

CJZK3001 井はサイドトラック坑を 1,109.14m まで掘削し、その間 881m で全量逸泥、1,051~1,055m と 1,095~1,096m で無荷重掘削(大規模な亀裂に遭遇)となった。その後 2004 年 9 月 3 日に孔明管をセットして掘削作業を終了した。掘削作業終了から噴気誘導までのスタンディングタイムは 6 日間であった。噴気誘導前の坑内水位は-108m であった。

噴気誘導はエアリフト法により行った。

圧縮空気を送り込むためのコンプレッサーは、吐出圧力 1MPa(10kg/cm²)のものを 3 台使用し、容量 12m³の空気タンクに一旦圧縮空気を貯蔵してから坑内に送気する方法で実施した。

(2) 噴気誘導作業経過と結果

① 9月9日

この日のエアリフトは合計 9 回行ったが、連続噴出にはいたらなかった。

② 9月10日

この日は合計 5 回のエアリフトを行った。しかし状況は 9 日と同様で連続噴出には至らなかった。

(iv) PTS 検層

CJZK3001 井は噴気に至らなかったため、噴気しなかった原因を調査することを目的として 9 月 13 日、14 日、17 日に PTS 検層を実施した。9 月の PTS 検層の結論は次のとおりである。(図 2-4-22)

- ① 深度 135m 付近、165m 付近、205m 付近でケーシングパイプが破損しており、注水した水がほぼ全量逸水する状況である。
- ② 注水中の検層では 165m から 800m までは下向きの流れが確認され、800m 以深の深部において地下亀裂の透水性があることが確認された。
- ③ 深度 211m 付近で未固結のセメントが押し出されてきて坑内を閉塞する状況があることが推定された。
- ④ ここで使用した PTS 検層器のスピンナーによる流速の計測限界はこれまでの経験上 0.1m/s である。この流速を 13-3/8" ケーシングでの流量に換算すれば、約 24m³/h となり、30t/h 注水時ではスピンナーの計測限界に近かったと考えられる。このことを考慮すれば、30t/h 注水時はごく概略的に言えば、165m 付近から 15t/h 程度が流出し、残りの 15t/h 程度は 165m から 205m の間 13-3/8" ケーシングの中を流れ、ほぼそのままの流量で 9-5/8" ケーシング内を流下したと思われる。

(v) 第 2 回目噴気誘導作業(2004 年 11 月)

(1) 噴気誘導作業前の状況

9 月の噴気誘導作業の後、高圧大容量コンプレッサーを手配した。圧縮空気を送り込むためのコンプレッサーは、吐出圧力 3.0MPa(30.6kg/cm²)、吐出量 5m³/min のものを 6 台並列にして総吐出量 30m³/min として使用した。

(2) 噴気誘導作業経過

① 11月17日から18日

掘管の挿入深度を、223.5m から 293.5m まで段階的に深くしながらエアリフトを実施した。一回の送気時間は 11 分から 60 分で、合計 9 回のエアリフト作

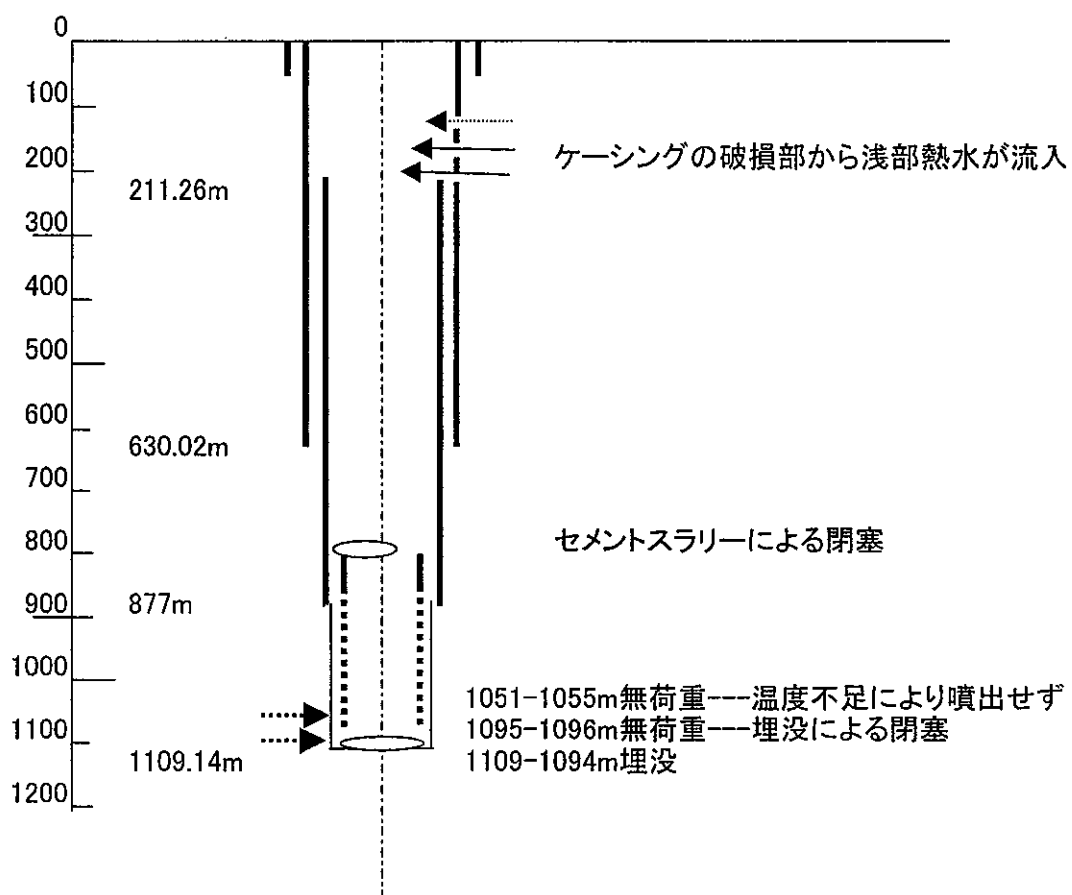


図 2 - 4 - 2 2 検層結果の解釈 (噴気誘導時の総合的な状況)

