地质构造、热源、热储特征、流体的运移和主通道的位置等, 这些论述各抒己见, 对深化认识热田水热系统起到了积极的作用。随着 20 余年勘查、开发工作的进行、资料的积累和认识的提高, 对热田的成因认识趋向一致。下面试从有关方面来探讨这一问题:

4.1 热源条件

1) 羊八井热田位于念青唐古拉变质岩体和冈底斯陆缘火山—岩浆弧交接部位, 该区自白垩纪晚期以来岩浆侵入活动极为频繁。根据岩石同位素年龄资料表明, 该区最早的岩浆活动是白垩纪, 最晚可到上新世。早期, 印度板块向北运动致使印度大陆和欧亚大陆之间的特提斯洋壳向欧亚大陆之下俯冲, 并沿位于雅鲁藏布江一线向北倾的贝尼奥夫带消减。这种作用可产生强大的熔融体和热流, 导致下部地壳的不断重熔, 重熔岩浆在挤压应力驱动下进入上部地壳。

2) 羊八井热田北区 ZK4002、ZK4001 及念青唐古拉山体南缘发现了距今 700~1 000 万年间的花岗岩侵入体, 表现出岩浆活动仍很活跃。尤其是念青唐古拉变质核杂岩体核部, 发育有顺层和顺裂隙灌入的岩脉。远离核部岩脉减少, 直至消失, 表现出变质核杂岩体核部与岩浆活动的相关性。

3) 根据人工地震法资料表明羊八井热田部深部约 22 km 处存在一低速层, 可解释为地下岩浆体。根据大地电磁探 (MT) 成果表明, 在羊八井热田北区深部约 5 km 以下存在一电阻率为 $5\Omega\cdot\text{m}$ 的低阻层, 推断为正在冷却的岩浆房^[3]。

4) 根据热田内的深井测温成果, ZK4002 孔在 1 850 m 深处, 井温可达 300℃ 以上, 其地热增温梯度超过 150℃/km。按花岗岩深融温度为 600~700℃ 推算, 约在 4~5 km 深就有熔融岩浆房存在。

5) 根据蚀变矿物特征, ZK4002 和 ZK4001 孔

在 1 270~1 850 m 井段出现黑云母、白云母和绢云母呈细脉状充填于裂隙中, 这些矿物组合温度在 300℃ 以上, 它们是富 K^+ 高温 (>300℃) 热流体形成的矿物, 是富岩浆热液的表现。

综上所述, 采用不同方法从不同角度分析研究, 都证实了羊八井热田深部存在高温岩浆熔融热源。

4.2 升流构造条件

热田高温升流区位于念青唐古拉变质核杂岩体南缘的一套北东向滑离断层系中。该套滑离断层系统总体走向北东 35° 左右, 发育在前震旦系变质岩体中。整个断裂延伸可达 150 km, 分布在念青唐古拉山主脊南侧。沿断裂发育有较典型的断层三角面和断层崖等地貌特征, 并沿断裂线见有若干个地热显示点。羊八井热田即是其中之一, 表现出该断裂在晚近时期的活动具张性特征。热田北部山前发育有断层破碎带, 局部破碎带宽达 1 km。破碎带内见有构造角砾岩、碎裂岩、混合岩、硅化带和水热蚀变等, 表现出规模宏大的走滑断层系特征^[4]。根据地表及热田深井揭露的岩石、构造等分析, 该滑离断层系的整体结构大致分为浅层次的现代活动的若干条叠瓦式年轻正断层及碎裂变形和深层次的由超碎裂糜棱岩、片麻岩等组成, 其片理和面理结构发育的韧性变形两大部分。即具有浅层次水平拉伸作用和深层次垂向压缩作用的两种不同力学状态 (图 2)。在念青唐古拉山主体急剧抬升作用下, 两侧形成拉张环境, 使浅部正断层与深部韧性下滑离断层沟通, 而深部下滑离断层不仅导致了变质核杂岩体核部由深熔作用生产的岩浆上侵, 而且又有效沟通了深部热源 (岩浆热源) 与浅部的环境。^①

