

松川地熱発電所の運転と貯留層管理

花野 峰行*・小田中浩一**・大 山 孝***

Operation and Reservoir Management of the Matsukawa Geothermal Power Station

by

Mineyuki HANANO, Koichi KOTANAKA,
and Takashi OHYAMA

Abstract: This paper reports operation and reservoir management of the Matsukawa geothermal power plant. This includes a summary of the production records of the power plant and well head data of all the wells, a review of the results of physical and chemical reservoir monitoring, and a discussion on current issues for stable operation of the power plant.

The Matsukawa geothermal power station has a vapor dominated geothermal reservoir which has been the only extensive one found in Japan. The first ever geothermal power generation in Japan was started in Matsukawa in October 1966 by Japan Metals and Chemicals Co., Ltd., Power generation at Matsukawa has been continued successfully for more than twenty-two years. The present output is 22 MW with 10 production wells. Cumulative electric energy produced, an average output and the utilization factor over twenty-two years are 3.53×10^6 MWh, 19.6 MW and 86 percent respectively.

Water level monitoring and pressure build-up test have been conducted as a physical reservoir monitoring. From the water level monitoring at a well T-22 which is located at the center of the production area, an approximate average of decrease of the reservoir pressure during the last few years was 0.2 bar per year, which is very small. From the most recent pressure build-up test, shut-in pressure there is higher in south-west of the production area and there is a steep pressure gradient from south-west to north-east. This suggests that there is a lateral steam flow from south-west to north-east in the reservoir and most of steam currently produced is supplied from south-west. M-7 which has the highest shut-in pressure and is one of the most south-western wells, produces the most steam and its rate of decrease over eighteen years is less than 1 t/h per year. These facts suggest that the Matsukawa geothermal reservoir still has enough potential to maintain its rated output, 22 MW.

From the chemical reservoir monitoring, steam produced at southwestern wells are richer chemically in old meteoric water, and poorer in younger meteoric water and volcanic gas compared with northwestern wells. It suggests that the chemistry of the steam is controlled by local pressure balance.

Most of the steam currently produced at Matsukawa is dry superheated steam. Recently, the degree of superheat has become higher especially at north-eastern wells. Thus, re-injection of condensate is planned to support reservoir pressure and to maintain stable steam production. A small scale experiment has been conducted since March 1988, to assess its effect on steam production.

平成元年4月14日受理

* 日本重化学工業㈱地熱事業部 盛岡工業所探査部 ** 日本重化学工業㈱地熱事業部 盛岡工業所技術管理部

*** 日本重化学工業㈱地熱事業部 盛岡工業所松川発電所

地熱 Vol. 26, No.2 (Ser. No. 107) 1989

1. ま え が き

松川地熱発電所は昭和41年10月に運転を開始した日本で最初の地熱発電所であり、日本で唯一の蒸気卓越形地熱発電所である。当地域における発電は、当初出力9.5 MW で開始され、昭和42年4月に12.5MW, 昭和43年3月に20MW, 昭和48年4月に22MW となり現在に至っている。現在10本の生産井が使用されており、22MW の発電が安定に継続されている。

松川は、盛岡市の北西約50km に位置し、秋田駒ヶ岳や岩手山などの第四紀火山が密集する八幡平地熱地域に属している。この八幡平地熱地域には松川のほかに、葛根田、大沼の両地熱発電所がある(図1)。

松川における地熱開発は、昭和27年に地元の松尾村が温泉開発のためのボーリングをしたことに始まる。このボーリングは、いずれも深度約300m で蒸気が噴出した。この異常な現象に着目した当社は、昭和31年より調査を始め昭和33年、当時地熱調査の唯一の機関であった工業技術院地質調査所と共同研究のもとに開発を進めた。開発当初は5MW の発電をめざしたが、昭和39年1月に掘削されたM-1井において約60t/h の蒸気が確認されたことから計画を20MW に変更した。この間の経緯など

については中村(1966)、森(1967)などに述べられている。

松川地域の地熱系に関する研究は、古くから行われている。代表的なものとしては、中村(1967)、早川(1967)、SUMI(1968)、片桐(1969)によるものなどがあるが、比較的最近までの研究については井出(1985)によりまとめられている。松川地域のフラクチャーについては赤沢・村松(1988)により詳細に報告されているが、彼らによれば、主要生産深度は海拔0～500m であり、玉川溶結凝灰岩中と貫入岩周辺に発達するフラクチャーから蒸気は生産されている。松川地域の地質断面図を図2に示す。図3は海拔0m におけるフラクチャー分布である。

松川発電所の運転の経緯については大西ほか(1981)、七沢(1987)によりすでに報告されたことがある。ここでは、その後の発電状況に加え、当地域における、蒸気生産に伴う坑井や貯留層の経時変化について述べ、運転管理上問題になっている点やその対策についても述べてみたい。

2. 発電設備並びに運転実績

(1) 設備の概要

松川地熱発電所の設備配置図を図4に示す。

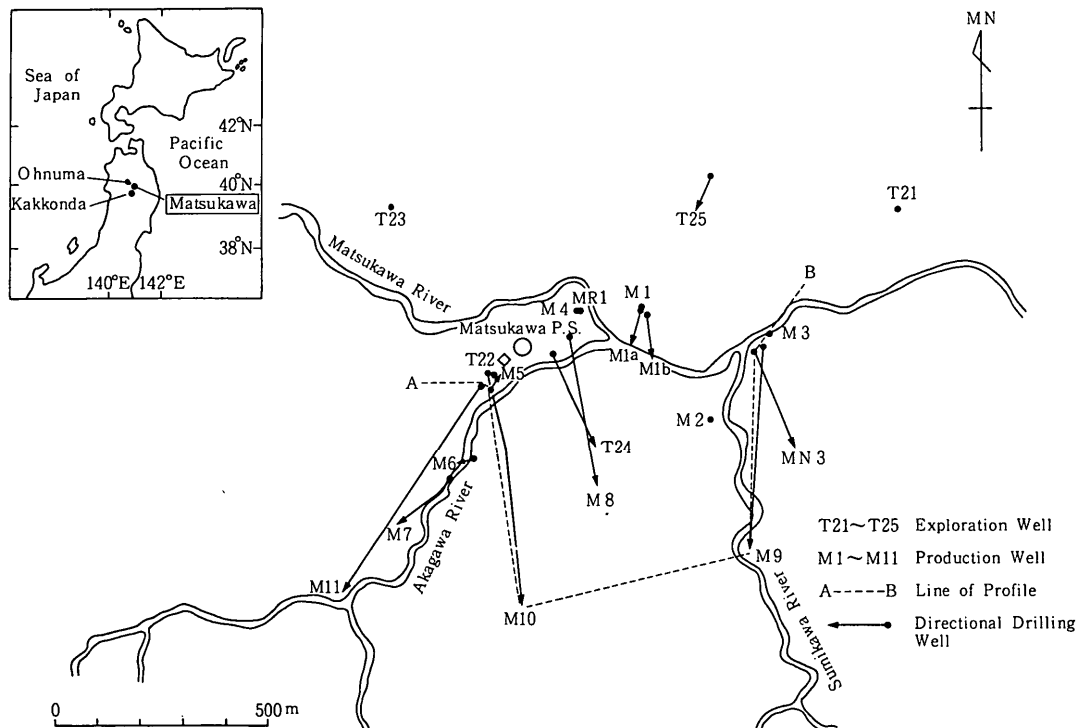


図1 坑井位置図並びに断面位置図(赤沢・村松, 1988)

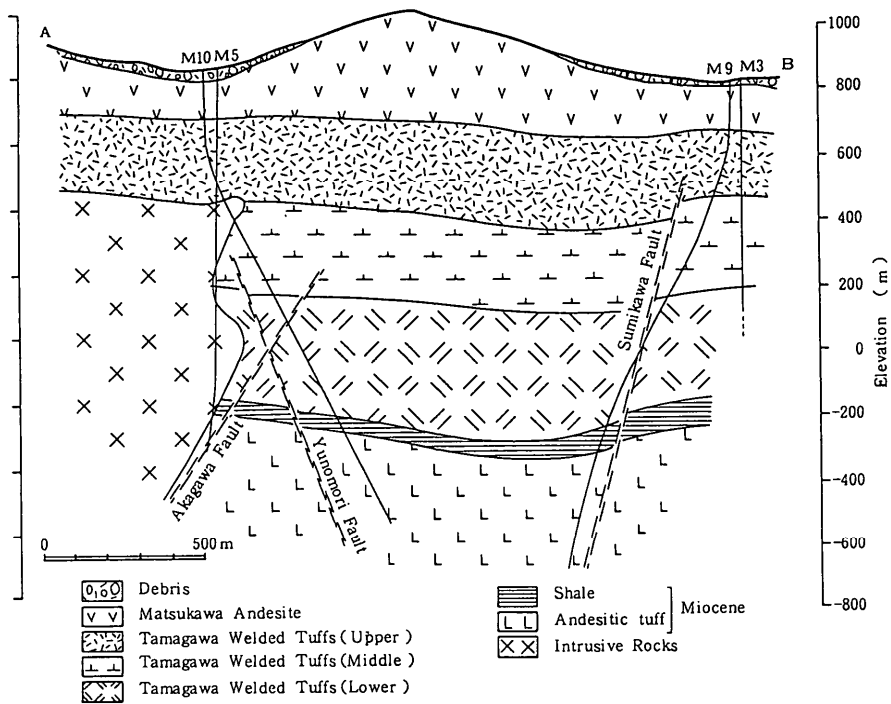


図2 地質断面図 (赤沢・村松, 1988). 断面位置は図1に示す.

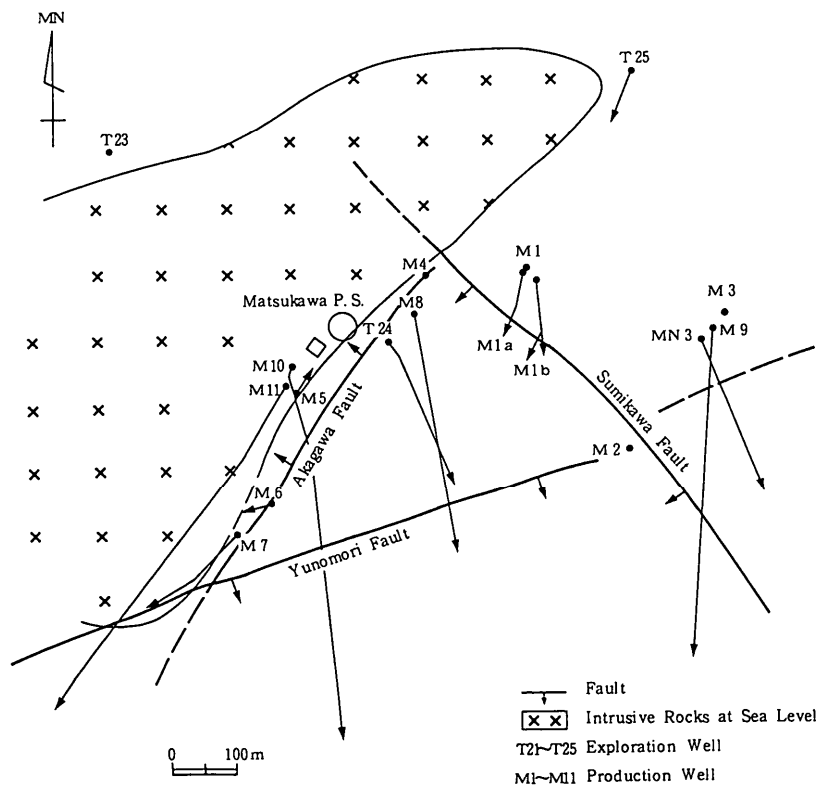


図3 海拔0mにおけるフラクチャー分布図 (赤沢・村松, 1988).