業を行った。毎回、送気後 6～10 分で坑内の水がかなりの勢いで噴出するものの、その後は自噴せず、継続的な噴気には至らなかった。

② 11月22日から23日

17日、18日の噴気誘導作業によって自噴しなかったことから、掘管の挿入深度をコンプレッサーの能力一杯の 393.5m に固定し、送気時間を長くしてエアリフトを試みた。

結果的には、圧縮空気、蒸気、熱水の混合流体の噴出状況、送気圧力、熱水の汲み上げ量などは17日～18日の噴気誘導とほとんど同じであり、何らの変化も見られなかった。

(3) 噴気誘導作業結果

① 汲み上げ熱水の化学分析結果

11月23日、24日には噴出する熱水のサンプルを採取し、ラサの地熱地質大隊で簡単な化学分析を行った。既存データと比較すると、噴出した熱水の濃度は浅部貯留層の熱水の濃度とほぼ同じである。すなわち、噴出しているのは130～200m 前後のケーシングパイプの破損部分から流入する浅部熱水が主体で、深部貯留層から上がってくる熱水はほとんどないかごくわずかであることを示している。

② 作業判断と対応

噴気誘導の結果は自噴に至ることができなかった。エアリフトの状況は最初から最後までほとんど変化が見られず、噴気に至る兆候は見られなかった。噴出する熱水は浅部熱水がほとんどで、深部熱水が上昇している兆候は見られなかった。掘管の挿入深度はコンプレッサーの能力からほとんど限界であり、これ以上同一の条件でエアリフトを継続しても継続噴気に至る可能性は無いものと判断し、噴気誘導作業を終了した。

(4) 噴気に至らなかった原因考察

CJZK3001 井が噴気に至らなかった原因を考察すると、以下のように多くの原因が考えられる。

① 浅部熱水の坑内への流入

9月に実施したPTS検層の結果から、CJZK3001井は深度135m付近、165m付近、205m付近で13-3/8”ケーシングパイプが破損しており、ここから浅部熱水が坑内に流入する可能性があることが判明している。また、今回の噴気誘導で噴出した熱水の化学分析結果は坑内に浅部熱水が流入していることを示している。この深度の浅部熱水の温度は110℃～140℃と推定されるので、この低温の浅部熱水が深部熱水の噴出を阻害した可能性がある。

しかし、11月の噴気誘導では掘管を約400mまで挿入して送気しており、坑内では約400m以浅には水柱はない状況であった。すなわち定常水位100mと坑内水位400mとの差である300m分の水柱圧(約30kg/cm²)で深部熱水の流入を促していることとなり、深部貯留層及び坑内の透水性が十分あれば、浅部熱水の流入があったとしても、十分深部熱水の噴出が可能な状況であった。すなわち、浅部熱水の坑内への流入が噴気しない主な原因とは考えられない。

② 深部貯留層の亀裂の透水性の不足

CJZK3001 井では深部貯留層の地下亀裂の透水性が不足している可能性が考えられる。しかし、深度 881m で全量逸泥、1,051～1,055m と 1,095～1,096m で無荷重掘削(大規模な亀裂に遭遇)がある。また 9 月の注水時の PTS 検層の結果から、注水した水は坑内を流下して 800m の以深に達していることが確認されているので、上記の深部の逸泥層の少なくともいずれかの地下亀裂は透水性がある。従って、深部貯留層の亀裂の透水性が不足しているとは考えにくい。

③ 坑内の閉塞

CJZK3001 井は、9 月の PTS 検層の結果から、210m 付近でケーシングセメンチングのセメントが未固結のまま坑内に押し出してきて、坑内に落下する現象が推定されている。この現象が大規模に発生すれば、深部において坑内が閉塞されている可能性がある。また、CJZK3001 井では坑底で埋没現象が確認されているので、埋没によって地下亀裂が閉塞されている可能性もある。

④ 深部亀裂の深度の貯留層温度の不足

CJZK3001 の深部地下亀裂がある 881m、1,051m～1,055m、1,095m～1,096m の貯留層温度はそれぞれ約 150℃、210℃、220℃である。深部の 1,200m 以深の温度は約 250℃～270℃あるが、この坑井の地下亀裂のある深度ではまだ深部の最高温度に達していない。この原因は、CJZK3001 井では 1,100m 付近まで掘削した時点で坑内の埋没が多くなったため抑留事故発生の危険性が極めて大きくなり、これ以深への掘削が不可能となり、1,109.14m で掘削を終了したことが原因である。

⑤ 深部貯留層の存在の可能性

以上のように多くの原因によって CJZK3001 井は噴気に至らなかったが、これによって羊八井地域の CJZK3001 の地域において深部貯留層がないと結論することは出来ないと考えられる。この地域の深部には確実に地下亀裂があり、また温度も十分高温である。従って、深部貯留層は間違いなく存在するものと考えられる。今回噴気に至らなかったのは、これまで 3 年間の掘削作業によってケーシングパイプが削られて破損するなど坑井の状況が非常に悪くなったため、及び坑内状況の悪化により十分な深度まで掘削できなかったことが大きな原因と考えられる。

