

体包有物測定結果を表 2-2-8 に、均質化温度と塩濃度の関係を図 2-2-10 に示す。

type 1 は、液単相包有物で、ヒールされたクラック中に分布して薄板状の不規則形態を示すものである。type 2 は、液相包有物で、ヒールされたクラック中に分布してやや厚みをもつ不規則な形態を示すものである。type 3 は、液相包有物で、ヒールされたクラック中などに群をなしたり単独で分布する負結晶形に近い形態を示すものである。type 4 は、CO₂液相を含む包有物で、単独に存在したり不明瞭な直線状に並んで分布する負結晶形に近い形態を示すものである。

包有物の形状から現在の地熱活動により生成した包有物は type 1 と type 2 であり、type 1 が最新期と考えられる。当地域には、全域に type 1 が生成していることから、最新期の熱水活動は全域に及んでいた事が分かる(図 2-2-11)。断層 F 2 の東西両側には type 1 と type 2 のみを産し古期の包有物が消失している地域がある。これがこの地域の熱水の活動度が高かったことを示す可能性がある。

2-2-2 地化学調査

(i) 調査内容

地化学調査は、地化学モニタリング用試料採取及び分析の指導、試料採取及び分析、中国側所有の地化学データの精査及び流体地化学モデルの作成の 4 項目を行った。

(ii) 調査方法

(1) 地化学モニタリング用試料採取及び分析の指導

① 試料採取

日本で実施されている代表的な試料採取方法を第 2 回現地調査時に、中国側技術者に実際の作業を通して技術指導した。

② 分析

地化学モニタリングで重要な熱水中の Cl と SiO₂ の濃度分析、蒸気中の H₂S と CO₂ 濃度分析について分析指導を実施した。分析方法については、中国側技術者に実際の作業を通して技術指導すると共に、技術移転を確実にするため、分析作業を撮影した電子映像(CD-ROM)を作成し提供した。

(2) 試料採取及び分析

① 試料採取

試料採取は、中国側技術者と共に、坑井熱水及び温泉水(10 地点)、地表水(5 地点)、環境河川水(3 地点)、坑井蒸気(8 地点)で実施した。試料採取位置図を図 2-2-12 に、試料採取方法を図 2-2-13 に示す。環境河川水の採取は、羊八井地熱発電所から河川に放流される As や Hg を含む熱水の環境への影響を確認するため、仕様にはないが中国側の要望で実施した。また、坑井蒸気の採取は中国側の技術移転の希望が強かったため第 2 年次から実施した。

② 分析

現地で採取した試料を日本に持ち帰り分析した。分析方法を表 2-2-9 に示す。

表2-2-8 羊八井地域の流液包有物試験結果一覧

locality	mineral	occurrence	number of measured crystals	samples				T _m (ice) (°C)				remarks	types of observed inclusions
				Th (U-V)		T _m (ice)		minimum		maximum			
				number	liquid only*	minimum	maximum	number	average	number	average		
2001	Quartz	phenocryst	2	13	liquid only*	164	325	-0.9	3.3	9	1.3	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	1, 2
2002	Quartz	phenocryst	1	12	220	325	282	-4.3	-4.3	1	-4.3	Liquid-only inclusions are also observed.	1, 2, 3
2102	Quartz	phenocryst	2	21	203	348	259	-1.7	-1.6	7	-1.7		2
2105	Quartz	phenocryst	1	22	159	313	259	-3.1	-2.6	3	-2.9		2
2106	Quartz	phenocryst	1	15	181	235	210	-1.2	-1.2	2	-1.2		2
2108	Quartz	phenocryst	1	13	167	261	207	-0.3	0.0	11	-0.1		2
2109	Quartz	phenocryst	1	21	177	229	216	-2.0	-0.4	4	-0.4	Liquid-only inclusions are also observed.	1, 2
2203	Quartz	phenocryst	2	23	124	350<	323	-3.9	-0.1	6	-1.4	Liquid-only inclusions and CO ₂ liquid bearing inclusions are also observed.	1, 2, 3, 4
2205	Quartz	phenocryst	1	21	liquid only*	323	-	-5.5	-0.1	7	-3.7	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	2
2207	Quartz	phenocryst	1	16	liquid only*	263	-	-3.7	0.0	5	-2.6	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	1, 2, 3
2209	Quartz	phenocryst	1	13	170	191	174	-0.1	-0.1	5	-0.1	Liquid-only inclusions are also observed.	1, 2
2210	Quartz	phenocryst	1	17	liquid only*	264	-	-2.5	0.9	10	-1.7	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	1, 3
2303	Quartz	phenocryst	1	18	liquid only*	220	-	-5.5	0.0	15	-2.5	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	1, 2
2405	Quartz	phenocryst	1	18	liquid only*	298	-	-5.8	0.0	15	-1.8	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	1, 2, 3
2406A	Quartz	phenocryst	1	17	liquid only*	199	-	-5.5	1.3	6	-2.9	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	1, 2
2409	Quartz	phenocryst	1	20	172	228	189	-17.0	-0.1	20	-5.2	Liquid-only inclusions are also observed.	1, 2, 3
2410	Quartz	phenocryst	1	25	157	252	226	-2.5	5.8	21	-1.2	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	2
2411	Quartz	phenocryst	1	18	131	198	167	-6.8	-0.2	19	-2.6	Liquid-only inclusions and CO ₂ liquid bearing inclusions are also observed.	2, 3
2412	Quartz	phenocryst	1	23	216	303	245	-6.7	-5.2	4	-6.0	Liquid-only inclusions are also observed.	1, 2, 4
2503	Quartz	phenocryst	1	10	145	248	199	-1.2	-1.1	3	-1.1	Liquid-only inclusions are also observed.	1, 2
2501	Quartz	phenocryst	1	17	173	238	195	-1.5	-0.5	17	-1.0		2, 3
2507	Quartz	phenocryst	1	20	77	293	192	-1.2	-0.2	20	-0.9		2, 3
2511	Quartz	phenocryst	1	17	194	254	215	-1.3	-0.2	11	-0.6		2, 3
2512	Quartz	phenocryst	1	16	228	343	285	-3.7	-0.3	17	-3.2		1, 3
2513	Quartz	phenocryst	1	21	203	235	224	-2.2	-1.4	25	-1.9	Liquid-only inclusions are also observed.	1, 2, 3
2511	Quartz	phenocryst	1	10	99	242	142	0.2	5.9	6	3.5	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	2
2701	Quartz	phenocryst	1	24	liquid only*	300	-	-0.4	-0.1	3	-0.3	Ice-liquid bearing inclusions are observed. Ice in liquid-only inclusion is metastable.	1, 4
2705	Quartz	phenocryst	1	16	211	294	265	-5.7	-2.1	17	-3.6	Liquid-only inclusions are also observed.	1, 2, 3
2708	Quartz	phenocryst	2	19	84	280	208	-1.9	-0.2	18	-1.0	Liquid-only inclusions are also observed.	1, 2, 3
2711	Quartz	phenocryst	1	10	219	290	245	-1.7	0.1	4	-1.1	Liquid-only inclusions are also observed.	1, 2
2901	Quartz	phenocryst	1	13	liquid only*	200	-	-0.8	0.6	9	-0.5	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	1, 2
3001	Quartz	phenocryst	1	16	155	318	192	-3.8	-0.1	12	-1.0		2, 3
3002	Quartz	phenocryst	1	15	130	232	201	-0.6	6.1	18	0.8	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	2, 3
3007	Quartz	phenocryst	3	22	121	315<	-	-5.4	-1.2	21	-4.5	Liquid-only inclusions and CO ₂ liquid bearing inclusions are also observed.	1, 2, 4
0203	Quartz	phenocryst	1	18	liquid only*	301	-	-3.2	0.1	21	-2.9	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	1, 2, 3
0201	Quartz	phenocryst	1	17	liquid only*	229	-	-1.6	3.6	12	-0.8	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	1, 2
0206	Quartz	phenocryst	1	16	liquid only*	285	-	-4.4	1.8	10	-1.5	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	1, 3
0211	Quartz	phenocryst	2	10	169	362	232	3	-3.0	3	-0.1		2
0311	Quartz	phenocryst	1	11	liquid only*	285	-	-1.6	-0.2	4	-0.6	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	2, 3
0313	Quartz	phenocryst	1	13	liquid only*	330<	-	-1.4	4.4	5	1.3	Ice in liquid-only inclusion is metastable.	2, 3

Th(U-V): disappearance temperature of bubble in liquid-rich inclusion

T_m(ice): final melting temperature of ice

liquid only*: This shows liquid monophase inclusion which has possibility to be formed below the boiling temperature.