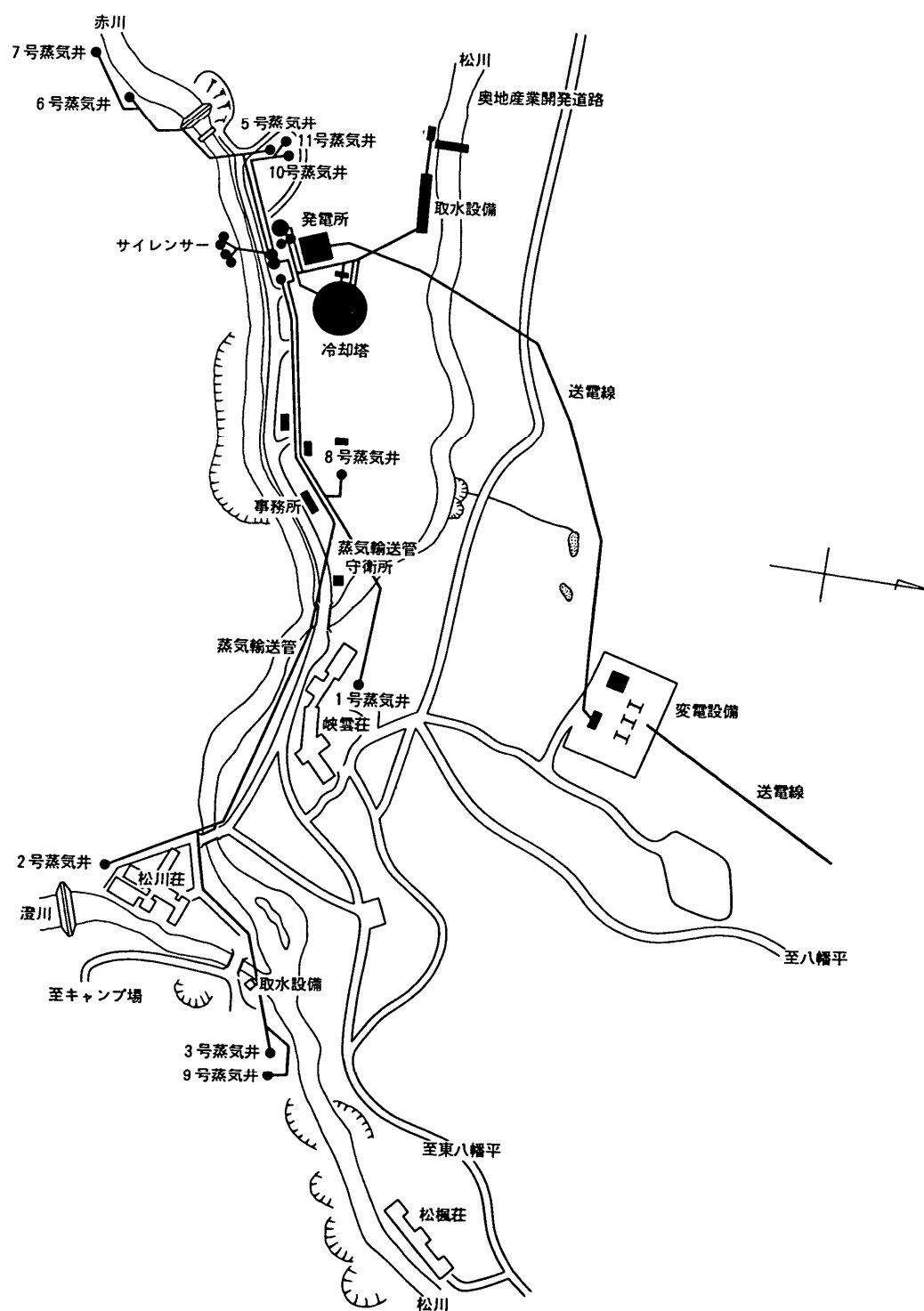


図4 設備配置図

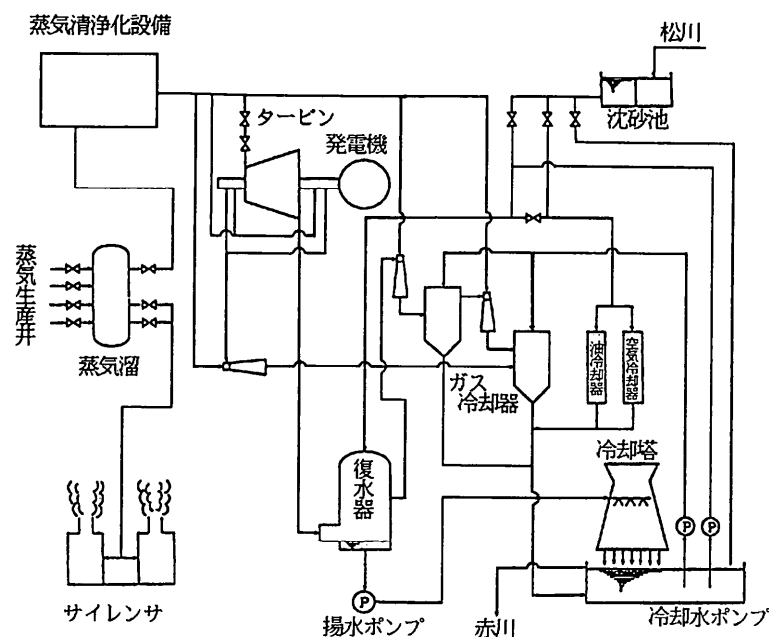


図5 主管系統図

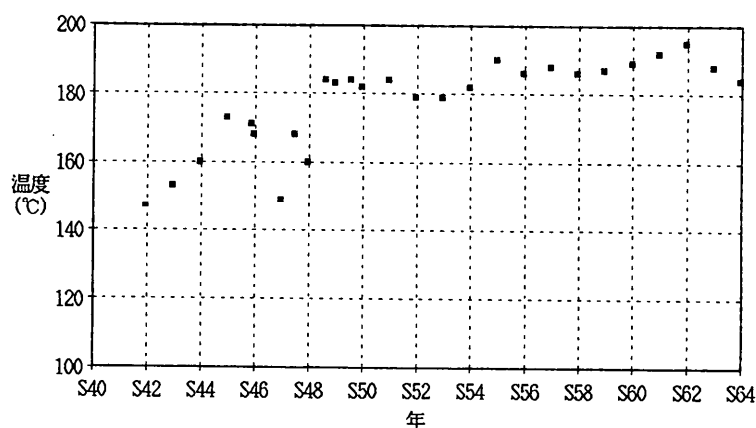


図6 タービン流入蒸気温度の推移

用地は送電線敷の一部を除き、すべて国有林野内にあり、国からの借地である。借地面積は約31万 m^2 で、そのうち発電所敷地は約8万 m^2 である。

主管系統図を図5に示す。松川発電所では蒸気生産井より噴出する流体は、蒸気単相であるため熱水を還元する坑井を必要とせず、主な設備は、蒸気生産井（10坑井）、タービン（1基）、復水器（1基）、冷却塔（1基）等である。

現在の設備の仕様を表1に示す。

a. タービン

タービンの蒸気条件は、運転開始当初、入口圧力3.5 $\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ 、温度147.4 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度1%の飽和蒸気であっ

たが、噴出蒸気の過熱化が徐々に進行している。タービン流入蒸気温度の推移を図6に示す。

平成元年1月現在の運転状況は、タービン入口圧力3.5 $\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ 、温度183 $^{\circ}\text{C}$ 、流量198 t/h 、発電出力22.0 MWである。

タービンの断面図を図7に示す。

昭和63年5月にタービンの性能調査を行った結果、昭和46年と比較して蒸気消費率が約5%悪化していることが判明した。これは、タービンへのスケール付着と設備の劣化等によるものと推定される。また、タービンのケーシング等も老朽化しているので、現在、高性能タービンへの更新を検討している。

表1 設備仕様

設 備	項 目	仕 様	備 考
蒸気タービン	型 式 定 格 出 力 回 転 数 蒸 気 条 件 排 気 圧 力 翼 段 数 基 数 製 造 者	単気筒単流衝動復水式 22,000kW 3,000rpm 圧力: 3.5atg 温度: 200℃ 110mmHg abs 4 1 (株)東芝	
復 水 器	型 式 復 水 量 真 空 度 冷 却 水 基 数 製 造 者	ローレベルジェット式 230.1t/h 105mmHg abs 温度: 25℃ 流量: 5,600t/h 1 (株)東芝	昭和55年10月バロメトリックジェット式から更新
ガ ス 抽 出 器	型 式 作 動 蒸 気 作 動 蒸 気 抽 出 ガ ス 量 基 数 製 造 者	2 段 2 連蒸気噴射式 圧力: 3.5atg 流量: 12 t/h 6,518 kg/h 2 系列 (常時 1 系列使用) (株)東芝	
冷 却 塔	型 式 復 環 水 基 数 製 造 者	自然通風向流型 流量: 5,000t/h 入口温度: 47℃ 出口温度: 25℃ 1 大成建設(株)	
蒸 気 生 産 井	本 掘 進 数 最 終 口 長 徑	10本 最長1,507m 194~222mm	
還 元 井	本 掘 進 数 最 終 口 長 徑	1 本 1,000m 168mm	
循環水ポンプ	ポ ン プ 名 称 型 式 揚 水 量 全 揚 程 回 転 数 電 動 機 容 量 台 数 製 造 者	揚水ポンプ 立軸両吸込1段渦巻 53.73m/min 31m 750rpm 440kW (3.5kV) 2 由倉工業(株)	
	ポ ン プ 名 称 型 式 揚 水 量 全 揚 程 回 転 数 電 動 機 容 量	冷却水ポンプ 横型両吸込渦巻 41.7m/min 28m 975rpm 270kW (3.5kV)	

	台製 造者	数者	2 由倉工業(株)	
	ポンプ 型式 揚水 全回 電動 台製 造者	名称 水量 程数 容量 数者	冷却水ポンプ 横型両吸込渦巻 20m/min 28m 1500rpm 130kW (3.5kV) 1 由倉工業(株)	
発 電 機	型極 容容 回回 電電 周周 力力 相相 台台 製製 造者	式数 量数 数数 圧圧 流流 率率 数数 数数 者者	横置円筒型回転界磁 2 23,500kVA 3,000rpm 11,000V 1,233A 50Hz 0.85 (遅れ) 3 1 (株)東芝	昭和41年10月 9,500kW 昭和42年 4 月 12,500kW 昭和43年 3 月 20,000kW 昭和48年 4 月 22,000kW 認可
主 要 変 圧 器	型容 電電 台製 造者	式量 圧圧 数数 者者	三相屋外用自冷納入式 23,500kVA 一次10.5kV 二次154 kV 1 (株)東芝	

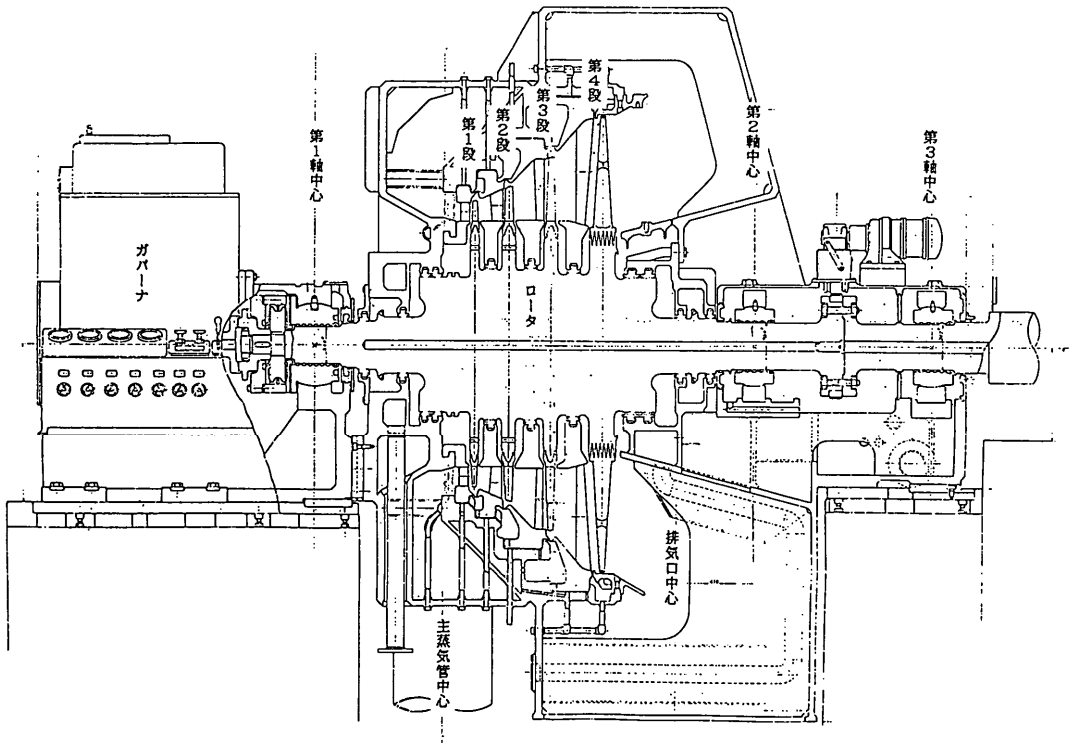


図7 タービン断面図

b. 復水器

復水器は、当初バロメトリックジェット式を使用していたが、経年劣化と過熱傾向にある地熱蒸気の有効利用を図るため、昭和55年10月に現在のローレベルジェット式の復水器に更新した。ローレベルジェット式復水器の構造図を図8に示す。

運転を開始してから約半年で復水器内部の各所にスケールの付着が認められ、散水棚の多孔板に目詰りを生じる状況となった。このスケールの成分はほとんど斜方硫黄であった。このため、熱交換率が若干低下するが、多孔板の孔径を10mmから15mmに変更して、多孔板の目詰りに対処した。定期点検時には内部の点検及び清掃