2-4-4 坑井調査から判明した地熱貯留構造

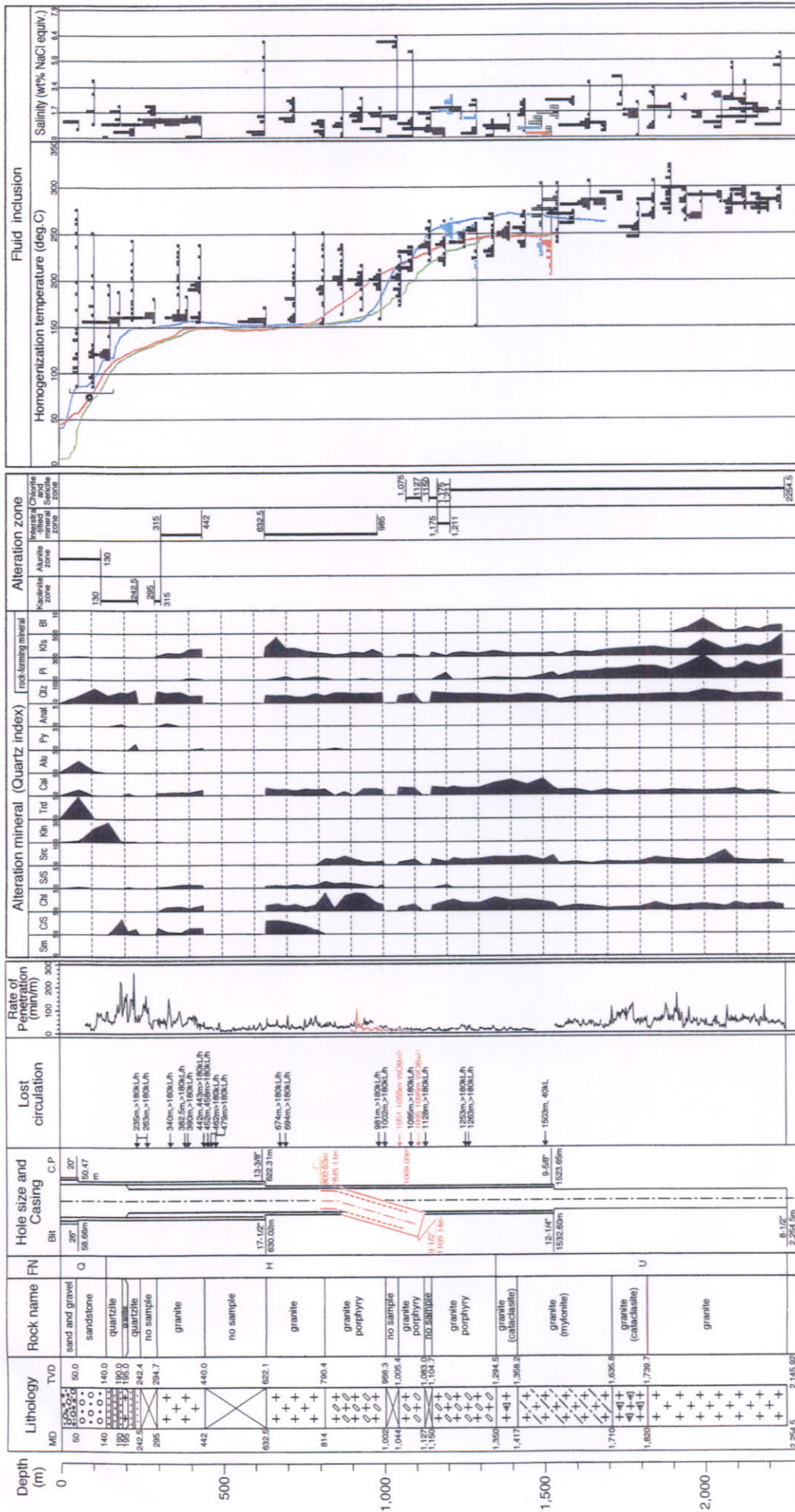
CJZK3001 及び ZK4002 の坑井調査結果から、本地域の深部地熱地質構造を検討した。CJZK3001 の総合柱状図を図 2-4-26 に、CJZK3001 調査総括断面図を図 2-4-27 に示す。

CJZK3001 では、掘削時の逸泥や無荷重箇所(図 2-4-26)から、地熱貯留層を以下のように区分できる。

①浅部貯留層：深度 235～479m、674～694m

②深部貯留層：深度 981～1,128m、1,253～1,263m、1,503m

以上の貯留層深度は、斜長石がほぼ完全に変質した強変質箇所とおおよそ一致し、



■ : Quartz phenocryst
 □ : Quartz (rock crystal)
 ● : Fluorite
 ⊙ : consistency with monophasic liquid inclusion
 2003.12.3 : Temperature Up Survey
 2004.7.21 : Temperature Down Survey
 Standing Time : 73hr24min (@ 1.545m)
 (inside F.D.P.)
 2004.7.21 : Temperature
 Standing Time : 1,700.35m
 Standing Time : 366hr

Sm: Smectite, CS: Interstratified mineral of Chlorite and Smectite,
 Chi: Chlorite, SS: Interstratified mineral of Sericite and Smectite,
 Src: Sericite (Muscovite involved), Kln: Kaolinite, Trd: Tridymite,
 Cal: Calcite, Alu: Alunite, Py: Pyrite, Anal: Anhydrite, Qtz: Quartz,
 Pl: Plagioclase, Kfs: K-feldspar, Bt: Biotite

WOB-weight on bit
 F-Flow part (drill pipe)