4.3 热流体的补给、径流及排泄条件

4.3.1 补给 在具有热源的条件下, 形成高温水热系统的另一重要条件是要有足够的补给地下水的水源条件。根据热田地下热水氢、氧同位素分析结果表明, 热水具有现代大气降水及地表水渗入来源的特征。其补给高程在 4 400~5 800 m 之间, 一般在 4 860 m 左右。该高程正处于念青唐古拉南缘滑离断层系下盘附近, 与当地雪线及地表水源头分布高程一致。念青唐古拉主峰 7 111 m, 一般海拔均在 6 000 m 以上, 山顶终年积雪, 现代冰川

^① 多吉, 等. 羊八井热田深部高温热储形成机制研究报告. 西藏地热地质大队, 1998

发育,为一储量丰富的“固体水库”。因此,本区地下热水是来自念青唐古拉山的大量冰、雪融水沿

断裂带渗入地下经深循环,并被深部岩浆热源加热对流的结果。

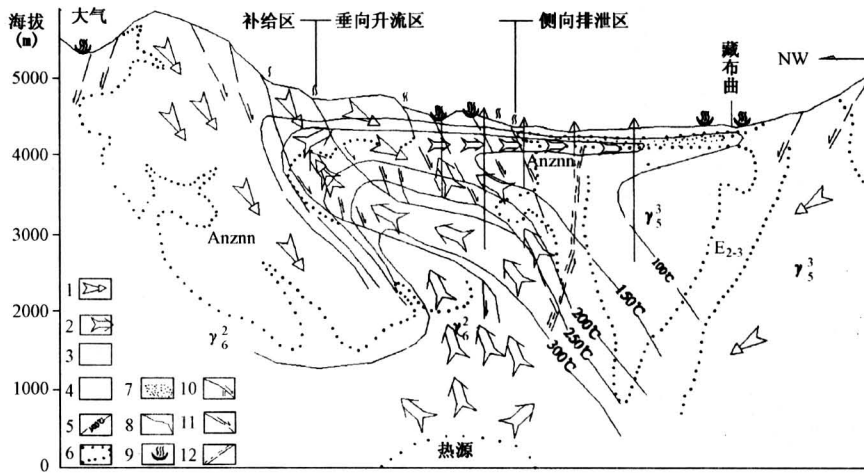


图2 羊八井地热田水热系统概念模型图

Fig.2 The conceptual model of hydrothermal system in Yangbajing geothermal fields

1—大气补给水; 2—上升热流水; 3—温度等值线; 4—第四系孔隙型热储; 5—基岩孔隙型浅热储; 6—深部似层状基岩裂隙型高温热储; 7—沸泉; 8—蒸汽地面; 9—地质界线; 10—滑离断层; 11—正断层; 12—隐伏断层

4.3.2 径流及排泄 热流体的形成、赋存及运移主要受断裂构造的控制。位于变质核杂岩体内部的原生节理、次生裂隙及滑离断层系统脆性上析离带构造空间,接受了来自高山区的冰雪融水和大气降水后形成裂隙含水带。地下水在重力作用下沿断裂破碎带进一步下渗,不断补给地下深部含水层,在深循环过程中不断与炽热的岩体进行水热交换,吸收岩体的热量后,在一定深度和范围内形成高温水热环境,并在一定的构造条件下储集运移。由于热水产生的密度差,造成自然上升流。上升热流体沿断层带上行,在一个较封闭的裂隙系统形成高温热储。该区除北东向滑离断层系统外,还有北西向、近南北向、甚至近东西向多组断裂。其中规模较大者切入下滑离盘,从而沟通了滑离面上、下之间的水力和热力联系,使深部高温流体继续上升。由于减压作用,热流体开始汽化,并逸出大量不凝气体(如 H_2S 、 CO_2 、 H_2)和水蒸汽,在近地表处形成大片的酸性蚀变地面,组成了浅部热储盖层。流体的上行受阻后,循环压力降向南东方向扩散,其主流沿北西、南东向水平运动,进入花岗岩风化裂隙层和第四系砂砾层,形成浅层热储。