-: non determined

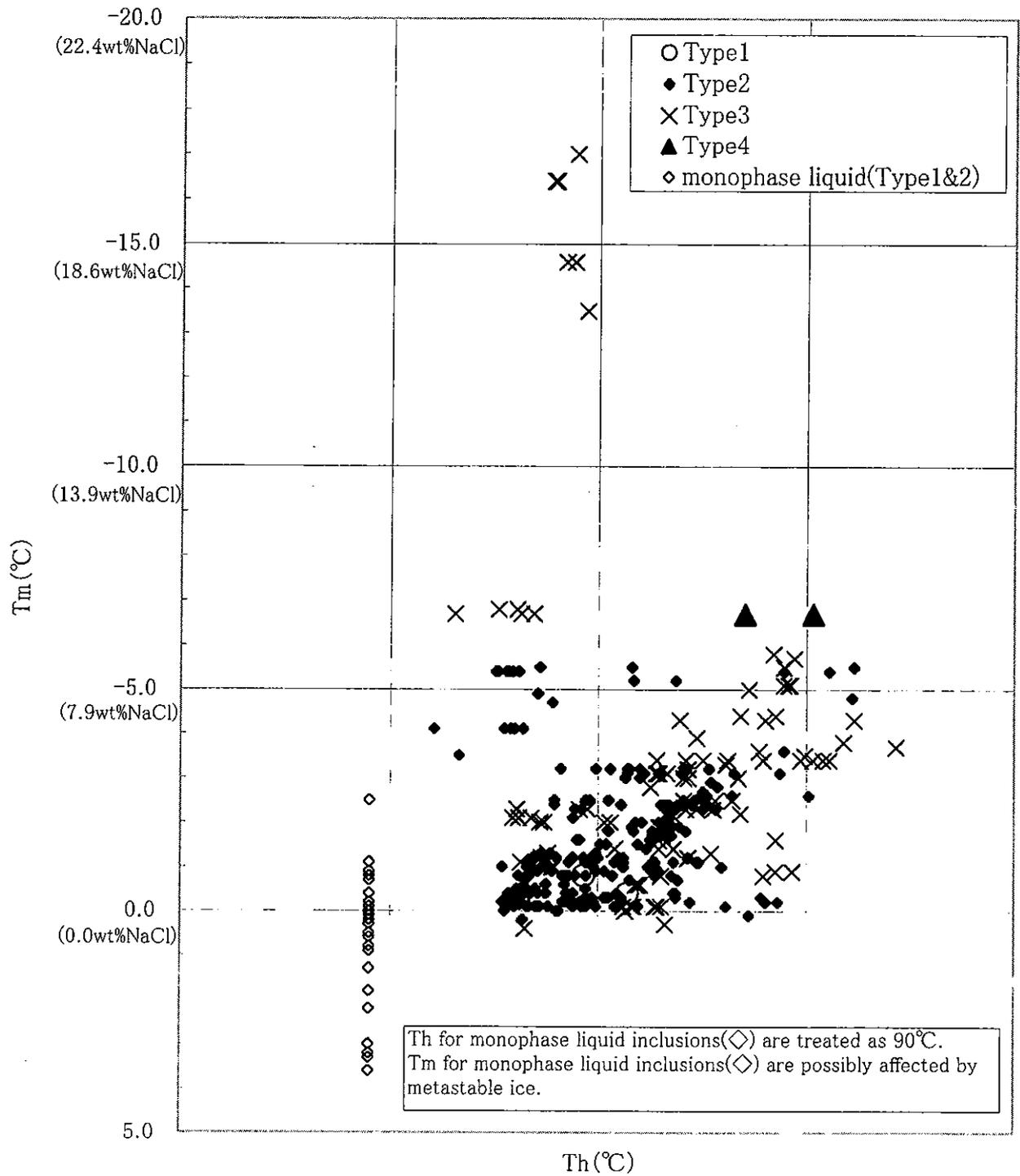


図2-2-10 羊八井地域地表の均質化温度と塩濃度の相関図

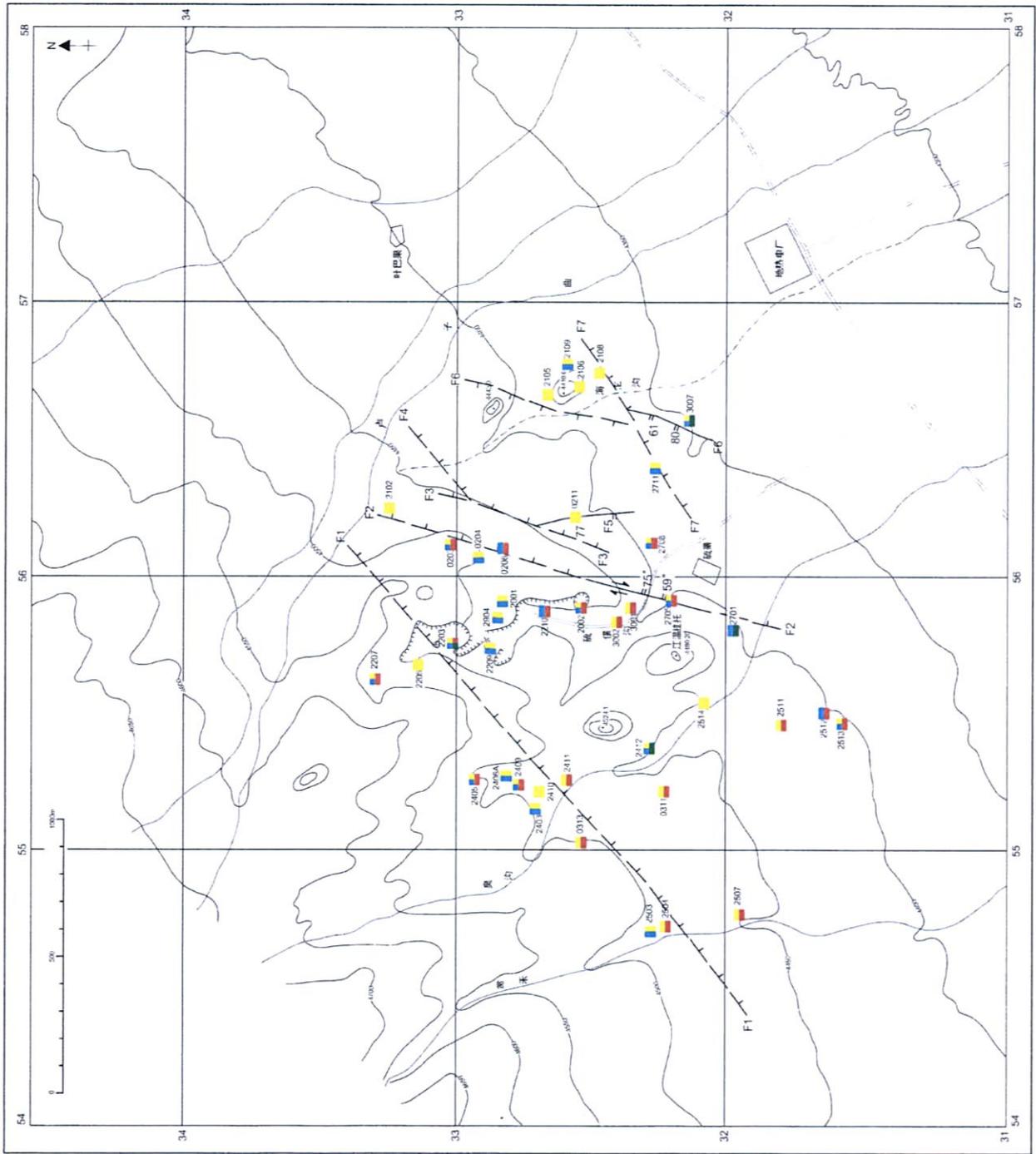
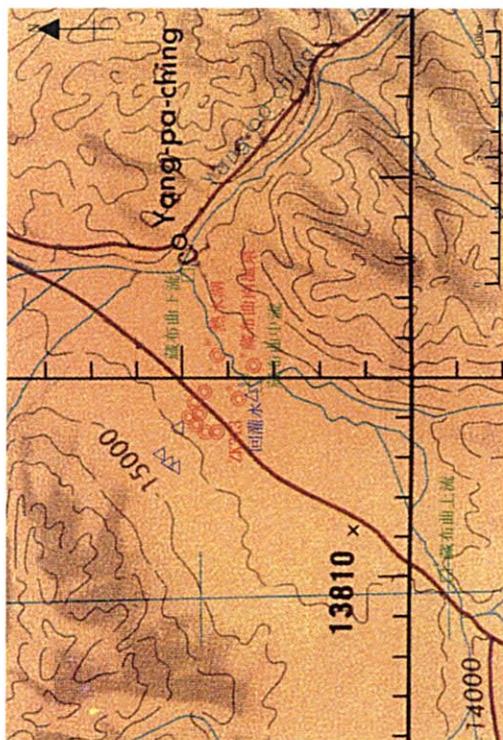
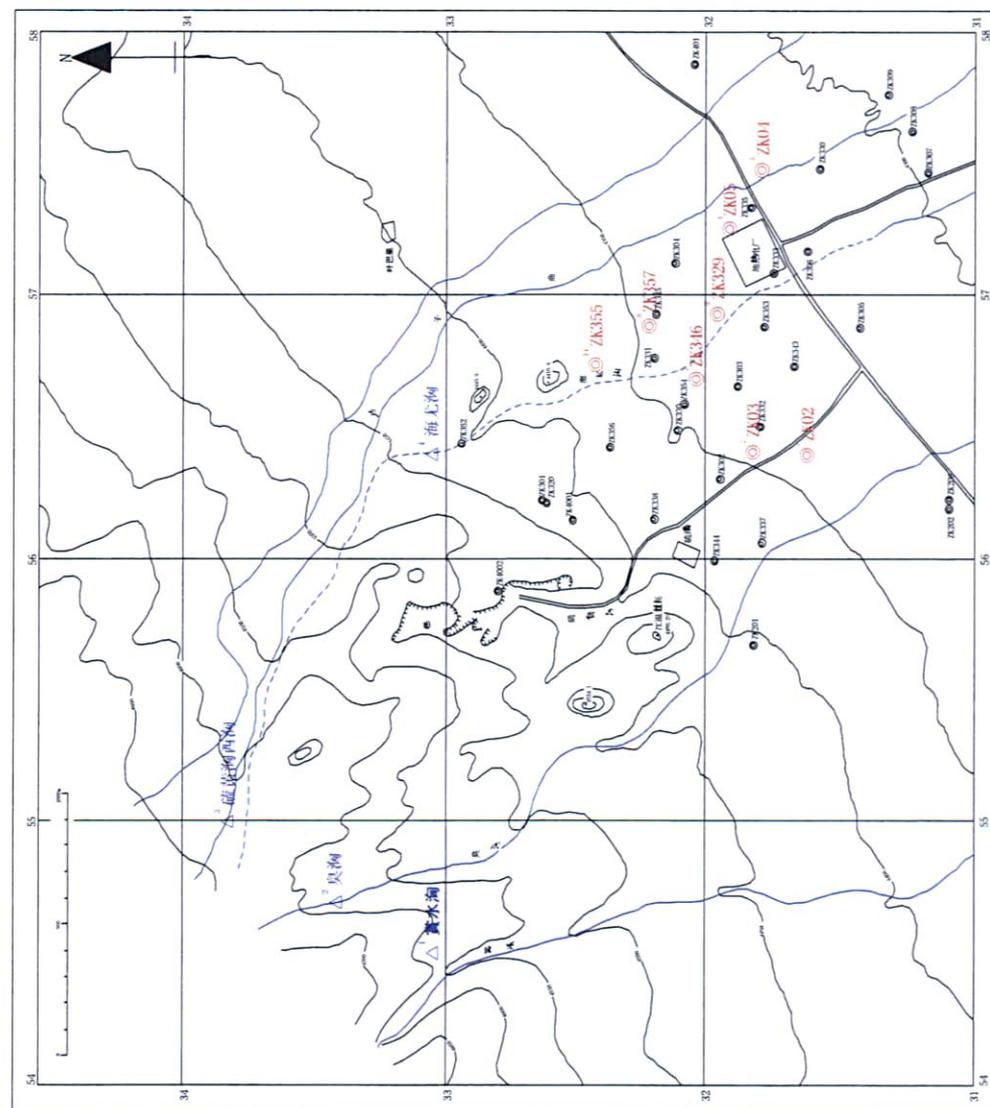