FN: Formation name
 C: Core
 H: Himalayan Granite
 U: Unknown age

図 2-4-26 CJZK3001 総合柱状図

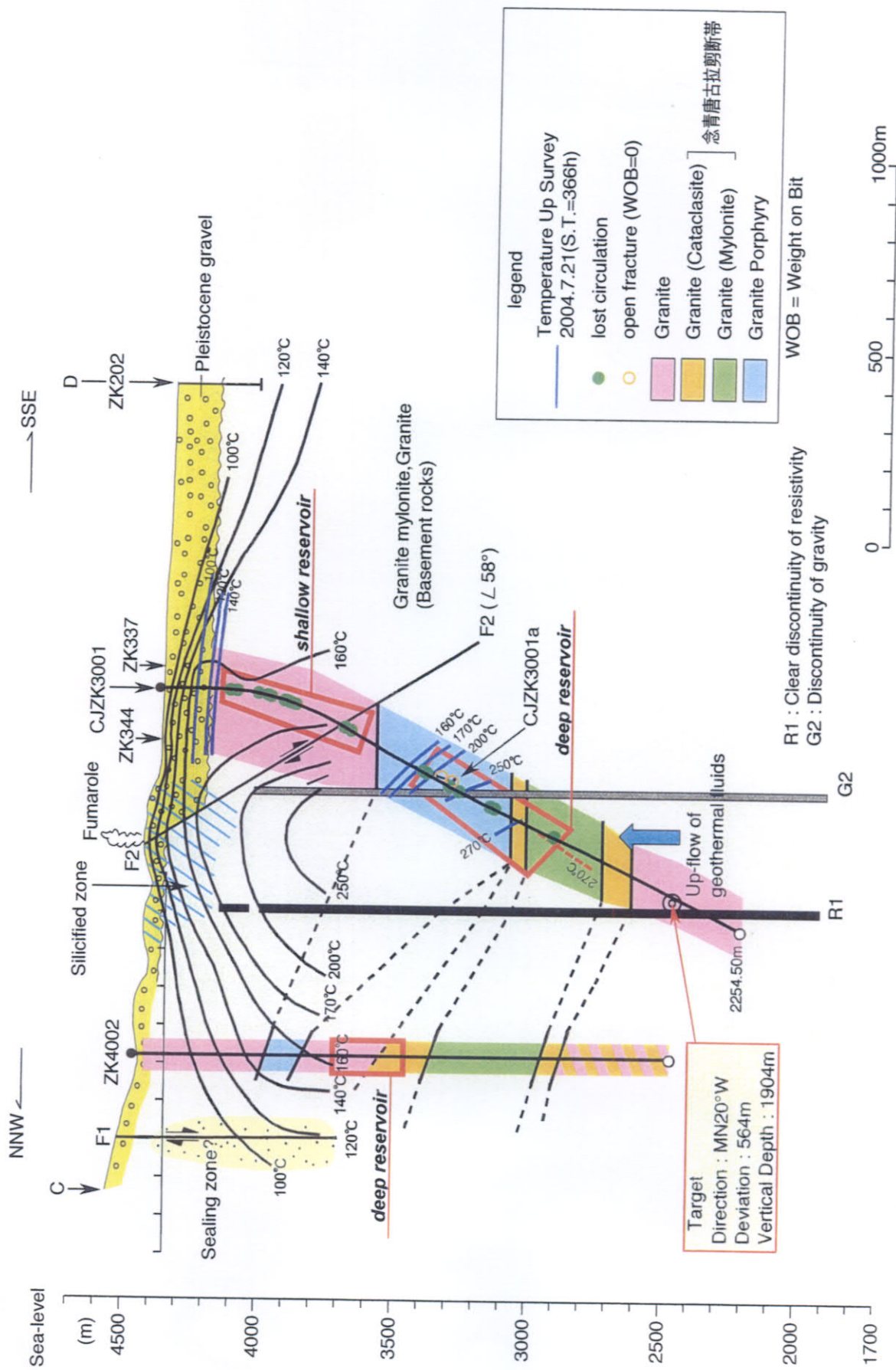


图 2-4-27 GJK3001 调查总括断面图

地熱流体が活発に流動している透水性の良い領域と考える。これらの区間は掘進率も大きく、岩石の高透水性を反映していると考え。特に、CJZK3001 のサイドトラック時に遭遇した深度 1,051～1,055m 及び 1,095～1,096m の空隙(無荷重掘進区間)は、地下に巨大断裂が分布していることを示す。

深度 1,503m 以深から 2,254.5m (坑底) までは全体的に熱水変質が弱いか未変質で、逸泥がないことから、透水性の悪い領域である。ただし、深度 2,254.5m 以深の透水性は不明である。

2-5 既存深部井(ZK4001 井)の噴気試験及びスケール付着試験

2-5-1 噴気試験

羊八井地域ではこれまでに深部井として ZK4001, ZK4002 が掘削されていたが、ZK4001 でリッププレッシャー法を用いた簡単な噴気試験が約 2 週間行われたのみで、蒸気と熱水を分離して計測する長期噴気試験は行われておらず、十分な坑井の評価ができていなかった。このため JICA 調査では、当初計画として CJZK3001 と ZK4001 において長期噴気試験を行い、坑井特性を調査するとともに、貯留層評価のための諸データを取得することとなっていた。しかし、CJZK3001 は噴気誘導を行ったが連続噴気に至らなかったため、長期噴気試験は ZK4001 のみで実施した。

(i) 2004 年度噴気試験

ZK4001 の噴気試験は、2004 年 10 月 21 日から開始され、2005 年 2 月 26 日に終了した。この間(11 月 10 日以降)スケール付着による減圧弁の閉塞と地下から岩屑(岩片、岩粉)の噴出が発生し噴気が断続したが、延 3 ヶ月間にわたって試験を実施した。しかし、2004 年度の噴気試験は、不十分な内容のまま終了した。同時に実施した坑井特性試験(第 1 回特性試験)も、噴気状態に十分な安定性が得られなかったことから、試験結果の精度は低いものとなった。

(ii) 2005 年度噴気試験

2005 年度の長期噴気試験は 2005 年 7 月 12 日から 10 月 9 日までの 90 日間実施された。

(1) 長期噴気試験

長期噴気試験結果の概要は下表のとおりであった。

項目	単位	噴気開始後の経過日数(月/日)				減衰率% (参考)
		8(7/19)	30(8/10)	60(9/9)	88(10/7)	
坑口圧力	MPa G	1.80	1.72	1.50	1.43	-20.6
流量測定圧力	MPa G	0.52	0.52	0.64	0.64	
蒸気流量	t/h	53.6	51.5	50.3	48.6	-9.3
熱水流量	t/h	257.3	253.8	268.9	232.3	-9.7
総流量	t/h	310.9	305.3	319.2	280.9	-9.6
二相流 Enthalpy	kJ/kg	1027	1017	1034	1053	+2.5
【坑口圧力換算】						
蒸気流量	t/h	22.2	21.6	29.8	30.5	+37.4
熱水流量	t/h	289.0	284.0	289.0	250.0	-13.5