热田位于念青唐古拉南麓山前带,就一般水文地质条件而言,属地下水径流区。但作为一个水热系统,也有其本身的特点:南区地表热显示强烈,

属地下水热的“泄汽区”;北区具就地升流补给的特点,也具有地下水“垂直排泄区”特点。南区浅层热储则表现为具异地侧向补给的特点,属地下水“侧向排泄区”。

总之,热流体是以断裂破碎带作为补给、循环上升的通道,并在断裂破碎带及裂隙、孔隙空间储集、运移。主要以泉、冒汽孔、放热地面、水热蚀变等方式排泄其能量。热田自1977年开发至今已有20多年的时间,地下热水的开采量亦是该区地下水的主要排泄方式。实际上,经深循环加热后的高温热流体,其上升运移的整个过程,也是其下面进行能量交换以达到新的运动平衡的过程^[5]。

参考文献

- [1] 佟伟,童铭陶,章知非,等. 西藏地热[M]. 北京: 科学出版社, 1981
- [2] Edwards L M 等, 耿俊峰译. 地热能源手册[M]. 北京: 地质出版社, 1987
- [3] Millo. Geothermal Resources Development In China (Tibet) Project; CPR/93/X01 2nd Interim Report. Grothermica Italianasrl pisa, 1995
- [4] 朱志澄,等. 逆冲推覆构造[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989
- [5] 卡普迈耶·O, 海涅尔·R 著. 地热学及其应用[M]. 北京大学地质学系地热研究室译. 北京: 科学出版

社. 1981

The Basic Characteristics of the Yangbajing Geothermal Field— A Typical High Temperature Geothermal System

Duo Ji

(*Geothermal Geological Brigade, Bureau of Mineral and Resource of Tibet, Lhasa 850032, China*)

[Abstract] The Yangbajing Geothermal Field is one of non-volcanic high-temperature geothermal fields. The Yangbajing convective system consists of two reservoirs at different depth. The shallow reservoir is constituted of loose alluvium of Quaternary and altered granite of Himalaya. Temperature inside the shallow reservoir is in the range of 150~165°C at the depth of 180~280 m. Shallow thermal water is of sodium chlorite type and mixture of deep hot water and cold groundwater. The deep reservoir is in a slip-fault zone of the core complex. It is a veinor zone-shape reservoir. The deep reservoir can be divided into two parts. The upper parts of temperature 251°C is at depths ranging from 950m to 1350 m. The lower part is below 1850 m, in which the measured temperature is as high as 329°C. The deep thermal water is of sodium chlorite type, too. Carbon dioxide is a major non-condensate gas in the shallow and deep reservoir.

[Key words] high temperature geothermal; thermal reservoirs; genesis; Yangbajing; Tibet

(cont. from p. 37)

The first-two Chinese prototype transmission electron microscopes were constructed in 1958-1959 in Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS. Beijing Scientific Instrument R & D Center (KYKY) developed the first domestic scanning electron microscope. According to a survey in 1996-1997 there were 1 921 electron microscopes including 756 transmission electron microscopes (TEM) and 1 165 scanning electron microscopes (SEM) in China at that time. Of these 1 921 TEMs and SEMs, 1006 were domestic production (mostly medium- and low- grade electron microscopes) accounting for 52.4 % of the market, and 915 instruments were imported (47.6 %). Beijing Scientific Instrument R & D Center, CAS (KYKY Technology Development LTD), Shanghai electron-Optical Technology Research Institute and Jiangnan Optical Instrument Plant produced more than 95 % of these 1 006 home-made electron microscopes. The first domestic scanning tunneling microscope (STM) was completed in 1987 in Beijing Open Laboratory of Electron Microscopy under CAS. Since then more than one hundred scanning probe microscopes of various types have been constructed in China. The Chinese electron microscope and scanning probe microscope production should be improved and enlarged to cover the progressively increasing demand of research and development work in China.

[Key words] nanotechnology; nano-measurement; nano-machining; electron microscope; scanning probe microscope; focused ion beam-electron beam (dual beam) equipment; instrumentation