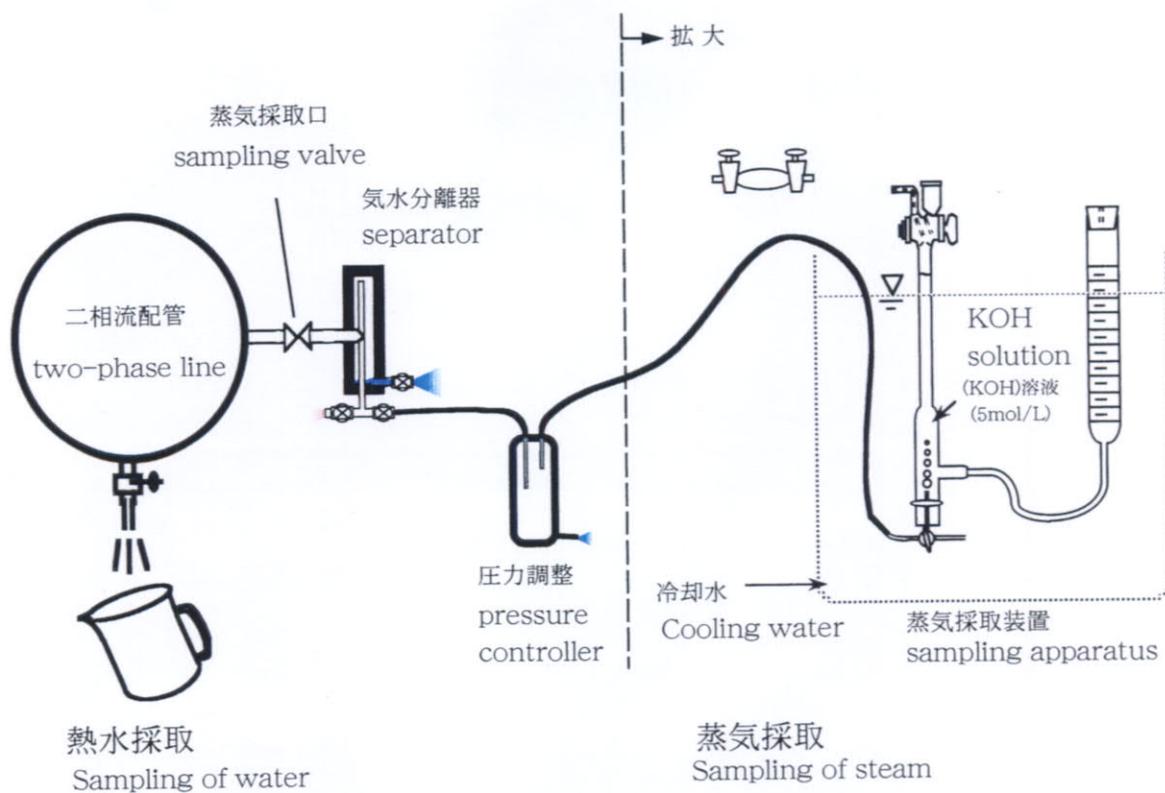
图 2-2-11 羊八井地熱地域の流体包有物のタイプ分布



Legend 凡例

wells and springs 坑井熱水及溫泉水	⊙	ZK02	寶水溝	△	寶水溝	surface waters 地表水	
	⊙	ZK03	臭水溝	△	臭水溝		
	⊙	ZK01	硫黃沟西沟	△	硫黃沟西沟		
	⊙	ZK05	海无沟	△	海无沟		
	⊙	ZK313	回灌水	△	回灌水		
	⊙	ZK329				river waters 環境河川水	
	⊙	ZK346				⊠	藏布曲上流
	⊙	ZK357	藏布曲南温泉			⊠	藏布曲中流
	⊙	ZK355	熱水湖			⊠	藏布曲下流
	⊙	ZK355					

图 2-2-1-2 試料採取位置图



前処理方法

Reagents for field chemical pretreatment

分析項目 element	添加試薬 Reagent	添加量 volume
Ca, Mg, SiO ₂ , As, Fe, Al, Li, Sr, NH ₄	6mol/l HCl	2.5ml/250ml
T-CO ₂	Granular KOH	0.5g/50ml
Hg	7mol/l HNO ₃	0.5ml/50ml
H ₂ S	5wt% (CH ₃ COO) ₂ Cd + 3mol/l CH ₃ COONa	10ml/500ml

図 2 - 2 - 1 3 試料採取方法

表 2 - 2 - 9 分析方法

air and water temperature	thermistor thermometer
pH	pH meter
electric conductivity	conductivity meter
SiO ₂	gravimetric
Cl	ion chromatography
SO ₃	ion chromatography
HCO ₃	calculation from T-CO ₂ and pH
Na	flame atomic emission spectrography (F-AES)
K	flame atomic emission spectrography (F-AES)
Ca	Inductively coupled plasma atomic emission spectrography (ICP-AES)
Mg	Inductively coupled plasma atomic emission spectrography (ICP-AES)
Fe	Inductively coupled plasma atomic emission spectrography (ICP-AES)
Al	Inductively coupled plasma atomic emission spectrography (ICP-AES)
As	Inductively coupled plasma atomic emission spectrography (ICP-AES)
Li	Inductively coupled plasma atomic emission spectrography (ICP-AES)
Sr	Inductively coupled plasma atomic emission spectrography (ICP-AES)
F	ion chromatography
Br	ion chromatography
I	ion chromatography
B	Inductively coupled plasma atomic emission spectrography (ICP-AES)
H ₂ S	iodimetric titration
Hg	Atomic absorption spectroscopy
T-CO ₂	Total organic carbon analyzer
total dissolved solid	gravimetric
H ₂	Gas chromatography
N ₂	Gas chromatography
CH ₄	Gas chromatography
He	Gas chromatography
Ar	Gas chromatography
δ D (H ₂ O)	mass analyzer
δ ¹⁸ O (H ₂ O)	mass analyzer
δ ¹⁸ O (SO ₄)	mass analyzer
δ ³⁴ S (SO ₄)	mass analyzer
δ ¹³ C (CO ₂)	mass analyzer
³ H	mass analyzer