(2) 特性試験

2005年度の噴気試験において特性試験は、噴気試験の開始時、中間時、終了時において合計3回実施した(第2～第4回特性試験)。試験結果の詳細は、図2-5-4に示す通りである。上記の結果によれば、長期噴気試験の前後においては、熱水流量については減少がやや顕著であったが、蒸気流量及び二相流熱量については大きな変化(減衰)は認められなかった。

(iii) 噴気試験の化学調査結果

ZK4001の長期噴気試験に伴う地熱流体の化学的調査結果については、2-6-2地化学追跡調査の項に記載する。

(iv) 噴出物試料調査

噴気試験時の噴出岩石試料を用いて、岩石薄片顕微鏡観察、X線回折分析及び流体包有物測定を実施した。

噴出試料はすべて断層破碎岩起源であるが、これらはマイロナイトやカタクラサイトが破碎されたものである。したがって、同一箇所では断層運動(延性変形～脆性破壊)が繰り返し起こっていることを示唆する。噴出試料の産状から、ZK4001深部貯留層は断層沿いに発達し、この断層はマイロナイトの形成期(約8Ma)から現在まで継続して活動していると考えられる。今回の噴出試料は深度950～1,336mの貯留層から噴出したものとする。

2-5-2 スケール付着試験

ZK4001では2004年10月21日に噴気試験を開始したが、パイプラインの減圧弁下流にスケールの付着がみられた。スケール付着は地熱発電の運転に多大な支障をきたすので、2005年度のZK4001の噴気試験に際してスケール付着試験を行い、ZK4001の長期噴気によって生成するスケールの付着防止を検討することとした。

その最終結果のまとめは、下記のとおりである。

テストピース No.	1	2	3
流体の種類	蒸気+熱水	熱水	熱水
流量	330～260 t/h	260～210 t/h	
流送日数	90 - 4 = 86日		
取付け位置	坑口2次弁下流	熱水流量調整弁下流	ZK001敷地～フラッシュタンクまでの熱水パイプライン中間部
スケール付着	微量	無し	無し

- ① 今回の試験においては、テストピース内部にスケール発生はほとんど見られなかった。ただし、熱水タンクのドレン抜バルブなどの熱水滞留部においては、シリカ(SiO₂)と思われる白色の硬度の高いスケールの付着が見られた。このことからZK4001の熱水は、今回のテスト条件より低温の領域においては、相当量のシリ