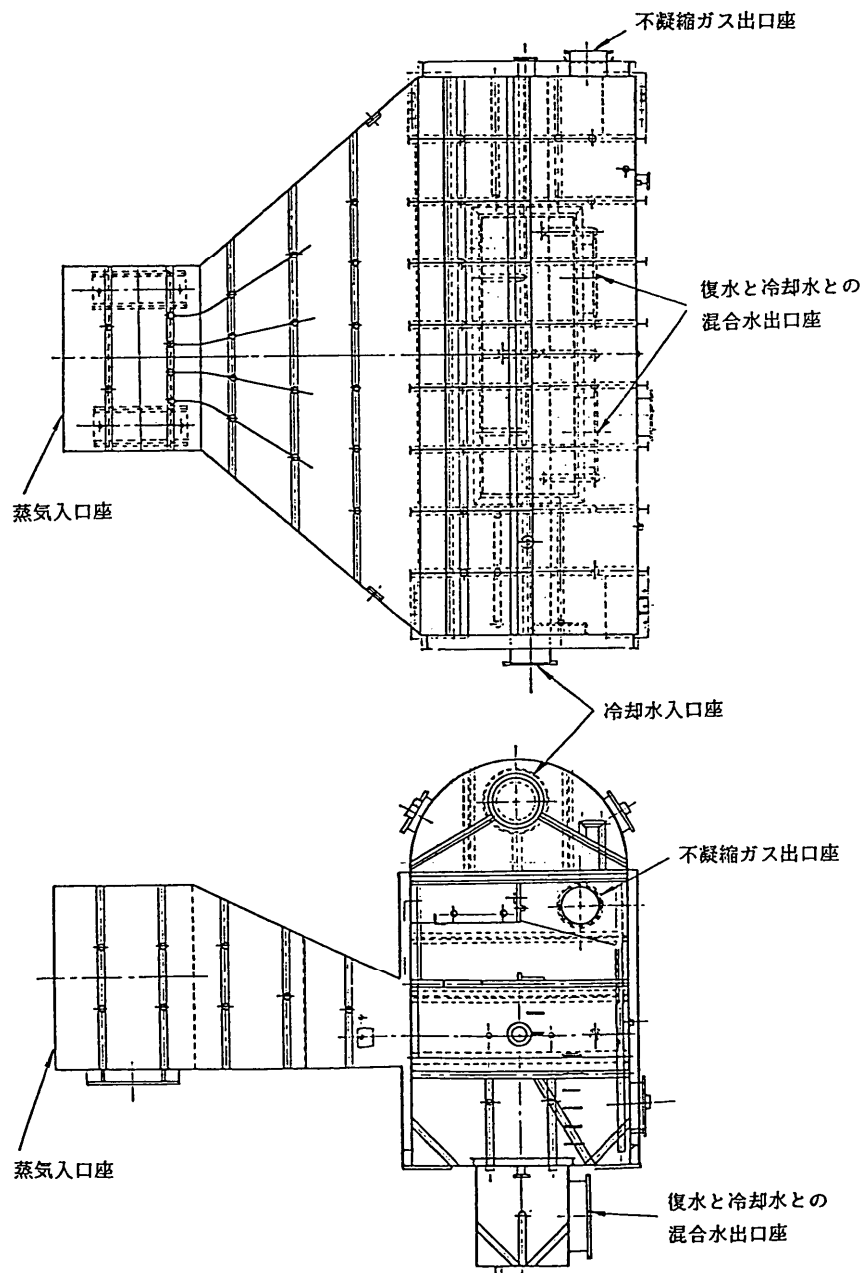


図8 ローレベルジェット式復水器構造図

を実施している。

c. 冷却塔

冷却塔の概要図を図9に示す。松川発電所の冷却塔は自然通風型であり、強制通風式に比べて冷却ファンの動力を要しない利点があるが、冷却効果が季節的に変動し、特に、外気温が上昇する夏期にその効果が低下する傾向

がみられる。

特に、塔体の鉄骨部材の腐食による劣化や、コンクリートの凍結融解による劣化が著しいが、松川地熱発電所のシンボルともなっているため計画的に補修を行い、その性能の維持を図っている。現在までに、塔脚部のコンクリートの補修、腐食した鉄骨部材の補強、塔内部に設置

番 号	名 称
1	圧カタンク
2	揚水管
3	散水母管
4	立上り管
5	散水管

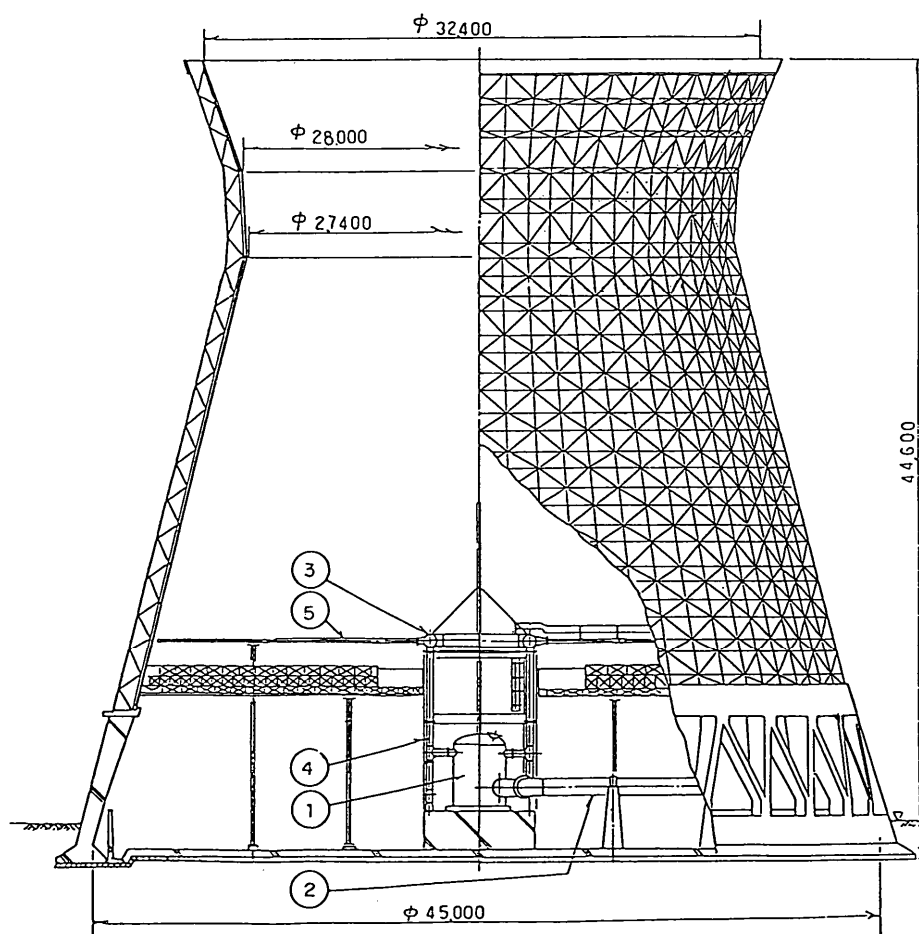


図9 冷却塔概要図

している圧力タンクの更新、劣化した充填材の交換を行っている。

d. 蒸気生産井

坑井の掘削状況を表2に示す。現在稼働中の蒸気生産井は10坑井である。現在までに掘削した坑井の深度（掘進長）は945mから1,507mであるが、主要な蒸気は深度800～1,300mから生産している。

全般に、蒸気流量は年々減少していく傾向にあるため、随時、蒸気生産井を増設し必要な蒸気量を確保している。

e. 還元井

昭和41年に運転を開始して以来、噴出する蒸気の温度が徐々に上昇している（図6参照）。地下の蒸気貯留層では、熱の供給に比べ水の供給が不足していると推測される。このため昭和63年に、貯留層の涵養を目的に還元井MR-1を設置した。現在のところ、他の蒸気生産井への影響を調査している段階であり、還元流量は試験的に約10～30t/hとしている。

f. 蒸気清浄化設備

昭和62年、タービンへ流入する蒸気を対象に蒸気清浄化設備を設置し、現在、試験使用している。この蒸気清浄化設備フローシートを図10に示す。このシステムは、加湿器、スプレー塔、ミストセパレータから成っており、蒸気中のスケール成分を湿らせてミストセパレータによって分離して除去するものである。

g. 発電機

認可出力は、当初、20.0MWであったが、昭和47年4月に22.0MWの試運転を行い、良好な結果が得られたため、昭和48年4月から認可出力を22.0MWに変更した。

昭和59年11月には発電機回転子コイルが溶損する事故が発生した。この事故の原因は、発電機用空気冷却器内に異物が混入していたためと推定された。

h. 温水供給設備

松川地熱発電所では、地熱資源の多目的利用として、蒸気の一部を利用して熱交換を行い、70℃の温水を造成している。この造成された温水は、発電所から約6km

表2 坑井の掘削状況

坑井種別	坑井名	深 度 (掘進長) (m)	水止め 深 度 (m)	推 定 流入点 (m)	最 終 口 径 (mm)	工 期	備 考
調 査 井	AR-1	325			194	35/ 7-35/ 8	
	BR-1	450			219	35/ 9-35/10	
	BR-2	571			184	36/ 7-36/11	
	T-21	602	206		98	39/ 8-39/12	
	T-22	700	243		95	42/ 2-42/ 6	
	T-23	702	252		114	43/ 2-43/ 5	
	T-24	1,050	430		130	46/11-47/ 3	
	T-25	558	505		130	49/11-50/ 2	
蒸気生産井	M-1	945	474	840	194	38/10-38/12	廃 坑
	M-1a	965	509	947	219	46/10-47/ 1	廃 坑
	M-1b	1,206	850	950	222	56/ 1-56/ 3	
	M-2	1,080	498	1,080	194	39/ 4-39/ 7	
	M-3	1,207	501	1,040	194	39/ 9-39/12	廃 坑
	M-3a	1,055	552	1,031	194	41/10-42/ 1	廃 坑
	M-N3	1,170	801	1,044	200	48/ 2-48/ 5	
	M-4	1,501	488	960	194	40/ 3-40/ 8	廃 坑
	M-5	1,190	500	1,120	216	42/ 8-43/ 1	
	M-6	1,203	504	970	194	43/10-44/ 1	
	M-7	1,280	506	1,064	219	45/ 1-45/ 4	
	M-8	1,200	647	719	200	51/12-52/ 4	
	M-9	1,500	970	1,048	222	53/ 7-53/12	
	M-10	1,507	800	820	222	58/ 7-58/ 8	
	M-11	1,450	900	1,440	222	60/11-61/ 5	
還 元 井	MR-1	1,000	490		168	63/ 1-63/ 4	

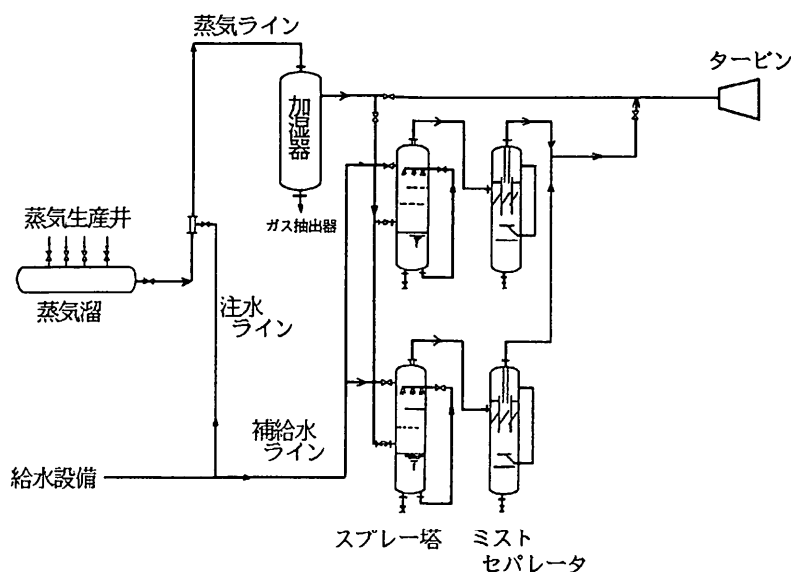


図10 蒸気清浄化設備フローシート

離れた岩手山麓の八幡平温泉郷へ送られ、ホテル、旅館、保養所、病院、及び別荘等で浴用として利用されているほか、さらに、約6km離れた松尾村ハウス団地に農業用熱源として給湯し、野菜、花等の栽培に利用されている。温水造成設備は、当初、60t/h供給していたが、新たな温水利用計画に伴い、昭和58年、200t/hの設備を増設した。現在の温水供給は最大130t/hである。

(2) 運転実績

松川地熱発電所は、昭和41年10月、認可出力9.5MWで営業運転を開始し、蒸気生産井の増設を行って、昭和42年4月12.5MW、昭和43年3月、定格出力20.0MWとなった。昭和48年4月には定格出力を22.0MWに引き上げて現在に至っている。