(3) 中国側所有の地化学データの精査

中国側から提供された地熱流体の化学分析値を解析に使用できるか、イオンバランス、及び本調査データと既存データの比較により評価した。

(4) 流体地化学モデルの作成

第2次現地調査で取得したデータを元に、流体地化学モデルを作成した。

(5) 地化学平衡シミュレーション

化学平衡計算プログラム SOLVEQ を用いて、坑井熱水の貯留層内での流体組成の計算、方解石スケールの生成可能性の評価を行った。

(iii) 試料採取及び分析の指導

第2回現地調査において以下の指導を実施した。

(1) 試料採取

- ・蒸気採取及び採取試料の前処理
- ・熱水採取及び採取試料の前処理
- ・地表水採取及び採取試料の前処理

(2) 分析

- ・SiO₂：重量法
- ・Cl：硝酸銀滴定法
- ・H₂S：ヨウ素滴定法
- ・T-CO₂：炭酸バリウム吸収による逆滴定法

(iv) 分析結果

第2回現地調査において採取した試料の分析結果を表2-2-10～12に示す。また、主要成分をキーダイヤグラム(図2-2-14)に示す。

(v) 中国側所有の地化学データの精査

(1) 地化学モニタリング調査の現状

羊八井地域では、開発初期の1980年代及び1995年頃に一時的に継続的な地化学調査が実施されたが、現在は定期的な地化学モニタリング調査は実施されていない。羊八井地熱発電所には、熱水性状や蒸気性状を用いた貯留層の維持管理の技術(貯留層地化学モニタリング)は無く、第1回現地調査でその重要性を中国側に説明したところ、今後積極的に実施したいとの希望があった。

羊八井地域の流体分析は、地熱地質大隊が担当しており、ラサ市にある分析室にて熱水の主要成分分析が実施されている。同位体、微量成分及び蒸気成分の分析は北京で実施されている。ラサの分析室には分析の専門家が4名程勤務しており、人員的な問題は無い。試料採取は発電所の担当であるが、試料採取の専門家はいない。また、定期的な試料採取が実施されていないため、地熱坑井には試料の採取口が無い。

(2) 中国側所有地化学データの精度

既存データのイオンバランスを確認した結果、陰イオンが不足している分析値が全体の5%程度認められた。いずれのデータもCO₂が低い値となっている。また、SiO₂濃度は、熱水分析結果の半数程度に実際より低濃度と考えられる結果が認められた。データ精度の確認の方法としては、同一坑井の異なる採取日のデータを比較

表 2-2-10 坑井熱水, 温泉水及び坑井蒸気分析結果

試料名 name			ZK02	ZK03	ZK04	ZK05	ZK313	ZK329	ZK346	ZK355	ZK357	蔵西町南温泉	熱水湖
試料採取年月日 sampling date			01.9.29	01.9.29	01.9.27	01.9.26	01.9.28	01.9.29	01.9.27	01.9.28	01.10.6	01.9.28	01.9.28
water temperature		°C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52.3	15.3
line pressure		kg/cmG	1.6	1.5	1.8	1.7	0.3	1.3	1.3	1.3	-		
sampling pressure		kg/cmG	1.3-1.5	1.1	1.2	1.5	<0.2	1.2	1.1	1.0	-		
flow rate		L/min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-
steam	H ₂ O/Gas ratios	H ₂ O	vol%	99.82	99.83	99.87	99.81	99.95	99.82	99.81	99.63	-	-
		g a s	vol%	0.18	0.17	0.13	0.19	0.05	0.18	0.16	0.37	-	-
	Gas composition s	H ₂ S	vol%	0.8	0.8	1.0	0.9	1.8	0.6	0.8	0.6	-	-
		CO ₂	vol%	98.3	98.3	98.0	98.3	96.6	98.3	98.5	98.6	-	-
		R	vol%	0.9	0.9	1.0	0.8	1.6	1.1	0.7	0.8	-	-
	R Gas composition s	H ₂	vol%	1.3	2.3	2.1	1.8	0.8	1.1	1.8	2.0	-	-
		N ₂	vol%	95.4	93.7	94.6	94.7	95.5	95.2	94.5	93.6	-	-
		CH ₄	vol%	1.2	1.7	1.1	1.3	0.6	1.1	1.6	2.2	-	-
		He	vol%	0.6	0.9	0.6	0.7	0.3	0.5	0.9	1.1	-	-
		Ar	vol%	1.5	1.4	1.6	1.5	2.8	1.8	1.3	1.1	-	-
hot water	pH	---	9.0	9.1	9.0	9.1	8.7	9.1	9.1	-	9.0	7.1	3.6
	E.C.	ms/cm	2130	2180	2030	2150	2300	2120	2210	-	2170	1020	2210
	S i O ₂	mg/L	260	257	235	257	171	228	251	-	252	93	65
	Cl	mg/L	472	486	455	486	450	469	481	-	491	141	119
	SO ₄	mg/L	43	44	41	44	33	44	43	-	44	15	1020
	HCO ₃	mg/L	181	188	175	162	369	180	309	-	181	303	<0.5
	Na	mg/L	388	397	372	396	436	391	407	-	395	193	181
	K	mg/L	46	50	45	49	49	47	52	-	49	11	14
	Ca	mg/L	5.3	1.6	2.5	2.0	1.4	1.7	2.0	-	2.1	18	195
	Mg	mg/L	0.08	0.04	0.04	0.04	0.12	0.04	0.03	-	0.05	1.06	50.6
	Fe	mg/L	0.04	0.04	0.08	0.01	0.02	0.02	0.04	-	0.05	0.22	9.0
	Al	mg/L	0.30	0.21	0.26	0.20	0.14	0.19	0.22	-	0.22	0.54	14.6
	As	mg/L	3.1	3.1	3.0	3.1	2.1	3.0	3.2	-	3.2	0.4	0.1
	Li	mg/L	8.5	8.8	8.2	8.8	10.1	8.5	9.3	-	8.9	2.2	4.4
	Sr	mg/L	0.23	0.18	0.20	0.15	0.08	0.15	0.18	-	0.19	0.24	2.3
	F	mg/L	14.3	13.9	13.8	14.5	13.1	14.5	13.8	-	14.8	4.7	5.6
	Br	mg/L	1.3	1.3	1.2	1.3	1.1	1.2	1.3	-	1.3	0.4	0.3
	I	mg/L	0.11	0.05	0.08	0.08	0.08	0.09	0.07	-	0.07	<0.01	<0.01
	B	mg/L	52	53	51	55	49	51	55	-	55	17	13
	H ₂ S	mg/L	0.6	0.5	1.4	1.4	0.3	0.7	1.3	-	1.1	0.2	<0.5
	Hg	μg/L	0.46	0.33	0.25	0.49	0.33	0.47	0.43	-	0.21	0.15	0.11
	T-CO ₂	mg/L	143	149	136	128	278	143	245	-	142	259	5.73
TDS	mg/L	1570	1610	1460	1630	1760	1540	1640	-	1850	697	2080	
δ D (H ₂ O)	‰SMOW	-140	-144	-145	-144	-145	-145	-144	-	-144	-150	-124	
δ ¹⁸ O (H ₂ O)	‰SMOW	-17.8	-18.1	-18.4	-18.1	-18.4	-18.2	-18.1	-	-18.1	-20.2	-14.1	
δ ¹³ C (SO ₄)	‰SMOW	+8.1	+8.3	+7.4	+8.3	+9.9	+7.8	+8.2	-	+8.1	+8.7	+0.2	
δ ³⁴ S (SO ₄)	‰CDS	-8.8	-8.2	-9.1	-8.8	-8.6	-8.1	-8.9	-	-8.4	-7.3	-10.9	
δ ¹³ C (CO ₂)	‰PDB	-9.2	-9.3	-9.6	-7.7	-8.3	-8.5	-8.5	-	-8.9	-9.1	-33.0	
² H	TV	1.8±0.1	1.7±0.1	1.7±0.1	1.5±0.1	0.57±0.13	1.9±0.1	1.6±0.1	-	1.4±0.1	<0.37	6.0±0.2	

表 2-2-11 地表水分析結果

試料名 name		真木河	久保	成教西河	海北河	別家水
試料採取年月日 sampling date		01.9.26	01.9.26	01.9.26	01.9.25	01.9.25
水温 water temperature	C	12.6	12.7	9.0	8.9	13.3
気温 air temperature	C	9.2	8.6	6.4	10.1	24.3
緯度 latitude	---	N 30° 05.655'	N 30° 05.678'	N 30° 05.932'	N 30° 05.460'	N 30° 03.672'
経度 longitude	---	E090° 27.352'	E090° 27.124'	E090° 27.561'	E090° 29.417'	E090° 29.336'
標高 altitude	m	4576	4585	4630	4428	4315
pH	---	7.6	7.6	7.5	7.7	9.1
E.C.	mS/cm	75	76	79	161	2300
S i O ₂	mg/L	9	9	7	19	231
Cl	mg/L	0.12	0.12	0.17	4.8	515
SO ₄	mg/L	8.7	8.6	10.7	7.7	50
HCO ₃	mg/L	24	30	29	65	118
Na	mg/L	2.0	1.8	1.4	8.1	399
K	mg/L	0.70	0.52	0.74	0.56	49.0
Ca	mg/L	10	11	12	22	3.61
Mg	mg/L	1.0	1.1	1.0	2.3	0.11
Fe	mg/L	0.16	0.38	0.15	0.62	0.03
Al	mg/L	0.15	0.20	0.21	0.05	0.19
As	mg/L	0.005	0.005	0.009	<0.001	3.60
T-CO ₂	mg/L	18	23	23	49	93
δD (H ₂ O)	‰SMOW	-141	-141	-142	-140	-138
δ ¹⁸ O (H ₂ O)	‰SMOW	-19.9	-19.7	-20.0	-19.2	-16.6
² H	TU	13.8±0.3	13.0±0.2	12.2±0.3	13.4±0.2	2.3±0.2

緯度、経度、標高は携帯型GPSによる測定値である。
Latitude, longitude and altitude were measured with a portable GPS meter.