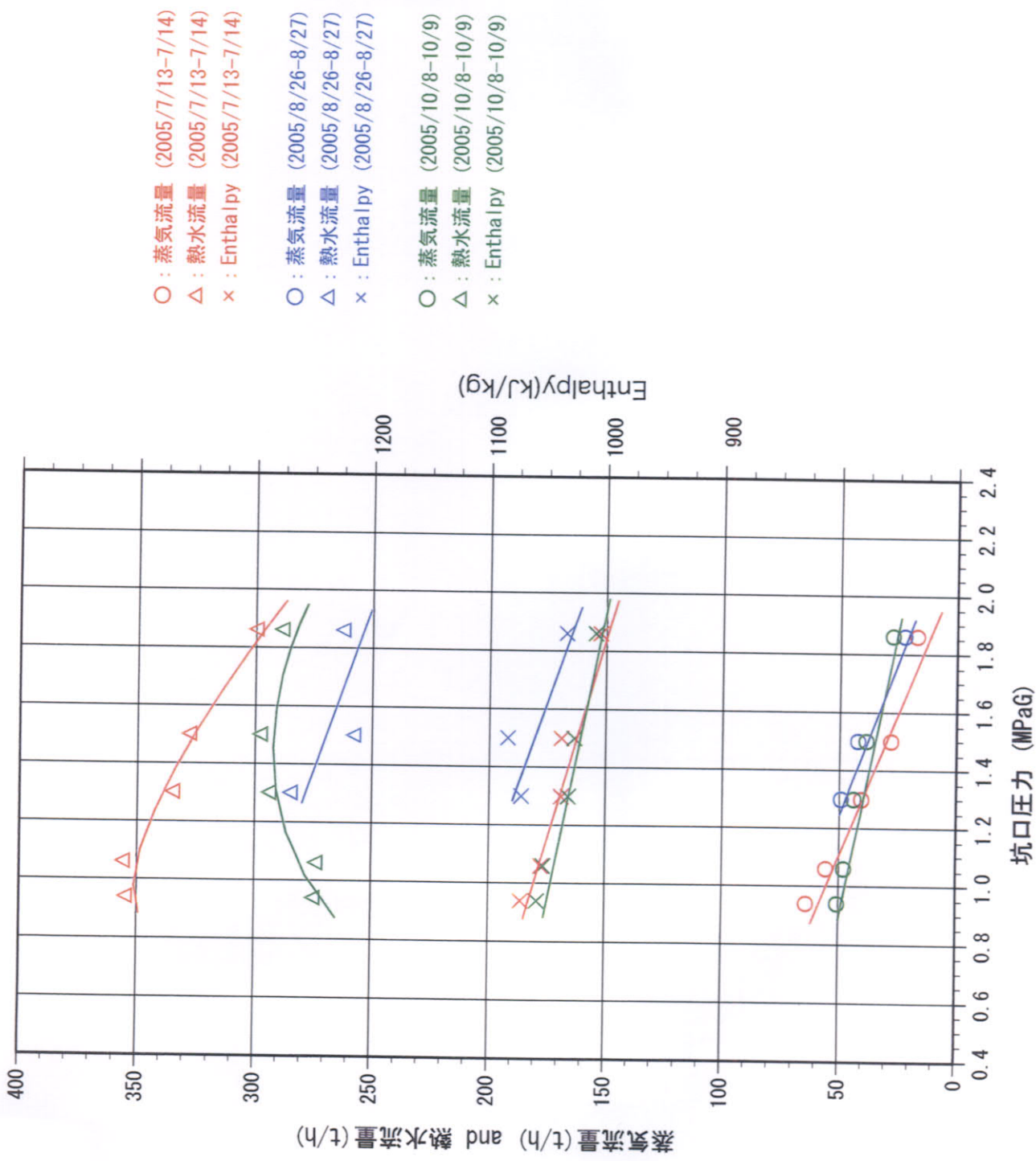


图 2-5-4 ZK4001 流量特性

カケルを析出させる可能性が高いものと思われる。

② スケール防止対策

今回のスケール付着テストにおいては、テストピースに顕著なスケールの発生は認められなかった。熱水中に多量のスケール成分を含有しているにもかかわらず、スケールの生成が見られなかった理由としては、今回のテストにおいてテストピース内を流れた熱水の温度がスケール成分の析出点温度（飽和温度）を上回っていたことが推定される。このことは、熱水の滞留部（熱水タンクのドレン抜きバルブ用ノズルなど）において、温度の低下した熱水中にシリカスケールの生成が見られたことから裏づけられる。したがって、今後 ZK4001 におけるスケールの発生を防止するためには、噴出熱水の温度低下を防ぐことが最も重要な要件であるものと判断される。今後の ZK4001 の発電利用にあたっては、気水分離器の運転圧力や熱水の還元温度などについて慎重に検討していくことが必要である。

坑井内ではアラレ石スケールが生成していると考えられる。これまでの噴気試験では生産障害は起きていないが、今後長期的に生産していく場合は、アラレ石スケールで坑内が狭窄され生産流量が減衰する可能性がある。アラレ石は炭酸塩鉱物であり、スケール防止対策としては薬液注入または浅部生産井と同様に機械的な除去で解決できる。

2-6 地熱貯留層の追跡調査

2-6-1 地化学的追跡調査

ZK4001 の長期噴気試験に伴い、深部貯留層と浅部貯留層の関係などを調べるために、ZK4001 や既存浅部生産井から生産する地熱流体の化学性状の変化を追跡調査した。

(i) Cl-Ent（塩素-エンタルピー）混合モデル

図 2-6-2 において、ZK4001 に代表される深部熱水と地表水、温泉水は直線上に分布し、それらの中間に既存浅部井の熱水がプロットされる。このことから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ことが確認された。これは中国側で推定していた既存モデルと同じである。実際の混合過程では地表水が直接高温の貯留層に流入するのではなく、浅部熱水と地表水の間接的な組成の流体（温泉水）と混合していると考えの方が自然である。羊八井地域の端成分となる熱水組成を以下に示す。

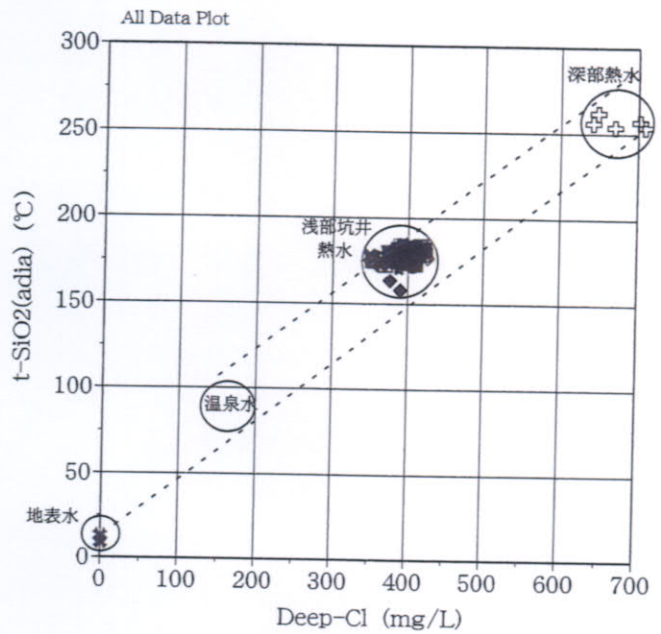
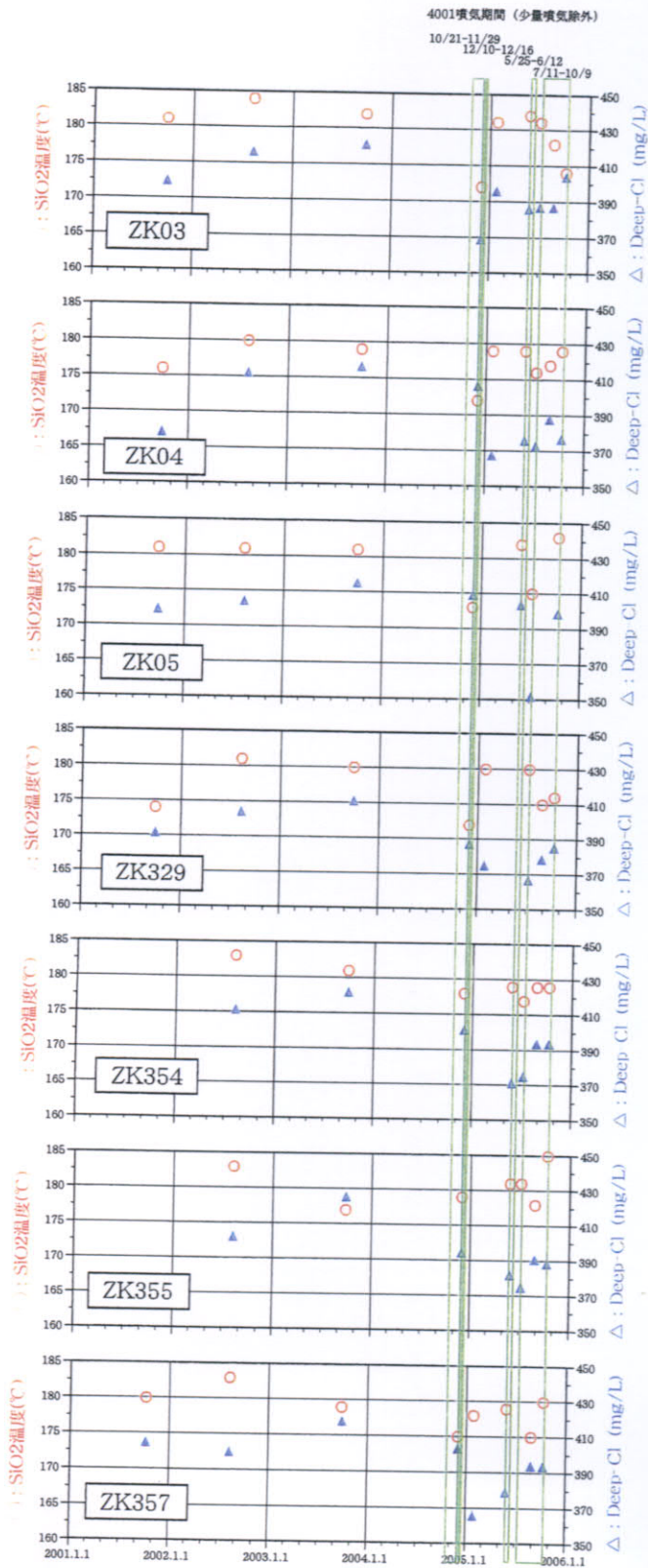
- ・ 4001 深部熱水：SiO₂ 濃度 260 mg/L，Cl 濃度 650 mg/L（深部換算値）
- ・ 浅部熱水：SiO₂ 濃度 170~180 mg/L，Cl 濃度 350~430 mg/L（深部換算値）
- ・ 地表水：温度 10℃，Cl 濃度 0 mg/L
- ・ 温泉水：温度 80~100℃，Cl 濃度 150~200 mg/L

