



—第 91 回渡辺賞受賞—  
日本初の商業規模地熱発電の開発成功  
(松川地熱発電所)\*

花野 峰 行<sup>1</sup>

Success of the First Commercial Scale Geothermal Power  
Development in Japan; Matsukawa Geothermal Power Station

by Mineyuki HANANO<sup>a</sup>

a. Japan Metals & Chemicals, Co., Ltd. (Corresponding author, E-mail: hananom@jmc.co.jp)

The Matsukawa geothermal power station has been in commercial operation since 1966. Its geothermal reservoir was discovered by chance, by drilling of hot spring wells by the local administration in 1952. Japan Metals & Chemicals (JMC) noticed this phenomenon and started exploration for a geothermal power development in 1956. Then, JMC and Geological Survey of Japan (GSJ) started collaborative study in 1958.

The biggest technical challenge for success in Matsukawa was a decision of drilling target depth for steam production and a casing shoe depth to stop in-flow of shallow cold water. It was examined through measurements of water levels in three exploration wells, borehole temperature profiles and flow rates of rivers. Geological and geophysical studies by GSJ helped this study. Owing to this study, the 1<sup>st</sup> production well succeeded to produce dry steam in 1964 and led to a success in the first commercial scale geothermal power development in Japan.

**KEY WORDS:** Geothermal Power Generation, Geothermal Well, Geothermal Reservoir, Vapor-Dominated, Matsukawa

1. はじめに

松川地熱発電所は岩手県八幡平市<sup>†</sup>に位置する、日本では最初の商業規模地熱発電所である (Fig. 1)。1966 年の営業運転開始以来、現在まで順調に発電を継続している。このたび、この開発成功に関して、日本重化学工業株式会社と国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センターが伝統ある渡辺賞を受賞した。我が国初の地熱発電所が 50 年もの間運転を継続していることが評価されたものと思う。

松川地熱発電所の開発は、<sup>あずまかこう</sup>東化工株式会社 (現在の日本重化学工業株式会社の前身の一つ。以下、東化工と呼ぶ) が実施したが、工業技術院地質調査所 (現在の国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター。以下、地質調査所と呼ぶ) との共同研究が各種調査 (探査) や資源評価などの面で大きな支えとなった。当時の関係者の多くが鬼籍に入っていることもあり、当時の文献と資料<sup>1-6)</sup>に基づき、第三世代の目でこの開発の技術的ポイントを振り返ってみたい。

なお、松川地熱発電所は、2003 年に日本重化学工業株式会社から東北水力地熱株式会社 (現在は東北自然エネルギー株式会社) に営業譲渡されたため、ここでは営業譲渡以前のことに限らせて頂く。

2. 開発の経緯

2・1 開発の経緯

松川での開発の経緯を Table 1 に示す。松川での地熱資源の発

見は偶然であった。

松川には顕著な自然噴気はなく、30℃～40℃の温泉が 4 カ所あったのみである<sup>1,4)</sup>。当時の自治体である松尾村が、1952 年から温泉開発のための井戸を 7 本掘削した<sup>4)</sup>。これらのうち 3 本から、深度約 160m～300m で熱水混じりの蒸気が噴出した。このため、村は、当時、温泉・地熱に関して唯一の国立研究機関であった地質調査所に相談を持ちかけた。



Fig.1 Location of the Matsukawa Geothermal Power Station (Map from Google).

\*2017 年 5 月 15 日受付 2017 年 8 月 2 日受理  
2017 年 3 月 28 日 資源・素材学会 第 141 次定時社員総会にて発表  
1. 日本重化学工業株式会社 フェロー (地熱エネルギー担当)  
[ 著者連絡先 ] FAX: 03-3523-7279  
E-mail: hananom@jmc.co.jp

キーワード: 地熱発電, 地熱井, 地熱貯留層, 蒸気卓越型, 松川

<sup>†</sup> 開発当時は岩手郡松尾村

Table 1 Milestones in geothermal development at Matsukawa (modified from Hanano, 2003<sup>6</sup>).