表 2-2-12 環境河川水分析結果

試料名 name		碓氷曲上流	碓氷曲中流	碓氷曲下流
試料採取年月日 sampling date		01.9.25	01.9.25	01.9.29
水温 water temperature	C	12.2	14.8	9.7
気温 air temperature	C	19.8	18.0	14.0
緯度 latitude	---	N 29° 59.107'	N 30° 03.597'	N 30° 03.258'
経度 longitude	---	E090° 21.452'	E090° 29.606'	E090° 32.693'
標高 altitude	m	4380	4337	4293
pH(temp.)	---	7.8	8.3	8.1
E.C.	mS/cm	101	214	177
S i O ₂	mg/L	11	22	19
Cl	mg/L	0.96	24	15
SO ₄	mg/L	5.2	8.7	7.8
HCO ₃	mg/L	42	53	51
Na	mg/L	4.3	24.0	17.0
K	mg/L	0.9	3.1	2.3
Ca	mg/L	14	14	15
Mg	mg/L	1.5	1.6	1.5
Fe	mg/L	1.00	0.89	0.15
Al	mg/L	0.60	0.51	0.19
As	mg/L	0.01	0.18	<0.01
Hg	μg/L	0.16	0.16	0.15
T-CO ₂	mg/L	37	45	43

緯度、経度、標高は携帯型GPSによる測定値である。
Latitude, longitude and altitude were measured with a portable GPS meter.

することが有効であるが、今回の調査では、中国側から提供されたデータに同一坑井のデータが少なく、十分な精査は行えなかった。

(3) 地化学データの誤差原因

第2回現地調査では、地熱地質大隊の分析室において、実際に地熱流体を使用して分析を行った。その結果、地熱流体を分析するのに十分な技術力があることが確認できた。中国側データの誤差は、試料採取直後に前処理をして成分変化を防止する必要のある分析項目に認められることから、試料採取後の前処理が不適切だったための誤差と考えられる。

(vi) 流体地化学モデルの作成

解析に使用した主なデータを表2-2-13に示す。同表中の熱水成分の斜体で示す数値は地化学温度及び化学平衡計算により推定した貯留層内での熱水組成値である。

(1) 浅部熱水の起源

図2-2-15に2成分相関図を示す。 δD とCl濃度、Cl濃度と比エンタルピーの関係から、現在の羊八井地域の浅部熱水は、ZK4001周辺の熱水と地表水の混合により生成していると考えられる。

(2) 浅部貯留層における北部地域から南部地域への熱水流動

① 地化学データの傾向

図2-2-16にガス濃度分布、図2-2-17に 3H 濃度分布を示す。また、図2-2-18に1982年、1995年と1996年及び2001年のCl濃度分布を示す。さらにCl濃度と比エンタルピーの関係、Cl濃度と 3H 濃度の関係、 δD と $\delta^{18}O$ の関係などから次の傾向が確認された。

- ・2001年の坑井蒸気中ガス濃度は、北部地域で高く、南部地域で低い傾向を示す。
- ・2001年のガス濃度分布は温度が高い程高濃度である。
- ・ 3H 濃度は、北部地域で高く、南部地域で低い。
- ・1996年頃の 3H 濃度は、北部地域で濃度差が認められた。2001年の 3H 濃度は、北部地域でほぼ同一である。
- ・1982年のCl濃度は、2001年及び1996年頃のCl濃度より高い坑井が多く、坑井間の濃度にバラツキがある。
- ・1996年頃は、浅部貯留層内の北部地域から南部地域への流体の流動が、熱水の比エンタルピーとCl濃度の相関から確認できた。すなわち北部地域から南部地域に向かってCl濃度と比エンタルピーが共に減少している。
- ・2001年の浅部熱水のCl濃度は、北部地域と南部地域で同じである。南部地域のZK313は比エンタルピーが低く、伝導冷却が認められる。
- ・1996年頃と2001年のCl濃度はほぼ等しいが、 3H 濃度は2001年の方が低い。
- ・2001年のZK313の 3H 濃度は、1995年のZK313の 3H 濃度が放射性壊変（半減期：12.3年）により減少した値と一致する。
- ・2001年の北部地域浅部熱水の 3H 濃度は、1996年の 3H 濃度が放射性壊変により減少した濃度より低濃度である。
- ・2001年のZK313の δD 及び $\delta^{18}O$ は、他の浅部貯留層の熱水と同じ値を示す。

② 羊八井地域の地表徴候及びCl濃度



※sourcebook 出典 (地熱地質大隊、1996)