昭和41年から昭和63年までの運転実績を表3に示す。過去22年間の累計は、運転時間18万570時間、発電電力量は35億3,300万kWhに達し、平均発電電力19,600kW、利用率86%となっている。

運転開始初期の昭和42年から昭和43年には、タービン羽根の切損事故が発生して、稼働率並びに利用率が低下した。

昭和59年から61年にかけて利用率が低下しているのは、噴出蒸気の性状変化に伴い、スケールが付着したことによるタービン効率の低下のためである。

昭和59年は、さらに、発電機回転子コイルの溶損事故が発生したことも利用率の低下の原因となっている。

(3) 蒸気噴出状況の経時変化

松川発電所では、通常、各蒸気生産井の圧力、温度

及び流量を記録計にて監視しているほか、特別に月1回の割合で蒸気の圧力、温度、流量の測定を実施し、各坑井の蒸気噴出状況を調査している。

坑井の使用状況を表4に示す。昭和52年以降は、3年に1坑井の割合で蒸気生産井を増設して出力を維持しているが、1坑井当たりの蒸気の噴出量は年々減少する傾向にある。

昭和44年以降の各坑井毎の流量及び温度の推移を図11～20に示す。温度はライン圧力での温度で、ライン圧力は4.0から5.0kg/cm²Gである。M-6井については単独の測定装置がないため推定値である。

現在の蒸気流量が40t/h以上の優勢な蒸気生産井は、M-7、11井の2坑井で、いずれも松川地域の南西側に掘削されている坑井である。

M-7井は昭和45年掘削され、当初、最高75t/hの蒸気を噴出する優勢な坑井であったが、時々泥を噴出するなどしてスケールにより坑内が閉塞され、蒸気流量が減少するため、昭和56年に改修を行っている。現在、蒸気流量は約50t/hである(図16参照)。

また、現在、蒸気流量が減少傾向にある蒸気生産井は、M-N3、5、6、8、9、10、11井の7坑井であり、増加傾向にあるのはM-2井だけである。M-2井は昭和41年発電所竣工以来、稼働している唯一の蒸気生産井で、昭和49年と51年に改修を行っている。M-2井の蒸気流量は、昭和58年頃まで減少傾向であったが、その後、僅かながら増加傾向を示している(図12参照)。

蒸気温度については、ほとんどの坑井が上昇傾向にあ

表3 運転実績

年	設備容量 (kW)	認可出力 (kW)	発電時間 (h)	発電電力量 (kWh)	最大電力 (kW)	稼働率 (%)	負荷率 (%)	所内率 (%)	利用率 (%)
41	20,000	9,500	1,874	17,120,500	10,400	92.9	80.7	6.3	88.3
42	20,000	12,500	6,870	67,439,600	13,000	82.7	59.2	6.8	61.6
43	20,000	20,000	7,072	106,673,800	20,500	84.2	59.2	4.5	60.7
44	20,000	20,000	8,432	142,354,900	20,600	98.4	78.9	4.0	81.3
45	20,000	20,000	8,364	162,518,100	21,000	97.0	88.3	4.3	92.8
46	20,000	20,000	8,153	153,108,300	21,100	95.6	82.8	4.4	87.4
47	20,000	20,000	8,458	172,558,700	21,500	97.0	91.4	4.3	98.2
48	22,000	22,000	8,478	181,073,900	22,500	97.5	91.9	4.1	94.0
49	22,000	22,000	8,364	185,910,900	22,500	96.2	94.3	3.9	96.5
50	22,000	22,000	8,431	173,234,500	22,400	97.0	88.3	4.2	89.9
51	22,000	22,000	7,686	150,629,300	21,900	88.3	78.3	4.6	77.9
52	22,000	22,000	8,452	170,349,800	22,300	97.0	87.2	4.5	88.4
53	22,000	22,000	8,088	164,587,300	22,300	93.2	84.3	4.4	85.4
54	22,000	22,000	8,417	175,808,400	22,400	96.7	89.6	4.5	91.2
55	22,000	22,000	8,124	163,373,800	21,900	93.2	84.9	4.8	84.5
56	22,000	22,000	8,434	173,979,800	23,100	97.0	86.0	6.7	90.3
57	22,000	22,000	8,173	176,353,400	23,100	94.0	87.2	6.3	91.5
58	22,000	22,000	8,395	176,643,300	23,100	96.4	87.3	6.3	91.7
59	22,000	22,000	7,312	150,651,800	23,100	84.4	74.2	6.2	78.0
60	22,000	22,000	8,336	149,545,300	22,000	96.2	77.6	7.3	77.6
61	22,000	22,000	8,094	153,299,200	22,500	94.0	77.8	7.0	79.5
62	22,000	22,000	8,309	185,234,000	22,500	95.6	94.0	5.8	96.1
63	22,000	22,000	8,254	180,557,200	22,500	95.3	91.6	6.1	93.7
計	—	—	180,570	3,533,005,800	—	—	—	—	—

(注) 1. 最大電力 (kW) は1時間最大

2. 稼働率 (%) は (稼働日数 / 暦日日数) × 100%

ただし運転開始の年は (稼働日数 / 運転開始後の暦日日数) × 100%

3. 利用率 (%) は (発電電力量 / 認可出力 / 暦日時間数) × 100%

ただし運転開始の年は (発電電力量 / 認可出力 / 運転開始後の暦日時間数) × 100%

4. 負荷率 (%) は (暦日平均電力 / 最大電力) × 100%

ただし運転開始の年は (運転開始後の暦日平均電力 / 最大電力)

5. 所内率 (%) は (所内使用電力量 / 発電電力量) × 100%

り、M-5 井のみ温度低下している。

M-5 井は昭和42年掘削され、M-2 井に次いで歴史の古い坑井であるが、近年、坑内のケーシングパイプの劣化が著しい。

M-5 井は、当初、蒸気流量60t/h、温度190℃の優勢な坑井であったが、その後、流量が徐々に減少し、昭和59年、流量および温度が変動し、現在、蒸気温度は154℃（飽和温度）に低下している（図14参照）。

現在の蒸気温度が210℃を越えているのは、M-2、N3、8、9、11井の5坑井で、松川地域の南側に掘削されている坑井が多い（図1参照）。

3. 貯留層挙動

生産に伴う貯留層の挙動を調査することは、運転管理上極めて重要である。ここでは松川地熱発電所において実施している貯留層挙動のモニタリングとその結果の概要について述べる。

(1) 物理的挙動

松川における物理的な貯留層特性は、開発当初は非常によく調査されており、その結果については、高木・田中（1968）、BABA *et al.*（1970）などにより報告されている。しかし、その後の挙動はそれほど多くは調べられていない。これは、生産井の坑口装置の関係から生産

表4 坑井の使用状況

年度	生産井数 (本)	還元井数 (本)	蒸気流量 (t/h)	1坑井当りの 蒸気流量 (t/h)	年度	生産井数 (本)	還元井数 (本)	蒸気流量 (t/h)	1坑井当りの 蒸気流量 (t/h)
41	2	0	100	50.0	53	7	0	212	30.3
42	3	0	124	41.3	54	8	0	236	29.5
43	4	0	181	45.3	55	8	0	215	26.9
44	5	0	209	41.8	56	8	0	226	28.3
45	6	0	234	39.0	57	8	0	226	28.3
46	6	0	212	35.3	58	8	0	243	30.4
47	6	0	237	39.5	59	9	0	199	22.1
48	6	0	250	41.7	60	9	0	199	22.1
49	6	0	228	38.0	61	10	0	239	23.9
50	6	0	217	36.2	62	10	0	237	23.7
51	6	0	215	35.8	63	10	1	237	23.7
52	7	0	223	31.9					