年	出来事
1952	松尾村による温泉井掘削。温泉水ではなく蒸気が噴出
1956	東化工による地熱調査開始
1958 - 1966	東化工と地質調査所による共同研究
1960 - 1961	東化工による調査井掘削: AR-1, BR-1, BR-2
1963 - 1964	最初の生産井 (M-1) 掘削
1964	生産井M-2掘削
1964 - 1965	生産井M-3掘削
1965	生産井M-4掘削
1965 - 1966	発電所の建設
1966	松川地熱発電所営業運転開始 (認可出力9.5 MWe)
1967	認可出力12.5 MWe
1967 - 1968	生産井M-5掘削
1968	認可出力20 MWe
1968 - 1969	生産井M-6掘削
1970	生産井M-7掘削
1973	タービン、発電機等の改造により認可出力22MWe
1976 - 1977	生産井M-8掘削
1978	生産井M-9掘削
1983	生産井M-10掘削
1985 - 1986	生産井M-11掘削
1988	還元井MR-1掘削
1989 - 1990	生産井M-12掘削
1993	タービン更新、発電機等改造により認可出力23.5MWe
1996	生産井M-15掘削
1998	生産井M-13掘削
2000 - 2001	生産井M-14掘削
2003	東北水力地熱株式会社 (現、東北自然エネルギー株式会社) へ営業譲渡

(注) 東化工株式会社は1969年に合併により日本重化学工業株式会社となった

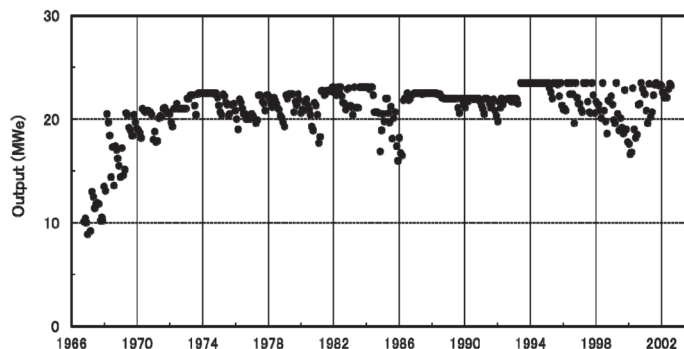


Fig.2 Electric power generation history of the Matsukawa geothermal power station<sup>6</sup>.

その頃、東化工は地熱発電のための適地に関して地質調査所に相談しており、この発見に着目した。東化工の本業は電気炉による合金鉄製造であり、電力を多く消費していた。このため自家用電力の開発に熱心で、既に富山県内に自家用の水力発電所を建設していた。地熱発電は、その一環として検討されていたのである。

東化工による地熱調査は1956年から開始され、1958年からは地質調査所との共同研究となった。当初は5MWの発電をめざしたが、1964年1月に噴気成功した生産1号井 (M-1) の蒸気量が発電出力では6MW相当であったため、計画は20MWに変更され、発電所の設計、建設が行われた。

松川における地熱発電は1966年10月8日に出力9.5MWで開始された。その後、生産井の増加により1967年4月に出力12.5MWとなり、1968年3月には当時の定格出力である20MW発電が達成され、プロジェクトは完成した。この翌年(1969年)、東化工は合併により日本重化学工業株式会社となった(以下、日重化と呼ぶ)。

その後、蒸気量が十分あったことからタービン、発電機等の改造により1973年4月に定格出力を22MWに増強した。1993年6月には老朽化したタービンの更新と発電機等の改造により定格出力を23.5MWに増強した。

松川における最大電力(実際の最大発電出力)の推移を Fig. 2

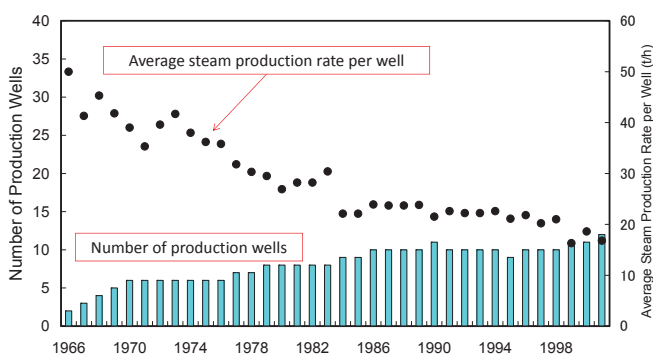


Fig.3 Number of production wells and average steam production rate per well in Matsukawa<sup>6</sup>.