(ii) 浅部貯留層と深部貯留層の干渉関係

既存浅部井は、ZK4001 の長期噴気試験の前及び噴気中に以下の変化を示した。

- ・ ZK4001 噴気試験前：SiO₂ 濃度，Cl 濃度は比較的安定（生産量安定）。
- ・ ZK4001 噴気試験前半：SiO₂ 濃度，Cl 濃度の低下が認められた。
- ・ ZK4001 噴気試験後半：SiO₂ 濃度，Cl 濃度が回復している。

Cl-Ent 混合モデルに基づき ZK4001 噴気試験前半の浅部熱水の変化を考察すると、浅



混合モデル端成分

- ・4001深部熱水 (SiO₂温度260℃、Cl濃度650mg/L:深部換算値)
- ・浅部熱水 (SiO₂温度170-180℃、Cl濃度350-430mg/L:深部換算値)
- ・地表水 (温度10℃、Cl濃度0mg/L) : 直接貯留層には入らない
- ・温泉水 (温度80-100℃、Cl濃度150-200mg/L) : 実際に貯留層に流入

図の見方

- 二酸化珪素(SiO₂)濃度: 地層温度に比例して濃度が高くなる。
 流体温度の指標 羊八井はSiO₂温度が流体温度に近い。
- Cl濃度: 地表水-低濃度、深部熱水-高濃度、反応性の無い物質。
 深部熱水と地表水の混合指標
 SiO₂濃度の変化より敏感

- SiO₂濃度 低下 → 流体温度低下、深部熱水割合減少
- Cl濃度 低下 → 深部熱水割合減少=地表水割合増加

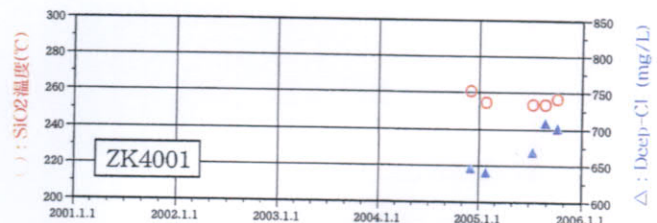


図 2-6-2 Cl-Ent混合モデル図

部井における SiO_2 濃度及び Cl 濃度の低下は深部熱水の混入割合の低下が原因と言える。ZK4001 噴気に伴い深部貯留層の圧力が低下し、浅部貯留層への深部熱水の供給が減少したものと推測される。

ZK4001 噴気試験後半は SiO_2 濃度及び Cl 濃度が回復している浅部井が認められる。この挙動は他の地熱フィールドでも認められる事例であり、以下のように推定する。

深部からの高温流体が減少することにより、浅部井周辺の貯留層圧力も低下する。この圧力低下により、これまでとは別の流動経路から浅部熱水と同様の流体が流入した。ZK4001 噴気試験後半の推定が正しいか否かは、今後継続して地化学調査を実施することにより明らかにできる。

ZK4001 噴気試験前の浅部熱水性状が安定していること及び ZK 4001 噴気試験に伴う二つの挙動から、羊八井における深部貯留層と浅部貯留層の干渉が明らかとなった。深部貯留層から生産を行う場合、浅部貯留層への干渉は避けられないことが地化学調査により実証された。