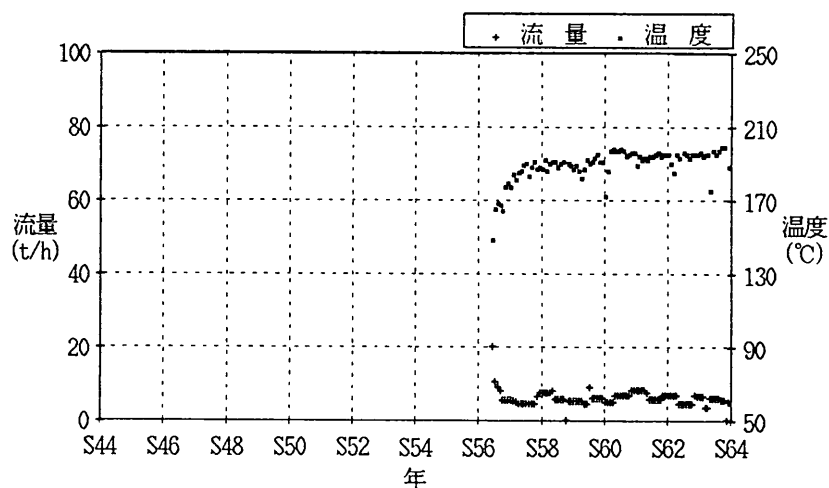


図11 M-1b 井の蒸気流量及び温度の推移

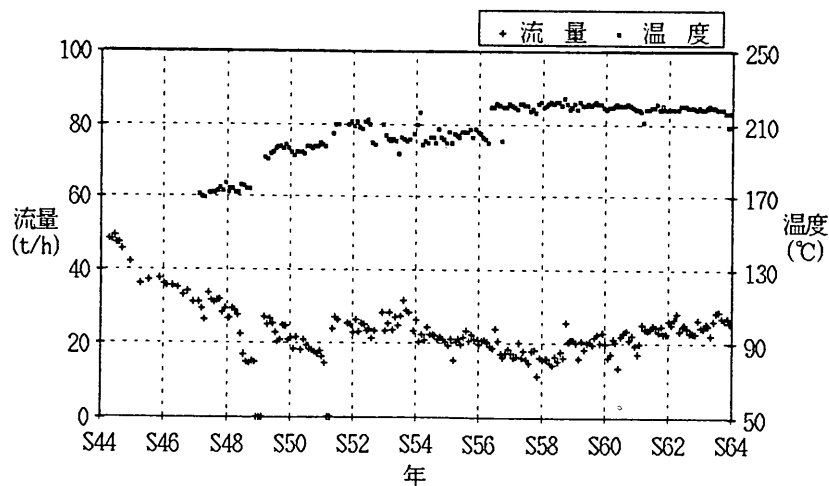


図12 M-2 井の蒸気流量及び温度の推移

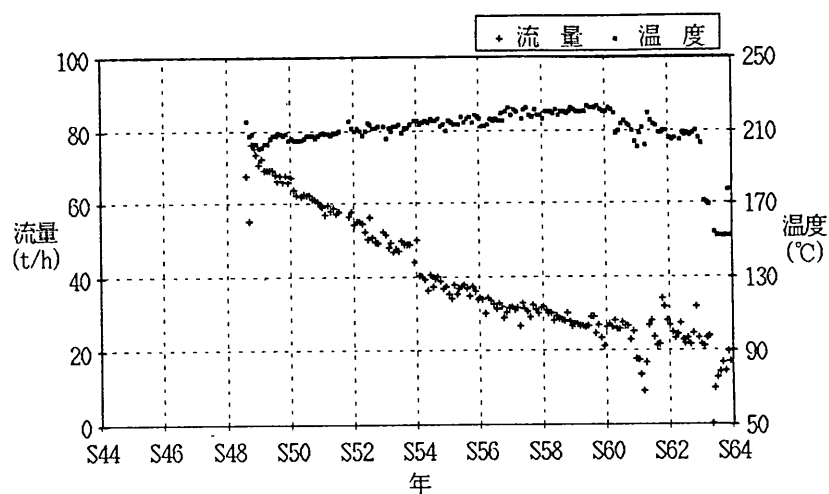


図13 M-N3 井の蒸気流量及び温度の推移

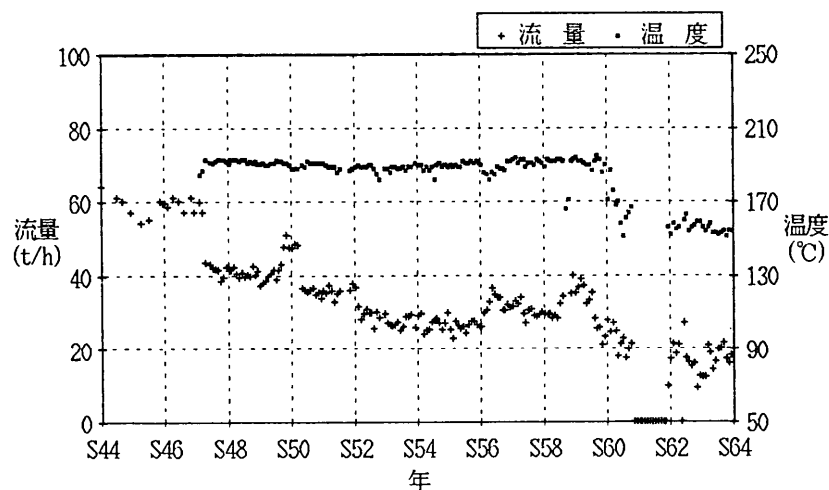


図14 M-5 井の蒸気流量及び温度の推移

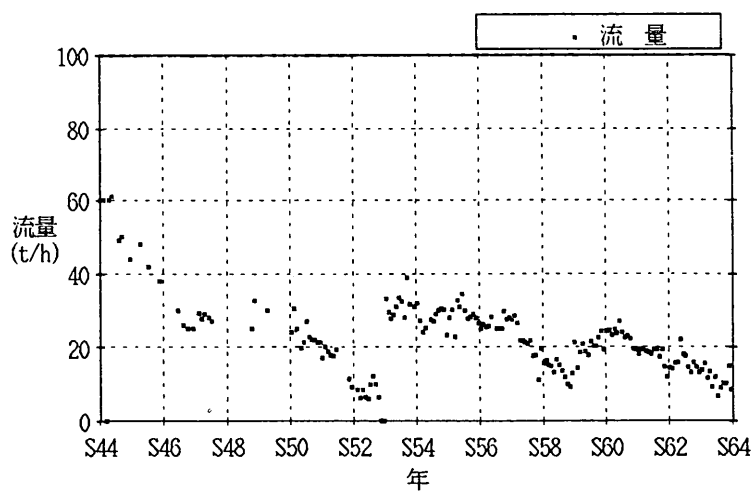


図15 M-6 井の蒸気流量の推移

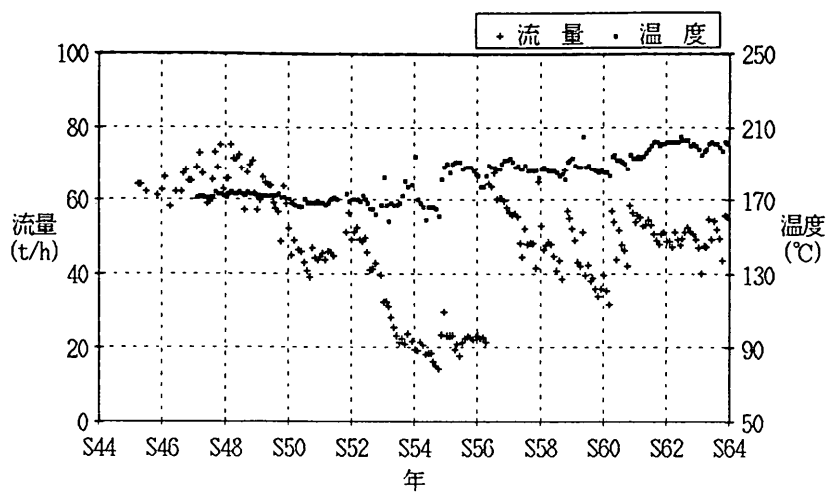


図16 M-7 井の蒸気流量及び温度の推移

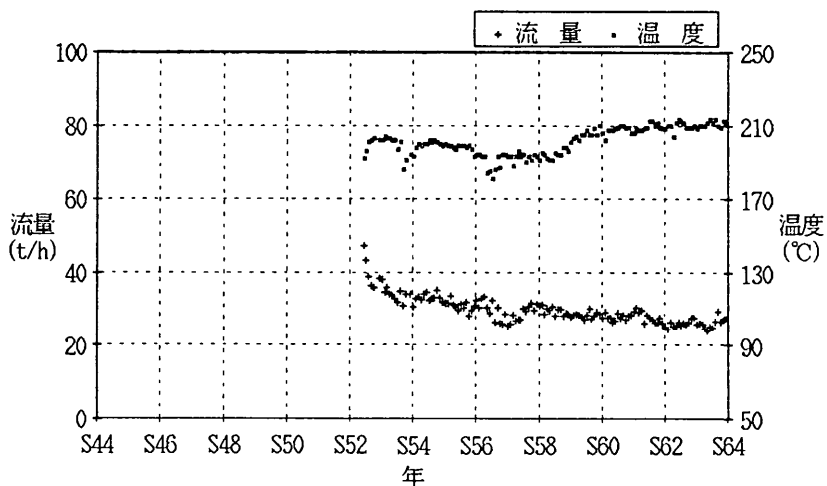


図17 M-8 井の蒸気流量及び温度の推移

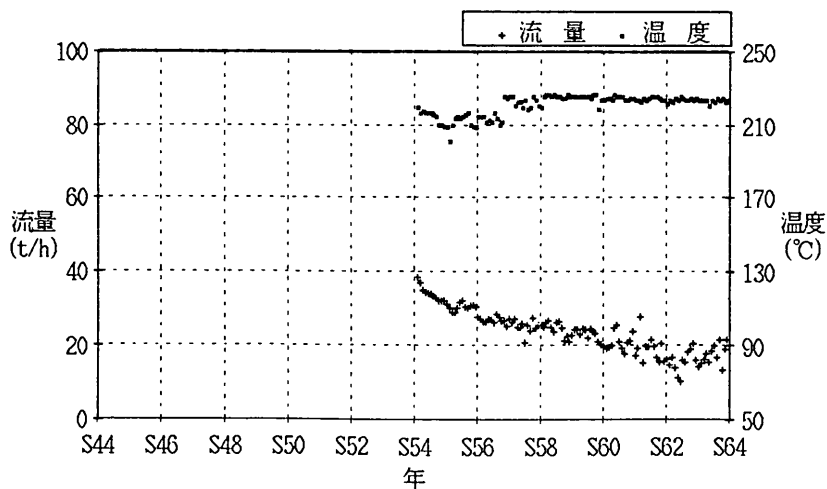


図18 M-9 井の蒸気流量及び温度の推移

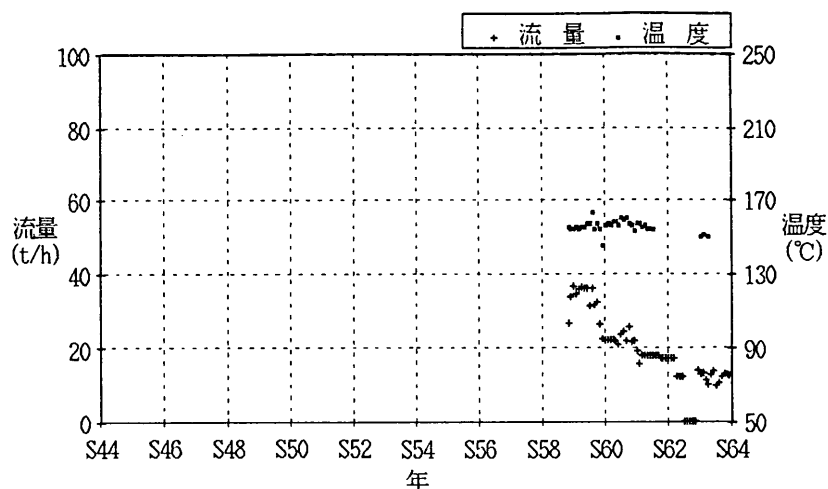


図19 M-10井の蒸気流量及び温度の推移

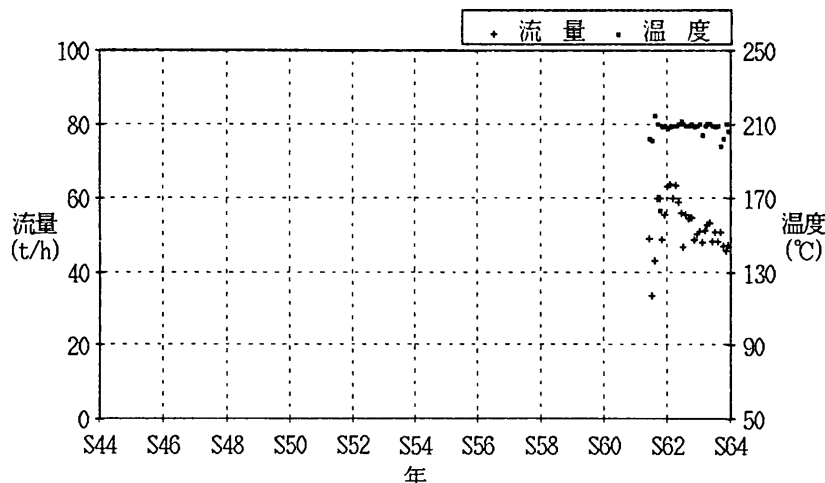


図20 M-11井の蒸気流量及び温度の推移

開始以後は坑井内調査が行えなかったためと、十分な深度の観測井がなかったためである。このため、松川において連続的に実施されている貯留層物理挙動のモニタリングはT-22、T-23の両井における水位観測のみである。しかしながら、最近になり、噴気停止後の密閉坑口圧力の上昇を測定するプレッシャービルドアップテストが発電所の定期点検時に組織的に行われるようになった。

a. 水位の経時変化

T-22、T-23両井における水位の経時変化を図21に示す。T-22井の水位は、深度約300mにおける圧力変化に対応しているが、昭和53年に実施したBRIGHAM and MORROW (1977) のモデルを模したタンクモデルによるヒストリーマッチング解析により、貯留層圧力の変化によく対応していると考えられている（日本重化学工

業、未公表資料）。このタンクモデルによる解析は、昭和53年から昭和63年までの水位変化を的確に予測している。当地域の貯留層は、図22の温度分布からみて深さ約300m以深に熱水の対流が存在していると考えられるが、T-22井の観測している深度はこの対流の頂部にあたると考えられる。このため、T-22井は貯留層内の圧力変化によく対応しているものと考えられる。図21より、ここ数年のT-22井の水位低下は約1.8m/yearであり、貯留層圧力の低下は、 $0.2\text{kg/cm}^2/\text{year}$ に満たない程度の小さなものであると言える。

松川地熱発電所のような蒸気卓越型の地熱貯留層における蒸気生産のメカニズムは、通常多くみられる熱水型とは大きく異なると考えられている。すなわち、蒸気卓越型の貯留層内では流路となるフラクチャー内を蒸気の

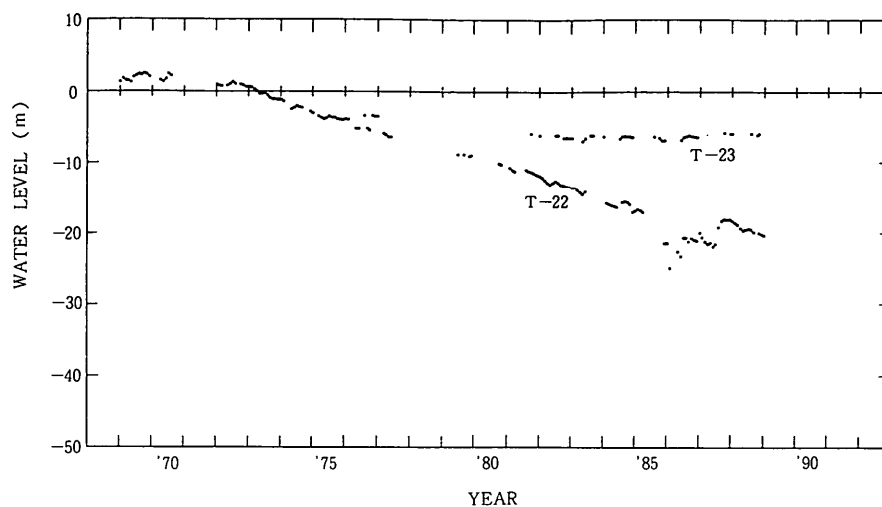
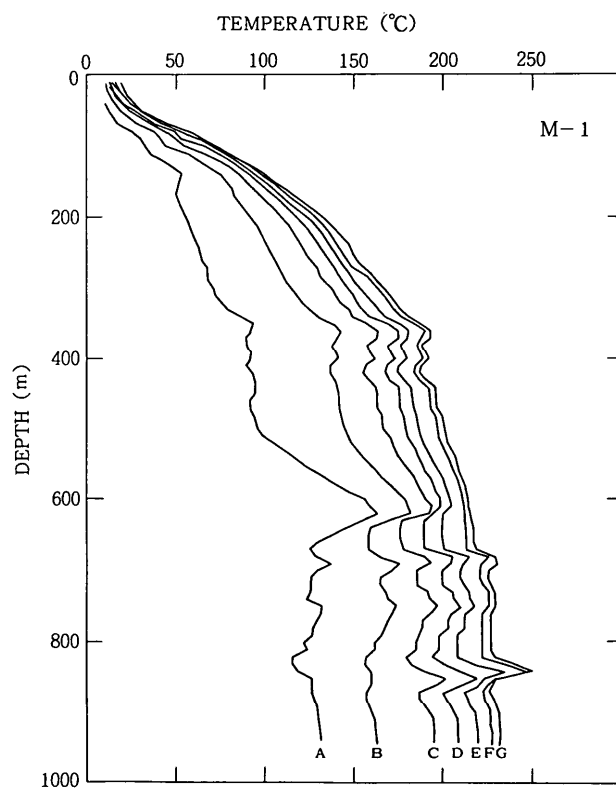