に、生産に参加する生産井数と1生産井あたりの平均蒸気生産量の推移を Fig. 3 に示す。

Fig. 4 は発電出力20MW達成時(1968年)の坑井配置である。この時点では全て垂直井であった。Fig. 5 は2002年の坑井配置であるが、1970年に掘削されたM-7以降の追加井は全て傾斜掘削である。なお、M-7井は、我が国の地熱井では初の傾斜掘削である<sup>7)</sup>。

後年、当地域の地熱貯留層は地域の南西方向(松川の支流の一つである赤川の上流方向)に広がっていることがわかったが、地形の制約から南西方向の掘削には限界があるのが現状である<sup>6)</sup>。

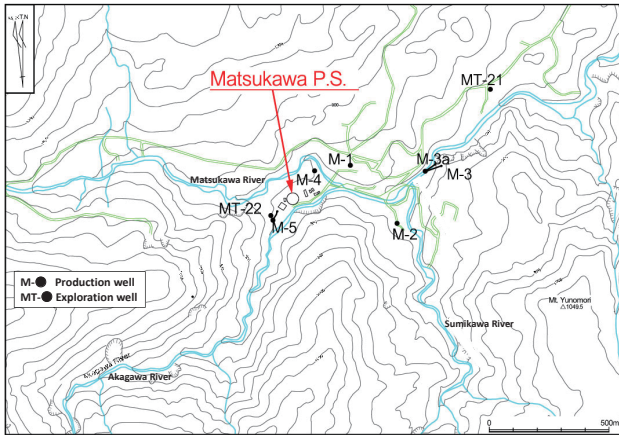


Fig.4 Location of wells in Matsukawa in 1968<sup>6)</sup>.

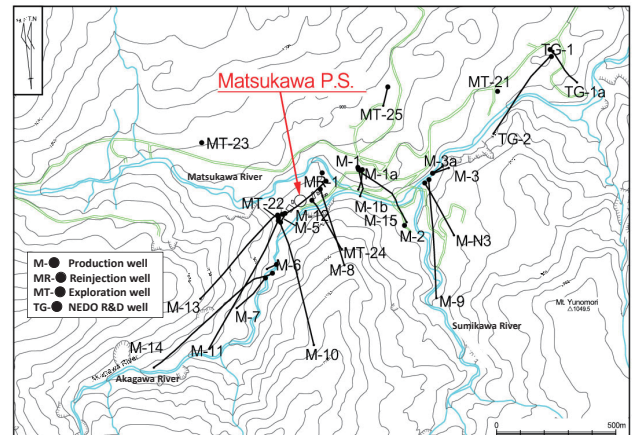


Fig.5 Location of wells in Matsukawa in 2002<sup>6)</sup>.