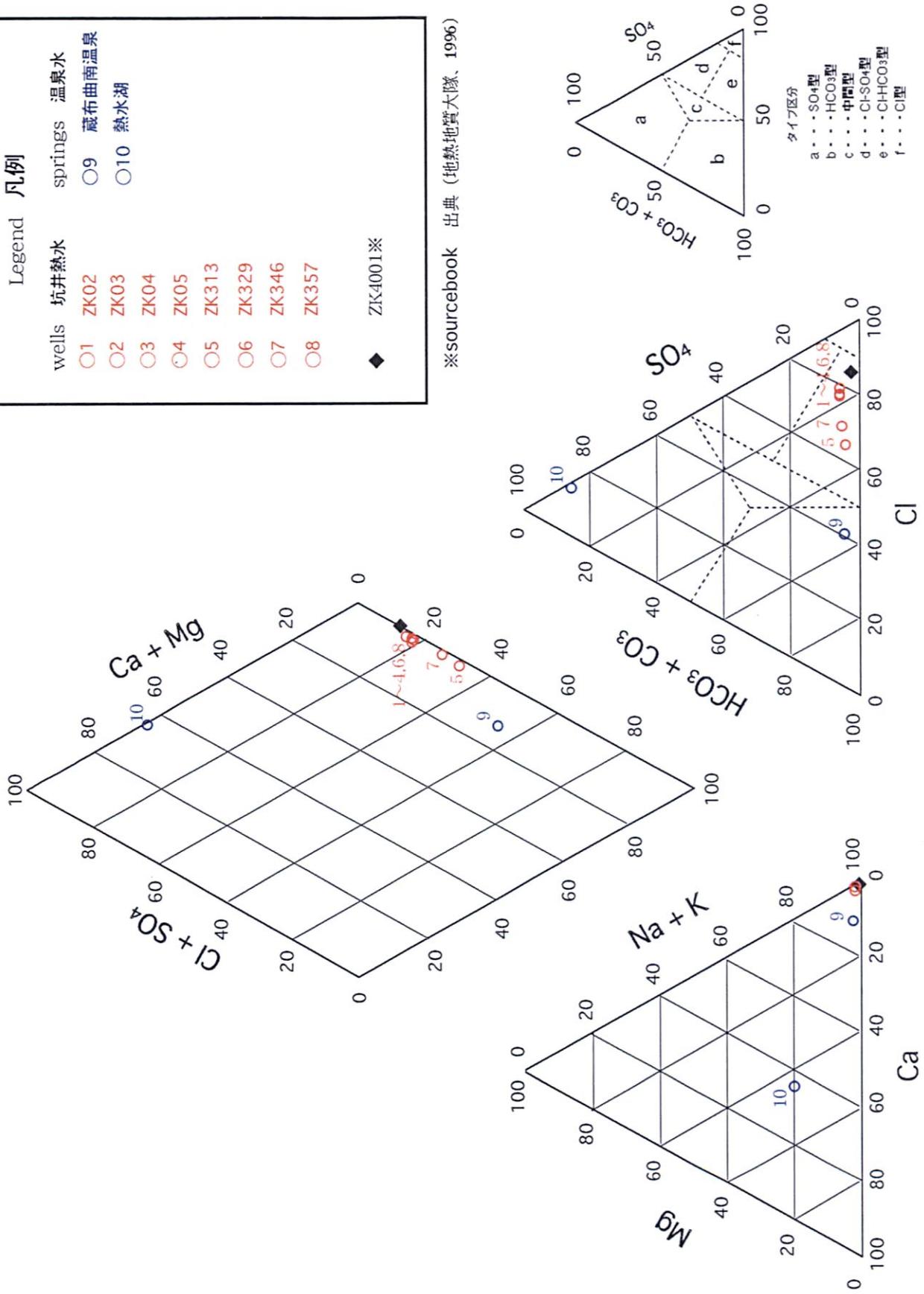


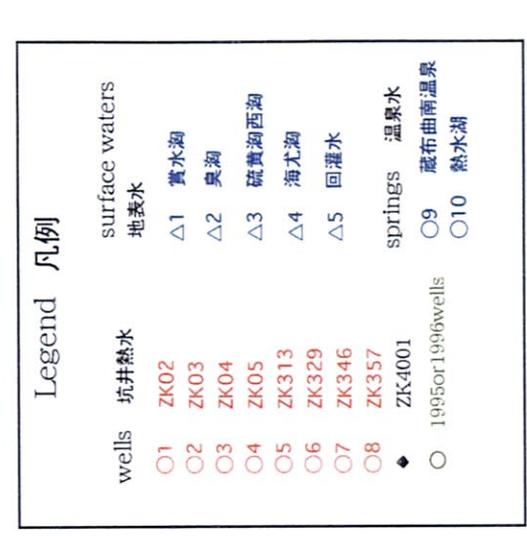
図2-2-14 キーダイアグラム

表 2 - 2 - 1 3 地化学解析に使用可能なデータ用データ

Well			ZK4001	ZK02	ZK03	ZK04	ZK05	ZK313	ZK329	ZK346	ZK355	ZK357	泉源部温度	熱水湖
Sampling dates			96.11.13	01.9.29	01.9.29	01.9.27	01.9.26	01.9.28	01.9.29	01.9.27	01.9.28	01.10.6	01.9.28	01.9.28
water temperature		℃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52.3	15.3
line pressure		kg/cmG	-	1.6	1.5	1.8	1.7	0.3	1.3	1.3	1.3	-	/	/
sampling pressure		kg/cmG	-	1.3-1.5	1.4	1.2	1.5	<0.2	1.2	1.1	1.0	-	/	/
flow rate		l/min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-
steam	H ₂ O/Gas ratios	H ₂ O	vol%	99.1	99.82	99.83	99.87	99.81	99.95	99.82	99.84	99.63	-	-
		gas	vol%	0.6	0.18	0.17	0.13	0.19	0.05	0.18	0.16	0.37	-	-
	Gas compositions	H ₂ S	vol%	0.4	0.8	0.8	1.0	0.9	1.3	0.6	0.8	0.6	-	-
		CO ₂	vol%	91.3	98.3	98.3	98.0	98.3	96.6	98.3	98.5	98.6	-	-
		R	vol%	6.8	0.9	0.9	1.0	0.8	1.6	1.1	0.7	0.8	-	-
	R Gas compositions	H ₂	vol%	0.2	1.3	2.3	2.1	1.8	0.8	1.4	1.8	2.0	-	-
		N ₂	vol%	86.0	95.4	93.7	94.6	94.7	95.5	95.2	94.5	93.6	-	-
		CH ₄	vol%	1.2	1.2	1.7	1.1	1.3	0.6	1.1	1.6	2.2	-	-
		He	vol%	0.9	0.6	0.9	0.6	0.7	0.3	0.5	0.9	1.1	-	-
		Ar	vol%	0.9	1.5	1.4	1.6	1.5	2.8	1.8	1.3	1.1	-	-
hot water	pH	---	6.4	6.3	6.3	6.4	6.5	7.0	6.5	6.5	-	-	7.1	3.6
	SiO ₂	mg/kg	483	213	211	196	211	148	190	207	-	207	93	65
	Cl	mg/kg	629	387	399	379	399	390	392	397	-	403	141	119
	SO ₄	mg/kg	11	35	36	34	36	29	37	35	-	36	15	1020
	HCO ₃	mg/kg	5579	1225	1162	870	1259	538	1135	1190	-	-	303	<0.5
	Na	mg/kg	386	318	326	309	325	378	327	336	-	324	193	181
	K	mg/kg	76	38	41	37	40	42	39	43	-	40	11	14
	Ca	mg/kg	1.6	1.4	1.3	2.1	1.6	1.2	1.4	1.7	-	1.7	18	195
	Mg	mg/kg	-	0.07	0.03	0.03	0.03	0.10	0.03	0.02	-	0.04	1.06	50.6
	Fe	mg/kg	0.02	0.03	0.03	0.07	0.01	0.02	0.02	0.03	-	0.01	0.22	9.0
	Al	mg/kg	1.5	0.25	0.17	0.22	0.16	0.12	0.16	0.18	-	0.18	0.54	14.6
	As	mg/kg	0.0	2.5	2.6	2.5	2.6	2.1	2.6	2.6	-	2.6	0.1	0.1
	Li	mg/kg	11.8	7.0	7.2	6.8	7.2	8.8	7.1	7.7	-	7.3	2.2	4.4
	Sr	mg/kg	0.00	0.19	0.15	0.17	0.12	0.07	0.13	0.15	-	0.16	0.24	2.3
	F	mg/kg	9.1	11.7	11.4	11.5	11.9	11.4	12.2	11.5	-	12.1	4.7	5.6
	Br	mg/kg	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	-	1.0	0.4	0.3
	I	mg/kg	0.00	0.09	0.04	0.07	0.07	0.07	0.08	0.06	-	0.06	<0.01	<0.01
	B	mg/kg	273	43	43	42	45	43	43	46	-	45	17	13
	H ₂ S	mg/kg	0.0	0.5	0.1	1.2	1.1	0.2	0.6	1.1	-	0.9	0.2	<0.5
	Hg	μg/kg	0.00	0.38	0.27	0.21	0.40	0.29	0.39	0.36	-	0.17	0.15	0.14
δD (H ₂ O)	‰SMOW	-148.5	-140	-140	-145	-144	-145	-145	-144	-	-144	-150	-124	
δ ¹⁸ O (H ₂ O)	‰SMOW	-17.7	-17.8	-17.8	-18.4	-18.1	-18.1	-18.2	-18.1	-	-18.1	-20.2	-14.1	
δ ¹⁸ O (SO ₄)	‰SMOW	-	+8.4	+8.5	+7.4	+8.3	+9.9	+7.8	+8.2	-	+8.4	+8.7	+0.2	
δ ³⁴ S (SO ₄)	‰CDS	+18.8	-8.8	-8.8	-9.1	-8.8	-8.6	-8.3	-8.9	-	-8.4	-7.3	-10.9	
δ ¹³ C (CO ₂)	‰PDB	-	-9.2	-9.2	-9.6	-7.7	-8.3	-8.5	-8.5	-	-8.9	-9.1	-33.0	
ΔH	μJ	5.6	1.8±0.1	1.8±0.2	1.7±0.1	1.5±0.1	1.57±0.13	1.9±0.1	1.6±0.1	-	1.4±0.1	<0.37	6.0±0.2	
Geothermometer (T ₃₀₀) *		℃	219	182	181	176	181	158	174	179	-	180	-	-

泉井熱水の標高は深部流標高 (printed in italics mean deep fluids)

* T₃₀₀(Quartz)= $\frac{1522}{5.75 - \log(\text{SiO}_2)}$ - 273 Fournier(1977)
(adiabatic)



sourcebook 出典 (地球地質大隊、1996)
* Zhao Ping et al(2000)