図21 松川地域水位観測記録



RUN	DATE	STANDING TIME (hrs)	WATER LEVEL(m)
A	Jan. 5, 1964	8	147
B	Jan. 6, 1964	26.5	110
C	Jan. 7, 1964	39.2	95
D	Jan. 8, 1964	73.2	91
E	Jan. 9, 1964	107	85
F	Jan. 11, 1964	147	77
G	Jan. 12, 1964	167	75

図22(a) M-1 井の温度回復検層結果 (高木・田中, 1968)

みが流動し、熱水は岩石中であってほとんど流動しない。一方、蒸気の生産に伴い岩石中の熱水は蒸発し、蒸気を供給する (TRUESDALL and WHITE, 1973)。このため貯留層内における変化は、マクロ的にみると水飽和率が低下する形で進行し、貯留層内が過熱状態に近づくまでは二相状態の持つ高い圧縮性のため圧力の低下は顕著にはならない (BRIGHAM and MORROW, 1977)。二相状態の持つ高い圧縮性については、例えば GRANT *et al.* (1982, p. 50) に述べられている。

T-22井の水位低下が図21のように緩やかであるのは、主としてここに述べた二相状態の持つ高い圧縮性による

ものと考えられる。T-23井の水位低下がほとんどない (図21) のは、T-23井が生産井から離れていることと、図3にみられる貫入岩体がしゃへいの働きをしているためであろう。このような水理構造的なしゃへいは、WHITE *et al.* (1971) も述べているように、蒸気卓越型地熱貯留層にとっては側方からの流体の流入を制限するために重要である。

このように、当地域における水位の低下はまだ緩やかであり、この傾向は当分の間続くものと考えられている。

b. 貯留層圧力の分布

蒸気卓越型の貯留層においては、貯留層の変化はマク

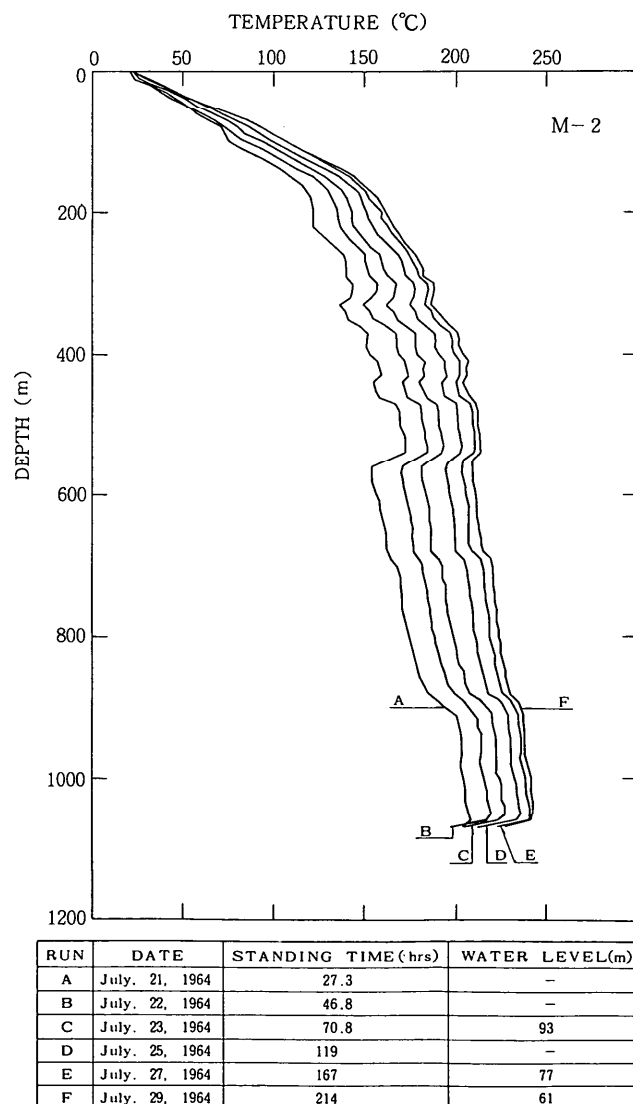


図22(b) M-2井の温度回復検層結果 (高木・田中, 1968)

口的にみると水飽和率が低下する形で進行し圧力の低下は過熱状態に近づくまでは緩やかである。しかし、ミクロ的にみれば蒸気生産量の多い場所と少ない場所とでは差が現れてくる。この現象はラルデレロやザ・ガイザースでは非常によく捉えられており、蒸気生産の集中する地域を中心として圧力が経時的に低下する様子が明らかにされている (CELATI *et al.*, 1977; LIPMAN *et al.*, 1978)。これらの調査は、使用できなくなった生産井を観測井として転用し、その静止密閉坑口圧の連続観測や、生産井の密閉坑口圧力上昇を観測するプレッシャービルドアップテストにより行われている。

松川地熱発電所ではここに述べたような形での圧力分布の調査は従来行われていなかった。しかし、最近になって生産井の密閉坑口圧力上昇を測定するプレッシャービルドアップテストが組織的に行われるようになり興味深い結果が得られている。その結果の一部については、HANANO *et al.* (1988), HANANO and SAKAGAWA (1989) により報告されているが、概要を示せば次のようになる。

1) 当地域の貯留層圧力 (密閉圧力) は地域の南西側において高く、南西から北東に向かう急激な圧力勾配が存在する。この圧力勾配は、当地域の主生産層内におい

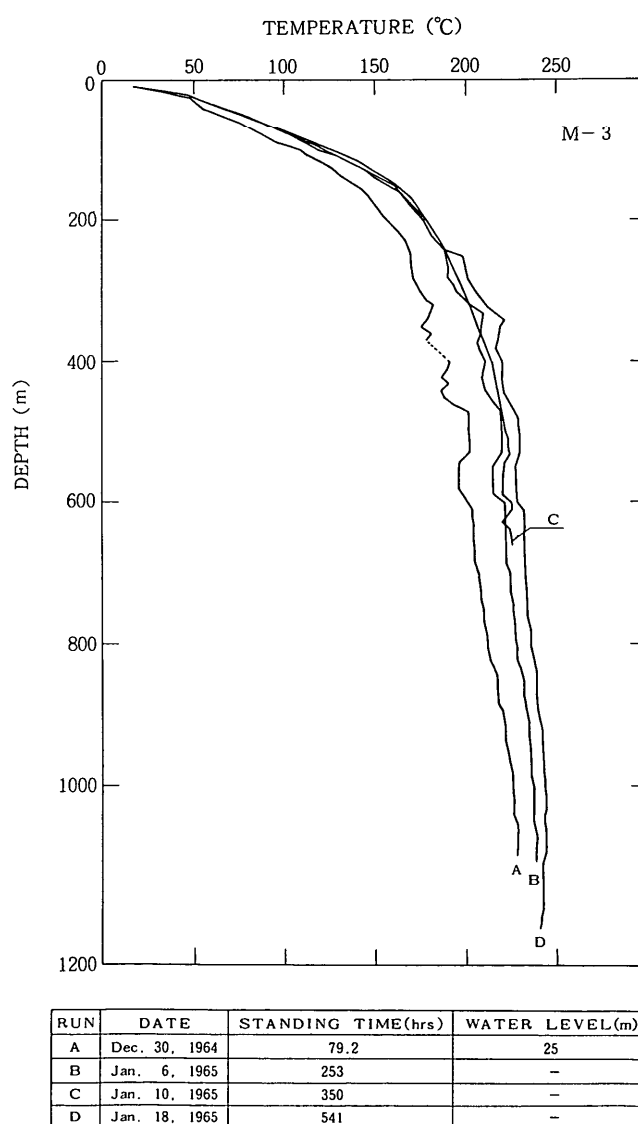


図22(c) M-3井の温度回復検層結果 (高木・田中, 1968)

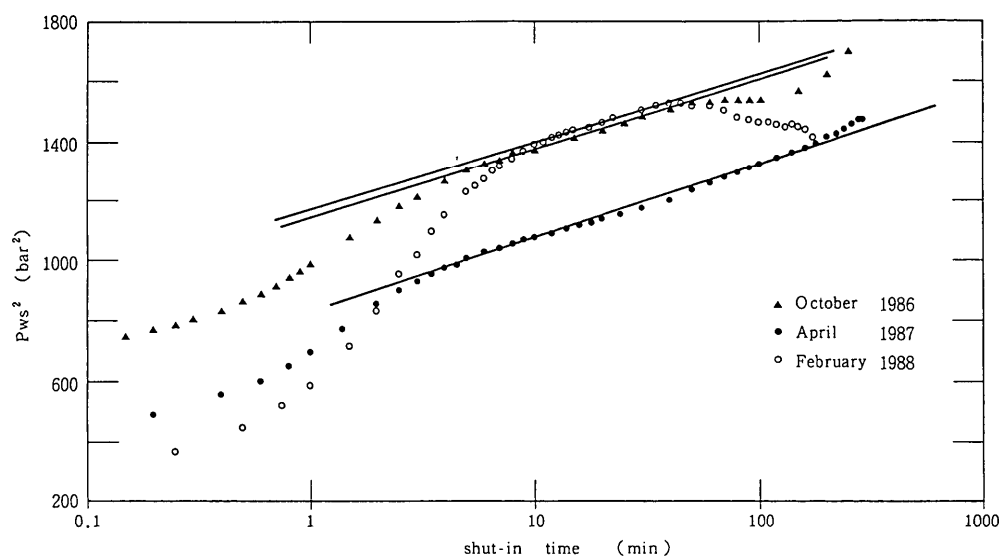


図23 M-7井の圧力ビルドアップ挙動の Miller-Dyes-Hutchinson プロット (HANANO *et al.*, 1988)

て南西から北東に向かって蒸気が流動していることをあらわしている。このため、当地域において現在生産されている蒸気のほとんどは、地域の南西より供給されていると考えられる。

2) 当地域における蒸気の生産は地域の南西側において多い。このため、ここで得られた圧力分布は、ラルデレロやザ・ガイザースとは異なり、開発地域の外側からの蒸気の供給に強く影響されている。すなわち、蒸気の供給の多い南西側において圧力は高くまた生産量も多くかつその減衰も少ない(図11~20参照)。一方、蒸気の供給の少ないと考えられる、特に地域の北東側では、圧力は低くまた生産量も少なくかつその減衰も多い(図11~20参照)。このため、当地域の貯留層は現在開発している地域の南西方向に広がっている可能性がある。

3) ビルドアップテスト時における圧力上昇の挙動は、M-7井のように明瞭な片対数直線が得られるもの(図23)とそうでないものがある。片対数直線が得られない坑井の中には、坑井周囲のフラクチャーに流動が強く規制され、放射状流ではなく直線状流が卓越していると考えられるものもある(HANANO and SAKAGAWA, 1989)。また、図23ではM-7井のビルドアップの結果は $1,600 \text{ ata}^2$ ($1,536 \text{ bar}^2$)の付近から片対数直線を離れる。これは、蒸気型坑井のビルドアップ挙動に特有の現象であり、坑井内またはその近傍における蒸気の凝縮の影響であると考えられている(STROBEL, 1976)。

このように、当地域における現在の圧力分布は、ラルデレロやザ・ガイザースとはかなり異なった特徴を示し

ている。松川地熱発電所における最も新しいビルドアップテストは昭和63年10月に実施された。その時得られた最大密閉圧力の分布を図24に示す。この図から、上に述べた南西から北東に向かう圧力勾配の存在をはっきりと読み取ることができる。なお、この図では、蒸気の密度は微小であるので、流入点の標高の違いに伴う圧力の補正は実施していない。

WHITE *et al.* (1971)も述べているように、水理構造的なしゃへいは、蒸気卓越型地熱貯留層にとっては側方からの流体の流入を制限するために重要である。坑井地質調査などにより、当地域の西側、北側は貫入岩体により明瞭にしゃへいされていることが明らかになっているが(図3)、それ以外の方向におけるしゃへい構造は従来必ずしも明確になっていなかった。今回のビルドアップテスト結果によれば、当地域の北側並びに東側の圧力は南西側に比べかなり低い値であることが明らかになった(図24)。これらの圧力は、主生産層の深度(約800 mから1,300 m)に対応する静水柱圧力(約 70 kg/cm^2 から 120 kg/cm^2)に比べ、遥かに低い値である。このことから、当地域の東側も水理構造的にみてしゃへいされていることは明らかである。このしゃへいは、必ずしも貫入岩体や壁状の変質帯である必要はなく、PRUESS (1985)も指摘しているように、マイクロフラクチャーが発達していないかまたはそれらが充填されている、浸透率が 10^{-17} m^2 程度の岩石マトリクスであれば十分その役目を果たし得るものと考えられる。この程度の浸透率は、コアの新鮮な部分を試験した場合容易に得ることができる。