(iii) ZK4001 の流体性状

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。

(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

2-7-1 地質構造

(i) チベットの広域地質構造と地熱構造

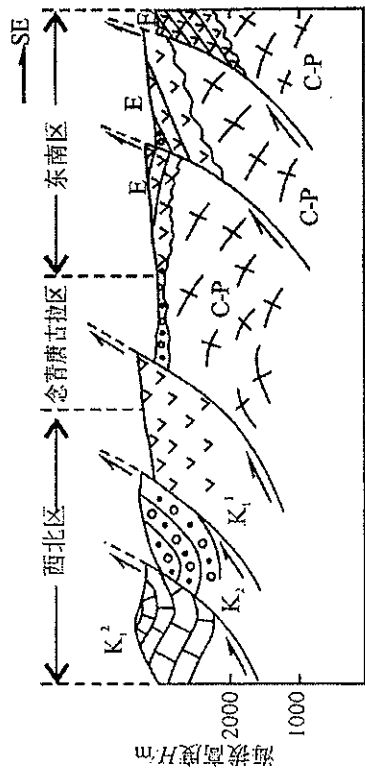
羊八井を含む広域地質構造については、西藏地熱地質大隊や、「ヒマラヤー青藏高原

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。

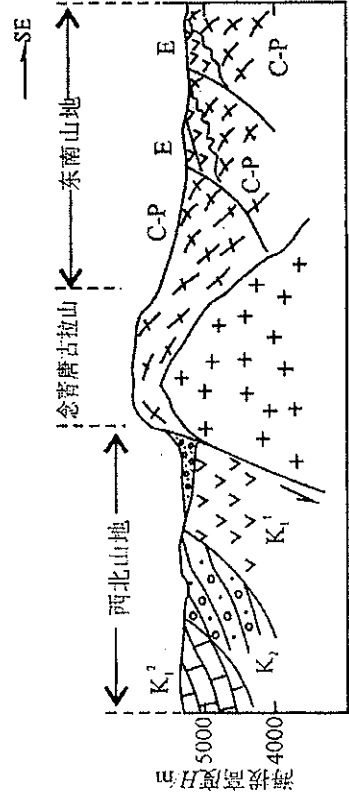
以下に、呉珍漢ら(2003)の第四章第三節「四、当雄—羊八井、盆地—山地構造地形の発展過程」を引用する。

『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熔融が形成され、部分熔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熔融が続き、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韌性剪断帯(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(韌性剪断帯)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早更新世晩期以降(1.5~0 Ma) 羊八井—当雄盆地の伸展性断層活動と盆地の断

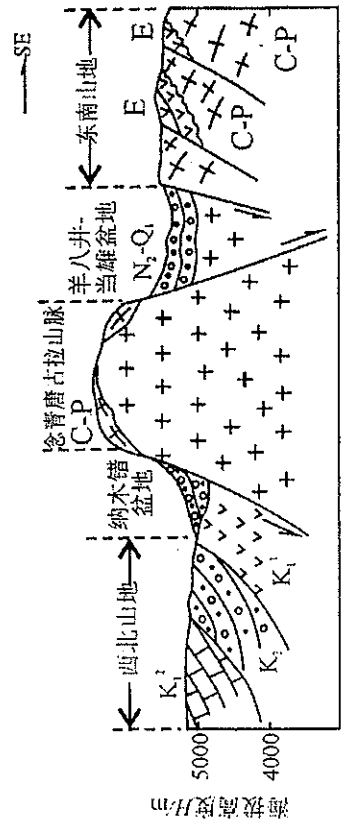


a. 渐新世晚期—中新世早期 (28~20Ma)

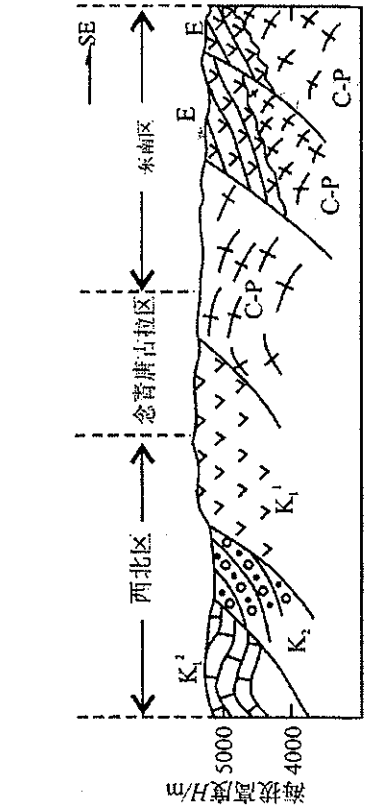


b. 中新世早期 (20~18Ma)

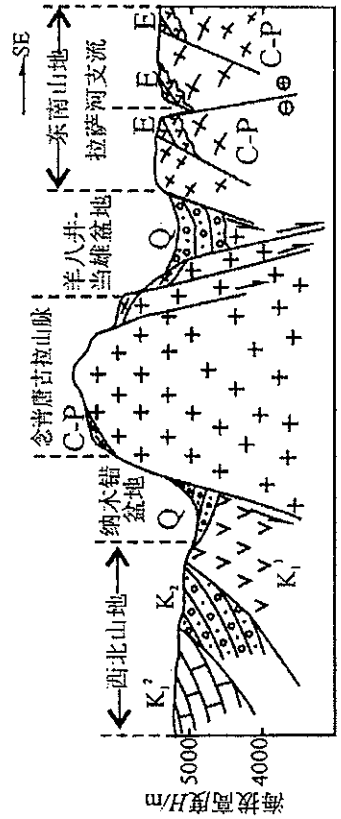
c. 中新世中晚期 (18~8Ma)



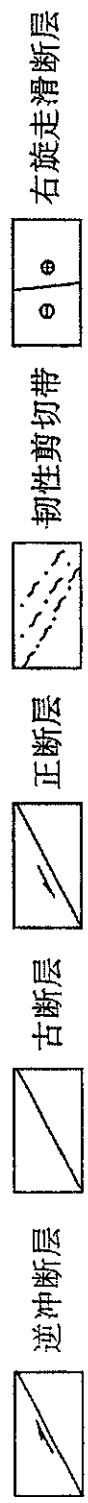
e. 上新世—早更新世 (5~2Ma)



d. 中新世晚期—上新世早期 (8~5Ma)



f. 早更新世晚期以来 (≤1.5Ma)



出典： 吴珍汉· 葉培盛· 胡道功等(2003)

图 2-7-1 于バット当雄羊八井地区構造地貌形成過程模式图

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走向断層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2-7-1f)。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。

第四紀中晩期の断層活動や河流浸食と風化削剥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) 断層構造

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層構造である。

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