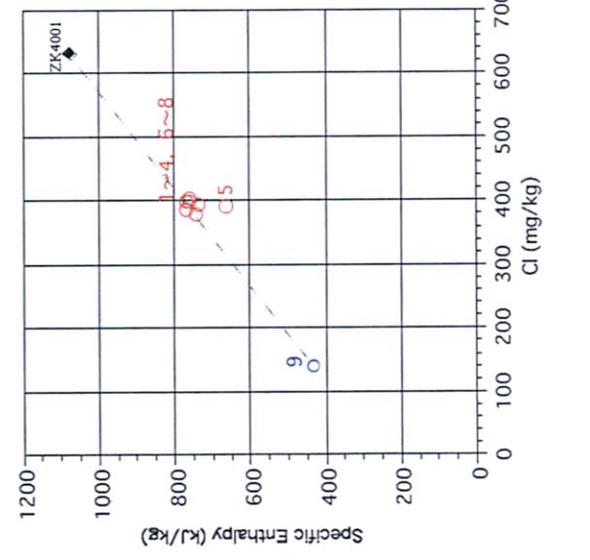
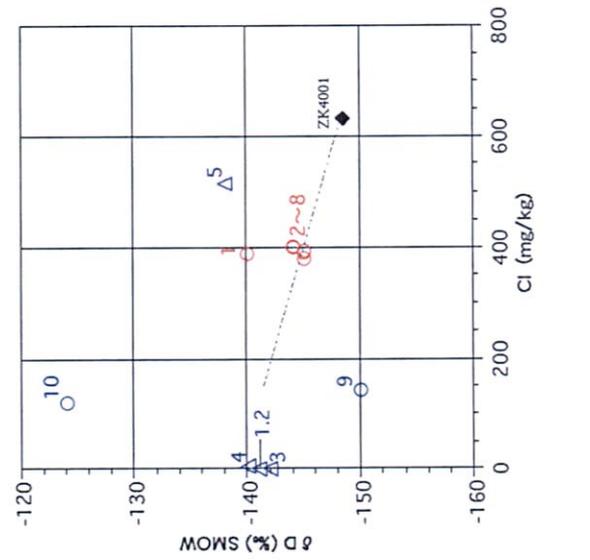
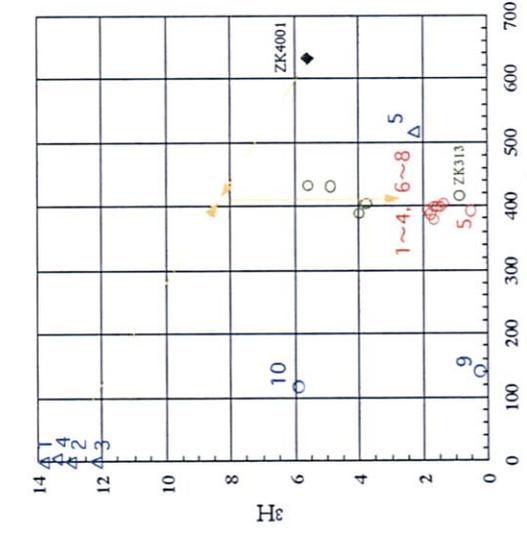
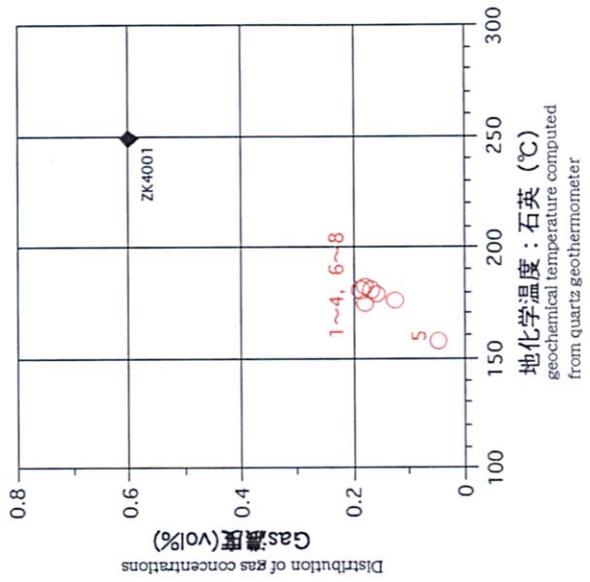
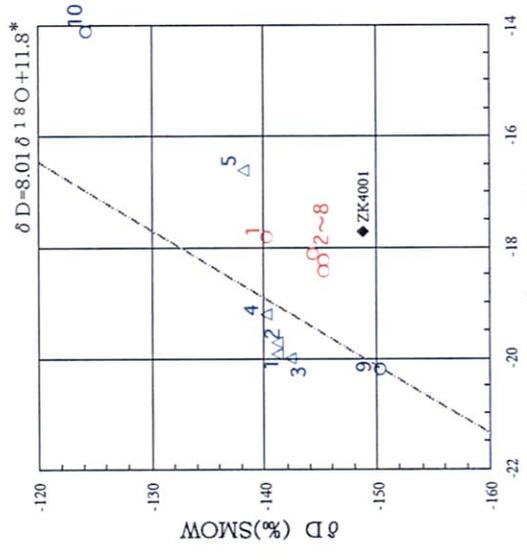


图 2-2-15 2成分相関図

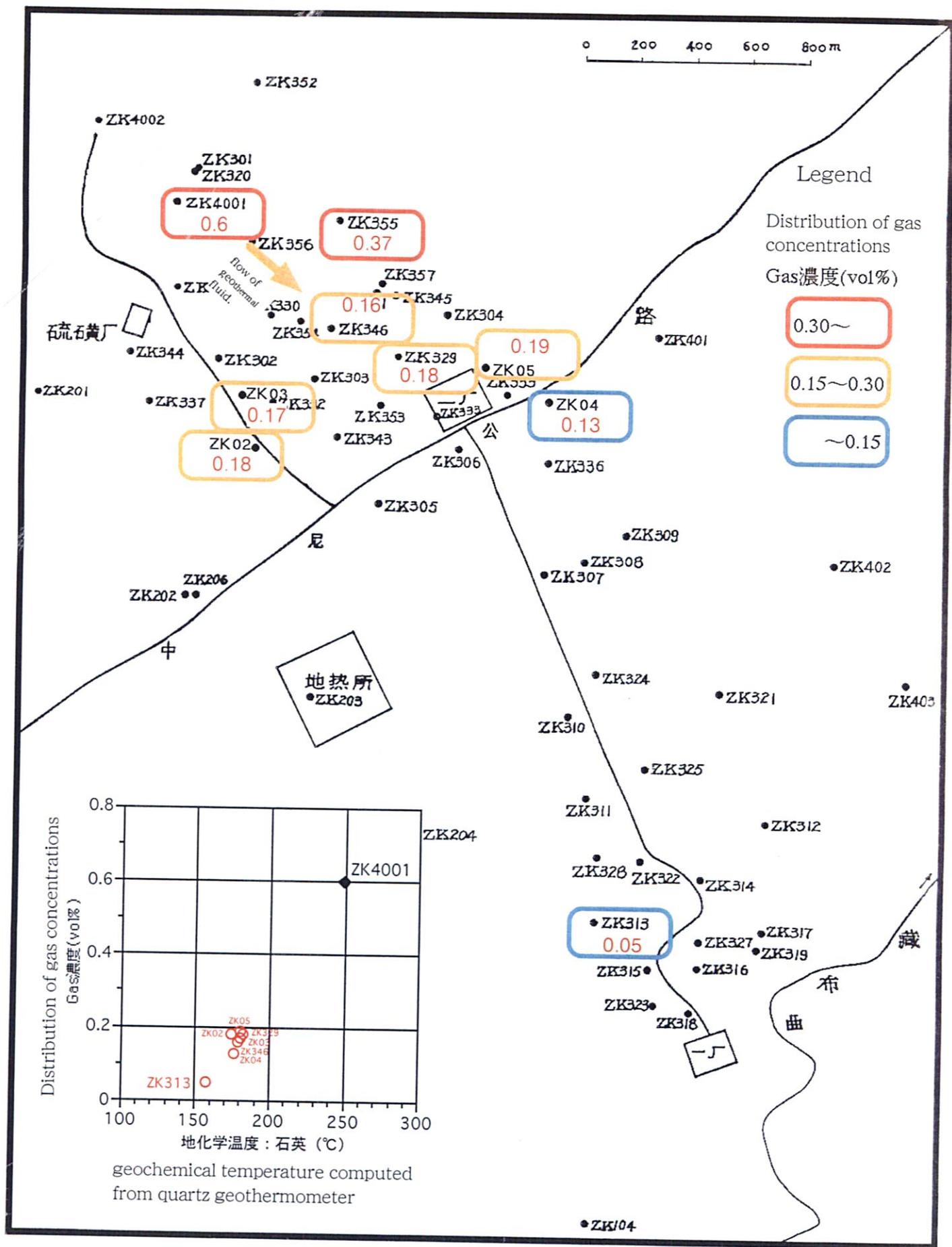
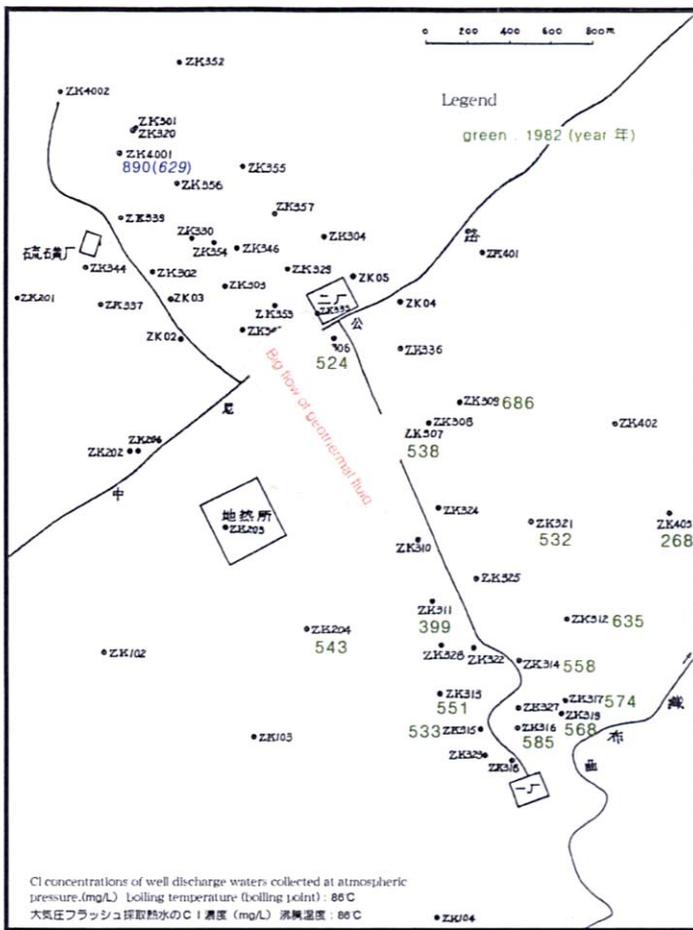
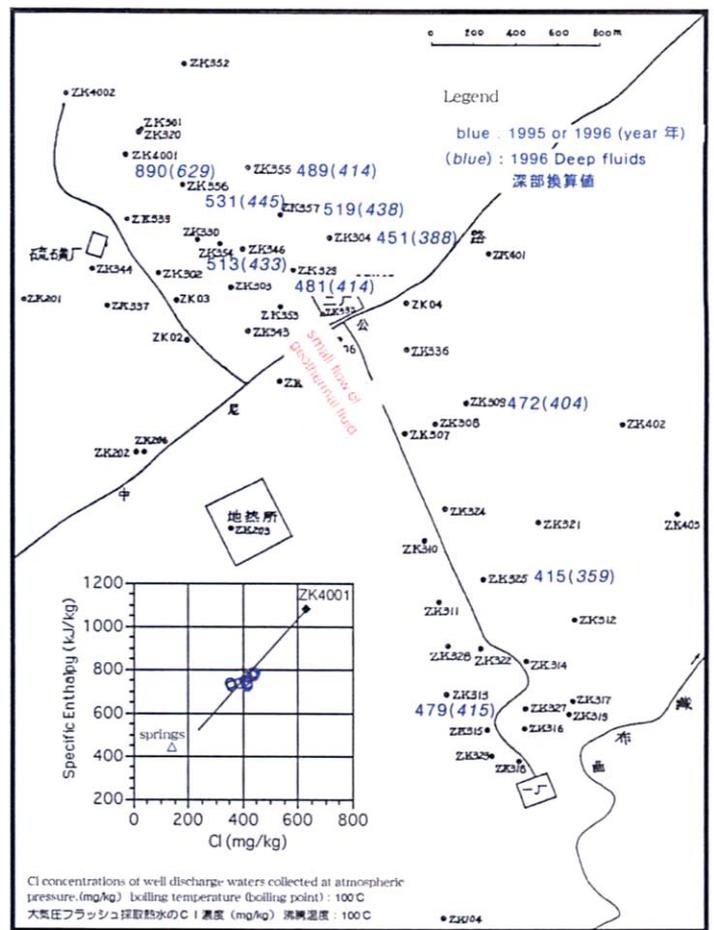