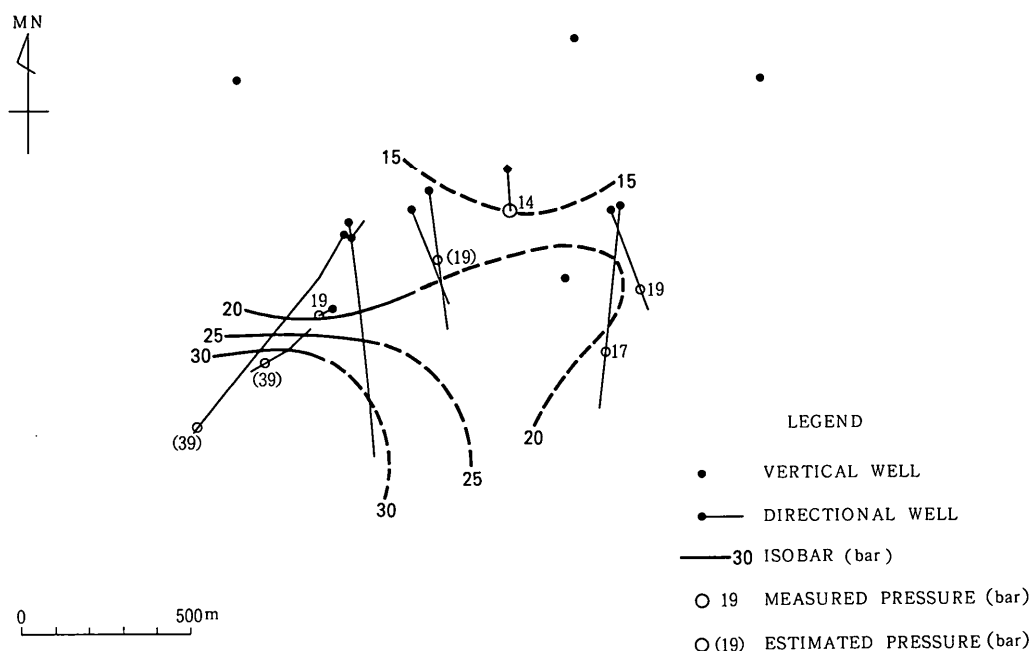


図24 昭和63年10月における松川地域の主生産層内の圧力分布

このように、松川地域の圧力分布は生産量の多い南西側の地域で高いという他の蒸気卓越型の地域とは全く異なる特徴を持っている。また、地域の南西側に位置し、最も生産量の多いM-7井の蒸気生産量の低下は18年間の平均で年約1t/h以下と非常に少ない(図16)。これらのことは、当地域の貯留層の蒸気供給能力が現在の出力を維持するためにまだ十分な余力を持っていることを示している。これらの結果から、必要な蒸気量を維持するための追加井を掘削する場合の、ターゲットを検討する問題に対して多くの手がかりが得られる。このように、蒸気卓越型地熱地域における圧力分布の調査から、蒸気の生産を継続するうえで重要な情報を得ることができる。

(2) 化学的挙動

蒸気卓越型の地域においては物理的な調査のみならず化学的な調査も重要である。ラルデレロなどでは古くからのデータが蓄積されており、D'AMORE and TRUESDELL (1979) などの優れた研究がある。松川においても多くの化学的調査が行われており、岩崎(1967)、宮守(1968)、YOSHIDA (1984) などにより報告されている。ここでは、YOSHIDA and ISHIZAKI (1988) に基づきその概要を述べる。

1) 松川の生産井は、現在噴出している蒸気の化学性状から、地域の東側に位置するM-1b, N3,9井と、その他の坑井の2グループに分類される。すなわち、M-1b, N3,9井はTotal Gasが多く、他の坑井では少な

い。また、M-1b, N3,9井は他の坑井に比べ、 CO_2 , NH_3 が多く、 H_3BO_3 が少ない(表5)。この傾向は、D'AMORE and TRUESDELL (1979) のラテラルフローモデルによれば、大局的にみて南西から北東に向かって蒸気が流動していることを示しており、先に述べた圧力分布の結果とよく調和する。しかし、これは、当地域の南西側以外に蒸気供給源がないことを意味するわけではなく、南西側以外の蒸気供給源の蒸気供給能力が南西側に比べかなり低いものであることを意味していると考えられる。D'AMORE and TRUESDELL (1979) のラテラルフローモデルは開発前の貯留層内に存在する自然流動について述べたものであるが、開発以後に生じた流動にも適用できる(HANANO and SAKAGAWA, 1989)。

2) ガス成分間の相対的關係は、M-1b, N3,9井では相対的に CO_2 が多く、 H_2S が少ない。逆に、他の坑井では、 CO_2 が少なく、 H_2S が多い。また、 NH_3 や H_3BO_3 についても逆の違いがみられる。すなわち、M-1b, N3,9井は、 NH_3 が30ppm以上と多く、 H_3BO_3 が6ppm以下と少ない。しかし、他の坑井は、 NH_3 が10ppm以下と少なく、 H_3BO_3 が10ppm以上と多い。

3) 生産される蒸気はOxygen shift*しており、地

* Oxygen Shift: 水を構成する酸素と、まわりの岩石中のケイ酸塩鉱物あるいは炭酸塩鉱物中の酸素とが同位体交換反応を起こすことによって、水の酸素同位体組成が元の値よりも重くなること。

表5 松川地域における噴出蒸気の化学組成 (YOSHIDA and ISHIZAKI, 1988)

Gas concentration in steam (by volume)											
Well	Date	Total gas %	H ₂ S ppm	CO ₂ ppm	H ₂ ppm	N ₂ ppm	CH ₄ ppm	Ar ppb	He ppb	NH ₃ ppm	H ₃ BO ₃ ppm
M-1b	4/16, 1988	1.01	495	9290	19.0	184	109	1760	38.8	4.5	0.6
M-2	3/17, 1988	0.32	435	2660	46.9	36.9	21.3	463	5.28	10.0	19.3
M-N3	3/17, 1988	0.96	701	8700	68.5	80.9	51.5	681	16.1	35.0	5.1
M-5	4/16, 1988	0.24	358	1950	33.8	39.1	20.3	455	5.52	2.5	5.7
M-6	4/16, 1988	0.38	543	3140	39.4	54.9	22.8	665	10.2	6.6	22.2
M-7	4/16, 1988	0.19	382	1430	39.6	29.6	16.0	344	5.64	5.9	32.2
M-8	4/16, 1988	0.43	688	3500	32.3	49.7	29.3	556	9.39	7.0	12.7
M-9	3/17, 1988	1.13	644	10500	103	53.6	46.4	589	7.12	30.2	5.6
M-10	4/16, 1988	1.11	2230	8760	24.1	61.8	24.1	940	6.66	1.2	0.1
M-11	3/5, 1988	0.24	415	1880	49.9	43.2	14.3	566	5.29	5.1	25.8

Total gas : Gases other than water vapor.

表水起源と考えられる。また、トリチウム並びに炭素同位体から、M-1b, N3, 9井により多くの新しい地表水起源の蒸気が混入しているのではないかと考えられる。

4) He/Ar 比と N₂/Ar 比の関係から、M-1b, N3, 9井で火山ガスの影響が大きい。しかし、火山ガスの影響が大きいことは必ずしも火山ガスの供給が多いことを意味しておらず、生産される蒸気を形成する、古い地表水起源の蒸気と火山ガスの混合において、火山ガスの割合が多いことによると考えられる。

5) 松川地熱発電所において生産されている蒸気は、火山ガス、古い地表水起源の蒸気、比較的新しい地表水起源の蒸気の3種類の混合で形成されている。これらの混合は、図24に示された生産層内の圧力のバランスに規制されている。すなわち、蒸気的主要な供給源に近い南西側の坑井では古い地表水起源の蒸気が多くまた圧力も高い。このため、火山ガスと比較的新しい地表水起源の蒸気は少ない。ところが、蒸気的主要な供給源から離れているM-1b, N3, 9井では、古い地表水起源の蒸気の供給は少なくこのため圧力も低い。そのため、火山ガスの影響が大きくなり、また、比較的新しい地表水起源の蒸気が引き込まれている。

このように、松川地域における蒸気の化学性状は貯留層の物理的挙動と密接な関係がある。従って、貯留層の物理・化学的挙動を継続的に調査することは貯留層管理を行う上で非常に重要である。

4. 発電所運転管理上の問題点とその対策

現在松川地熱発電所では、22MWの発電が順調に継続されている。しかし、発電を継続する上での問題点は少なくない。このため、発電が順調に行われている間に

その対策を講じる必要がある。ここでは、運転管理上問題になっている点について、その概要と対策を述べる。

(1) 蒸気の過熱化

松川地域において生産されている蒸気は、開発当初は熱水混じりの湿り蒸気である坑井も多かったが、現在は一部の坑井を除き過熱状態の乾き蒸気である。しかし、近年、特に地域の北東側に位置する坑井においてこの蒸気の過熱が進んでいる(図11~20)。このため、貯留層の維持管理並びにタービンへのスケール付着に与える影響を考慮しなければならなくなってきた。この対策としては、地上配管中に清水を噴霧する方法も試験中であるが、原因が貯留層内が過熱化したことにあるため、根本的な解決にはならない。

ラルデレロやザ・ガイザースにおいても同様な問題が発生している。このため、ラルデレロやザ・ガイザースでは、貯留層内の岩石に残された熱の二次的な回収と蒸気生産量や貯留層圧力の維持を目的として、発電所で発生する凝縮水の地下還元が行われている(例えば CHASTEEN, 1975; BERTRAMI *et al.*, 1985)。この凝縮水の還元は、蒸気生産量の減衰を緩和するのに役立っており、ザ・ガイザースでは、それまで約18%であった蒸気の年減衰率が、還元開始以後は約6%に改善された場所もあるとのことである(UNOCAL 社、私信)。また、ラルデレロでは、天然に存在する安定同位体を用いたトレーサーテストにより、還元された水の85%以上が蒸気として回収されていることが明らかになっている(BERTRAMI *et al.*, 1985)。この還元に伴う蒸気発生メカニズムは、CALORE *et al.* (1986)によるシミュレーション解析により明らかにされている。

この還元が成功するかどうかには、還元が行われる場

所の貯留層特性が重要であり、必ずしもすべての場所で成功するわけではない。一般にいわれている成功のための条件は、1) 貯留層内が十分過熱していること、2) 還元水が深部まで降下して蒸発するための割れ目が発達していること、であり、望ましい還元井としての条件は、3) フィードポイントが生産深度より深いこと、4) 生産井から可能な限り遠いことである (CHASTEEN, 1975; BERTRAMI *et al.*, 1985; CALORE *et al.*, 1986)。還元が生産層と同じかまたは浅い場所に行われた場合で、還元水が深部へ降下せずそのまま水平に流動する場合は、十分な蒸発が期待できず、還元水がそのまま噴出することになりかねない。このような場合、噴出する還元水は、蒸気中に含まれる硫化水素のため SO_4 型の酸性熱水ともなりかねず、運転管理上重大な問題になりかねない。

還元された水の挙動を把握することは熱水卓越型貯留層の場合同様きわめて重要である。そのため、熱水卓越型の場合同様トレーサートテストが行われるが、蒸気卓越型の場合は熱水卓越型とは異なり人為的にトレーサートを注入することはあまり行われず、還元水に含まれる天然の安定同位体が用いられることが多い (NUTI *et al.*, 1981; D' AMORE *et al.*, 1987)。この理由の1つは、人為的なトレーサーとして必要な条件が、1) 貯留岩に吸着しないこと、2) 水と同じ割合で蒸発すること、3) サンプルングが容易であること、4) 分析が安価であること、5) バックグラウンド値が十分低いかまたはゼロであること、であるが、これらの条件を比較的満足するものとしては、水を構成する水素の同位体であるトリチウム (^3H) またはジウテリウム (^2H) 以外に適当なものがないことである (GULATI *et al.*, 1978)。もう1つの理由は、トリチウムは放射性同位体であるため安全性に問題があり、ジウテリウムはトレーサーとして大量に用いるためには高価過ぎることである。なお、水を構成する酸素の同位体は、平均的な貯留層温度である 260°C 前後では蒸発時の同位体分別が大きいため解析精度が水素同位体より落ちる。

松川地熱発電所においても、貯留層の過熱化に対する根本的対策としてこの凝縮水の地下還元が計画されており、第2章に述べたようにMR-1井において実験が行われている。この実験は昭和63年3月より始まり、 10t/h から約 30t/h の凝縮水が還元された。現在、坑口における各種の物理・化学データを収集中である。また、還元水の流動と蒸発を解析するため、3次元ダブルポロシティグリッドモデルによるシミュレーション解析も同時に進められている。これらの結果についてはいずれ報告する機会があるものと考えている。