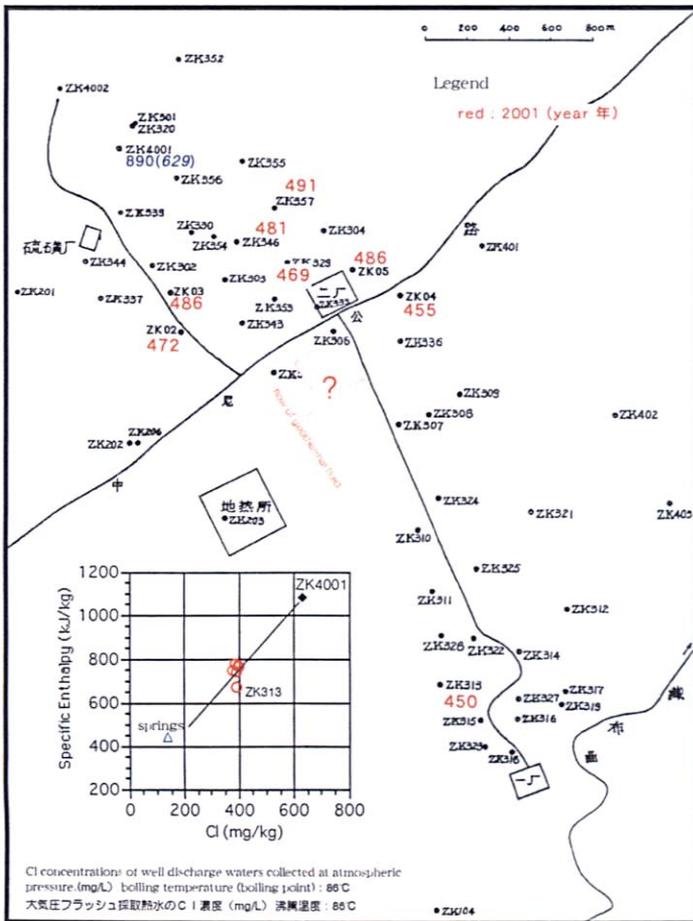
図 2-2-16 ガス濃度分布図



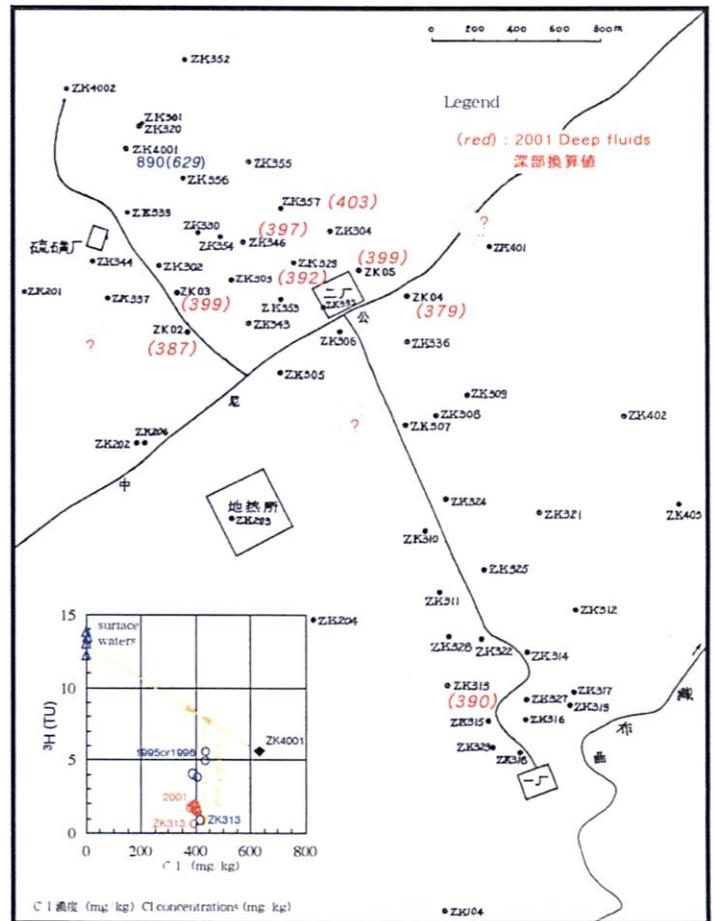
1982年 Cl濃度分布図
Distribution of Cl concentrations 1982



1996年頃 Cl濃度分布図
Distribution of Cl concentrations about 1996



2001年 Cl濃度分布図
Distribution of Cl concentrations 2001



2001年 Cl濃度分布図 (深部換算値)
Distribution of Cl concentrations 2001 (Deep fluids)

図 2-2-18 Cl濃度分布図

流体流動の推定前に Cl 濃度及び温泉の現状について整理する。熱水中の Cl 濃度が変化する理由としては、一般に「地表水による希釈」、「還元熱水の混入による高濃度化」、及び「蒸発による濃縮」が考えられる。現在の羊八井地域では、蒸気生産に伴い活発であった地表噴気が無くなり、温泉湧出口も蔵布曲より北側から消失し、巨大な温泉湧出口であった「熱水湖」の水位も発電所運開後十数メートル低下している。このような状況から Cl 濃度の変化は次のように整理される。

- ・1982 年以前には、噴気活動による蒸気放出のため浅部熱水が部分的に濃縮して Cl 濃度の高い熱水が認められた。
- ・現在は地表の噴気や温泉がなくなり、Cl 濃度の濃縮は起こっていない。
- ・2001 年の浅部熱水は、浅部貯留層内部でさらに地表水や還元熱水によって混合している事実は認められない。

③ 浅部貯留層の流体流動の推定

以上の傾向と事実から、現在の羊八井地域浅部の流体流動を推定した。

- ・浅部貯留層の熱水は ZK4001 周辺の熱水を起源水とし、地表水との混合で生成した。
- ・2001 年の Cl 濃度及び水の同位体比から、浅部貯留層への流体及び熱の供給は、ZK4001 周辺の熱水と地表水が混合した北部地域から供給される熱水のみと考えられる。
- ・1996 年頃の Cl 濃度と比エンタルピーの関係から、1996 年頃までは浅部熱水は北部地域から南部地域へ流動していた。
- ・1996 年頃までは浅部貯留層内部で地表水と熱水の混合が認められたが、2001 年の浅部貯留層は、地表水を直接引き込んでいない。
- ・1996 年と 2001 年の Cl 濃度と比エンタルピーの関係を比較すると、2001 年の ZK313 熱水は伝導冷却が認められることから、北部地域から南部地域への熱水流動は、2001 年には非常に少ないもしくは存在しない可能性がある。
- ・ ^3H 濃度経時変化から、2001 年の北部地域の生産流体は、主生産地域の北部への移行による貯留層圧力の低下に伴い、周辺の古い熱水が北部地域へ戻ってきた流体である可能性がある。

(3) 浅部貯留層の現状

北部地域から供給される浅部熱水の供給量は、現状の浅部貯留層からの生産量に対し不足している。南部地域では流体温度の低下が認められるが、この温度低下は冷たい地表水を引き込んで起こる急激な温度低下ではない。浅部貯留層が地表水を引き込まない理由としては、「地表水が少ない」もしくは「貯留層内のフラクチャのスケールによる閉塞」が考えられる。いずれにしても羊八井の浅部貯留層は、地表水を直接引き込まないため、急激な温度低下を避けられている。北部地域においても熱水供給の不足が認められ、現在は周辺地域から北部地域へ流体が流動している可能性がある。

(vii) 地化学平衡シミュレーション結果

地化学平衡シミュレーションによる坑井熱水の貯留層内での流体組成計算結果を表