(2) 蒸気中のスケール成分の除去

松川地熱発電所では、昭和59年から昭和61年にかけて噴出する蒸気性状が変化したため、タービン羽根へのスケール付着量が増大し、タービン効率が大幅に低下した。

タービンスケール付着の主因は、M-5、M-10井のような湿り飽和蒸気と考えられていた。しかし、これら2坑井をラインから切り離した後においても、その影響は軽減されたものの、依然としてタービンへのスケール付着が進行した。

このような背景からタービンスケール付着による発電出力低下の問題を解決し、出力の安定化を図るためにスケール付着の要因である蒸気中のスケール成分除去対策を早急に行う必要が生じた。

X線回折分析の結果、タービンに付着するスケールは主として石英 (SiO_2)、クリストバライト (SiO_2)、亜硫酸カリウム ($\text{K}_2\text{SO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、ゾモルノカイト ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、黄鉄鉱 (FeS_2)、フォントフォファイト ($\text{NaMg}(\text{SO}_4)_2$)、硼酸 (H_3BO_3) から構成されていることが判明した。

スケール要因物質の形態には、ミスト状 (主に熱水起源のスケール成分で、ミスト中に非溶解成分も含む) とダスト状 (主に岩石起源のスケール成分と熱水起源のものが結晶析出したスケール成分) の2形態が存在することが判明し、特に、ダスト状のスケール成分の除去対策が問題となった。

実機システムを計画する前段に、各種セパレータの除去性能の調査を行い、小規模、中規模の2段階のテストを実施し、さらに、それらを組み合わせて除去性能を調査した。

その結果、ダスト状のスケール成分除去システムとして、乾式 (ミストセパレータ単独方式) 及び注水方式 (ベンチュリースクラバー) だけでは出口蒸気性状が不安定であり、システムとしての採用は難しいことが確認された。

従って、スケール成分除去システムには、加湿器 (ベンチュリー注水)、スプレー塔、高流速遠心型ミストセパレータの組み合わせを採用した (図10参照)。

また、この方式を実施する以前には、各坑井の分離器の前段に水をスプレーして、坑井元の分離器においてスケールの一部を除去するとともに、タービン入口にて微量の水をスプレーし、タービンに付着したスケールを剥離させる方式も実施している。

(3) タービンの保守管理

地熱発電は、地下から取り出した地熱蒸気を直接タービンに流入させて発電するため、タービン内部の各所は腐蝕性物質を含む湿り蒸気に曝されている。さらに地下

から噴出してくる蒸気には、表5に示されているように0.2~1.1VOL%のガスや微粉等が混入している。

このように地熱タービンは、通常の火力タービンに比べ、腐蝕、浸食が発生しやすい、また、タービンにスケールが付着する割合が高い。さらに、松川発電所のように蒸気卓越型地熱貯留層の蒸気は、タービンにとって腐蝕、浸食が発生しやすい過酷な条件となっている。

そのため、運転開始初期は、タービンの羽根に問題が多く発生した。昭和42年には、蒸気生産井からセパレータで除去できないほどの多量の微粉が一時的に噴出しタービンの湿り領域の第3段から第4段に泥状になって付着し、タービン羽根の切損事故に至った。対策として、蒸気生産井よりサンプリングして凝縮水を作り、その透過度を計測して微粉噴出をチェックしている。微粉噴出を認めた場合は直ちにその蒸気生産井をラインから切り離し、微粉の噴出停止を待って再びラインに合流させているが、近年、このようなケースは発生していない。

その後、昭和42年から43年にかけて、羽根、シュラウド、テノンの切損事故が発生した。これらの原因は、いずれも地熱雰囲気中での羽根材料の耐久限の低下、NPF（ノズルからの励振周波数）との微小な共振及び孔食による切欠感受性の鋭敏化によるものであった。

この対策として、羽根の肉厚を増して強度を一般火力タービンの約2倍に引き上げ、極力、NPFとの共振を避けた羽根とし、シュラウドはシャープな形状を避けたものに変えた。

この結果、羽根の切損事故は十年以上にわたって発生していなかったが、昭和62年、タービンロータ第3段羽根の切損事故が再び発生した。この原因は、SCC（応力腐蝕割れ）により初期亀裂が発生したため、その亀裂が運転中の羽根振動応力の繰り返しにより徐々に進展し、遠心応力によって破断したものと推定された。先行補修として羽根の新製交換を施行し、今後のSCCの発生予防を行っている。

5. あとがき

松川地熱発電所は昭和41年以来22年以上にわたり順調に運転が継続されてきた。しかし、その間全く問題が発生しなかったわけではなく、主として地上設備や発電設備に関する問題がいくつか発生した。22年間の運転は、それらの問題を克服した結果である。

当地域の貯留層は、その圧力分布の特徴などからみて現在の出力を維持するためにまだ十分な余力を持っていると考えられている。しかし、近年、生産される蒸気の過熱が進むといった貯留層に関する問題が発生してきた。この問題に対しては、ここで述べたように凝縮水の

地下還元などによりその影響が深刻にならない間に対処する予定である。また、将来において発生する貯留層管理上の問題に対しても、坑井や貯留層の物理・化学的モニタリングなどを通しその原因を追求し、適切に対処して行きたいと考えている。

謝 辞

松川地域における地熱開発ならびに発電の継続は、多くの先輩諸兄の長年の努力の結果である。また、水位観測や蒸気化学性状の調査などのモニタリングも多くの先輩諸兄により継続されてきたものである。特に、基礎調査から開発においてご指導いただいた工業技術院地質調査所及び関係諸官庁をはじめ、実際に作業に携わった各業界の方々に深く感謝するとともに、日本重化学工業(株)の先輩諸兄の努力に対し深く敬意を表するものである。日本重化学工業(株)地熱事業部盛岡工業所松川発電所の方々には日頃の調査においていろいろと便宜を計っていただいている。小文をまとめるにあたり、日本重化学工業(株)地熱事業部盛岡工業所探査部吉田裕、村松容一課長はじめ多くの同僚諸兄に討論いただいた。また、日本重化学工業(株)地熱事業部盛岡工業所松尾岑一郎次長には粗稿を読んでいただいた。これらの方々に厚くお礼申し上げる。

文 献

- 赤沢司史・村松容一(1988): 松川地熱地帯における地下フラクチャー分布. 日本地熱学会誌, Vol. 10, No. 4, p. 359-371.
- BABA, K., TAKAKI, S., MATSUO, G., and KATAGIRI, K., (1970): A Study of the Reservoir at the Matsukawa Geothermal Field. *Geothermics, Special Issue 2*, Vol. 2, Part 2, p. 1440-1447.
- BERTRAMI, R., CALORE, C., CAPPETTI, G., CELATI, R., and D' AMORE, F., (1985): A Three-Year Recharge Test by Reinjection in the Central Area of Larderello Field: Analysis of Production Data. *GRC, Transactions*, Vol. 9, Part 2, p. 293-298.
- BRIGHAM, W. E., and MORROW, C. B., (1977): P/Z Behavior for Geothermal Steam Reservoirs. *Soc. Pet. Eng. J.*, Vol. 17, No. 5, p. 407-412.
- CALORE, C., PRUESS, K., and CELATI, R., (1986): Modeling Studies of Cold Water Injection into Fluid-Depleted, Vapor-Dominated Geothermal Reservoir. *Proc., Eleventh Workshop on Geotherm. Res. Eng.*, Stanford U., p. 161-168.
- CELATI, R., SQUARCI, P., STEFANI, G. C., and

- TAFFI, L., (1977): Study of Water Levels in Larderello Region Geothermal Wells for Reconstruction of Reservoir Pressure Trend. *Geothermics*, Vol. 6, No. 3-4, p. 183-198.
- CHASTEEN, A. J., (1975): Geothermal Steam Condensate Reinjection. *Proc., Second U. N. Sympo. on the Develop. and Use of Geotherm. Resour.*, Vol. 3, p. 1335-1336.
- D' AMORE, F., and TRUESDELL, A. H., (1979): Models for Steam Chemistry at Larderello and The Geysers. *Proc., Fifth Workshop on Geotherm. Res. Eng.*, Stanford U., p. 262-276.
- D' AMORE, F., FANCELLI, R., and PANICHI, C., (1987): Stable Isotope Study of Reinjection Processes in the Larderello Geothermal Field. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 51, p. 857-867.
- GRANT, M. A., DONALDSON, I. G., and BIXLEY, P. F., (1982): Geothermal Reservoir Engineering, Academic Press, pp. 369.
- GULATI, M. S., LIPMAN, S. C., and STROBEL, C. J., (1978): Tritium Tracer Survey at The Geysers. *GRC, Transactions*, Vol. 2, p. 237-239.
- HANANO, M., SAKAGAWA, Y., and SAIDA, T., (1988): Three Pressure Build-Up Behaviors of M-7, A Dry Steam Well in Matsukawa, Japan. *Extended Abstract, Int. Sympo. Geotherm. Energy, Kumamoto and Beppu*, p. 579-582.
- HANANO, M., and SAKAGAWA, Y., (1989): Lateral Steam Flow Revealed by a Pressure Build-Up Test at the Matsukawa Vapor Dominated Geothermal Field. *Geothermics*, Vol. 18, No. 6, in press.
- 早川正巳 (1967): 松川地熱地帯における物理探査. 地熱, Ser. No. 10, p. 35-51.
- 井出俊夫 (1985): 松川および葛根田の地熱系モデル. 日本地熱学会誌, Vol. 7, No. 3, p. 201-213.
- 岩崎岩次 (1967): 松川地熱地域の噴出蒸気. 地熱, Ser. No. 12, p. 38-46.
- 片桐邦雄 (1969): 松川の地熱包蔵量について. 地熱, Ser. No. 22, p. 13-16.
- LIPMAN, S. C., STROBEL, C. J., and GULATI, M. S., (1978): Reservoir Performance of The Geysers Field. *Geothermics*, Vol. 7, No. 2-4, p. 209-220.
- 宮守孝全 (1968): 松川地熱地域の噴出蒸気・熱水の化学的特性. 地熱, Ser. No. 16, p. 15-24.
- 森芳太郎 (1967): 松川地熱地域開発上の問題点. 地熱, Ser. No. 10, p. 52-64.
- 中村久由 (1967): 松川地熱地域の地下構造. 地熱, Ser. No. 10, p. 13-34.
- 中村進 (1966): 松川地熱発電の現状. 地熱, Ser. No. 6, p. 38-40.
- 七沢正敏 (1987): 松川発電所創業20周年を迎えて. 地熱, Vol. 24, No. 1 (Ser. No. 96), p. 21-29.
- NUTI, S., CALORE, C., and NOTO, P., (1981): Use of Enviromental Isotopes as Natural Tracers in a Reinjection Experiment at Larderello. *Proc., Seventh Workshop on Geotherm. Res. Eng.*, Stanford U., p. 85-89.
- 大西幸作・多胡武雄・兵頭教正 (1981): 松川発電所の長時間運転実績と信頼性. 火力原子力発電, Vol. 32, No. 7, p. 665-673.
- PRUESS, K., (1985): A Quantitative Model of Vapor Dominated Geothermal Reservoirs as Heat Pipes in Fractured Porous Rock. *GRC, Transactions*, Vol. 9, Part 2, p. 353-362.
- STROBEL, C. J., (1976): Field Case Studies of Pressure Buildup Behavior in Geysers Steam Wells. *Proc., Second Workshop on Geotherm. Res. Eng.*, Stanford U., p. 143-149.
- SUMI, K., (1968): Hydrothermal Rock Alteration of the Matsukawa Geothermal Area, Northeast Japan. *Geol. Surv. Jap.*, Rept. 225, pp. 42.
- 高木慎一郎・田中信一 (1968): 松川地熱坑井の電気検層 (第1報). 地質調査所月報, Vol. 19, No. 8, p. 507-518.
- TRUESDELL, A. H., and WHITE, D. E., (1973): Production of Superheated Steam from Vapor-Dominated Geothermal Steam Reservoirs. *Geothermics*, Vol. 2, No. 3-4, p. 154-173.
- WHITE, D. E., MUFFLER, L. J. P., and TRUESDELL, A. H., (1971): Vapor-Dominated Hydrothermal Systems Compared with Hot-Water Systems. *Econ. Geol.*, Vol. 66, No. 1, p. 75-97.
- YOSHIDA, Y., (1984): Origin of Gases and Chemical Equilibrium among Them in Steams from Matsukawa Geothermal Area, Northeast Japan. *Geochem. J.*, Vol. 18, p. 195-202.
- YOSHIDA, Y., and ISHIZAKI, H., (1988): Geochemical Model of the Matsukawa Geothermal Field. *Extended Abstract, Int. Sympo. Geotherm. Energy, Kumamoto and Beppu*, p. 128-131.