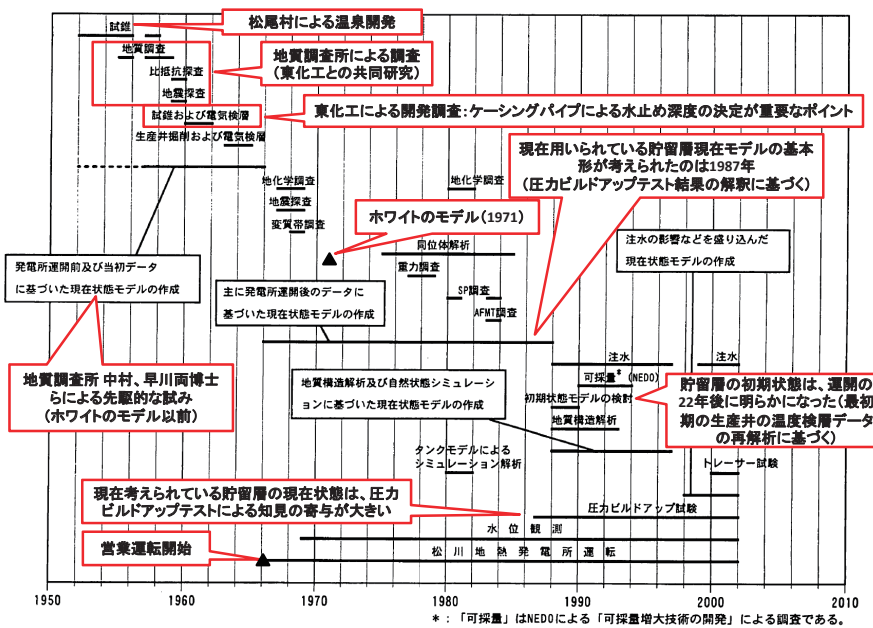


Fig.6 List of main surveys in Matsukawa (added to Ozeki et al., 2001<sup>8)</sup>).

2・2 調査の経緯

松川における調査の経緯を、発電開始後も含めて Fig. 6 に示す<sup>8)</sup>。開発初期における調査は、坑井による調査を東化工が、地質・変質調査、地形調査ならびに物理探査（電気探査、地震探査）を地質調査所が分担した。

当地域は、当初は、上倉山、中倉山、下倉山を外輪山とし、丸森を中央火口丘とするカルデラと考えられていた<sup>2)</sup> (Fig. 7)。松川の既存の温泉は、このカルデラ壁に沿って上昇していると考えられていたため、松尾村の温泉井は、そのカルデラ壁付近に掘削された。しかし、長年の調査の結果、カルデラも丸森火山も否定され、1980年代後半からは、丸森は巨大地滑りと考えられるようになった<sup>9)</sup>。余談だが、山岳地の地熱地帯は巨大地滑りを伴う場合が多く、現在では、広域探査における着目点の一つとなっている。

東化工による坑井調査は、当初は松尾村温泉井の改修・増掘から始まったが、本格的な調査井掘削は AR-1 からである。本井は 1960 年 8 月に噴気成功した。その後、BR-1、BR-2 が

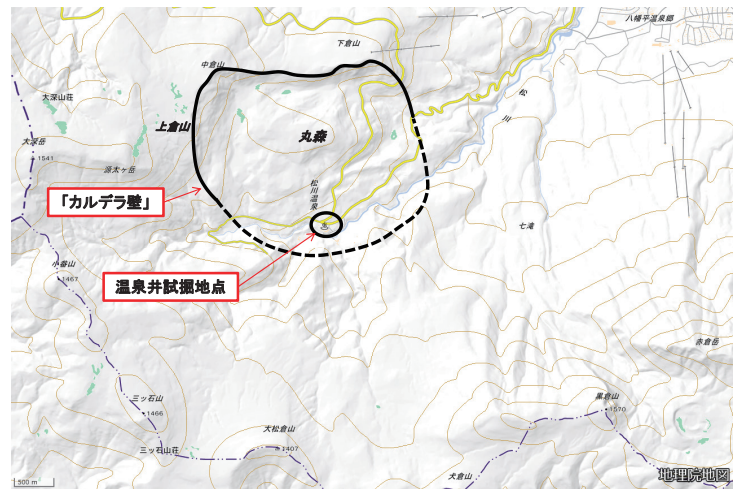


Fig.7 Locations of hot-spring wells and "caldera wall" (modified from Mori, 1967<sup>1)</sup>).

掘削された。後述するように、これらの調査井の結果から、生産井のターゲット深度（蒸気採取予定深度）、ケーシングパイプによ



Fig.8 Steam discharge from well M-1.

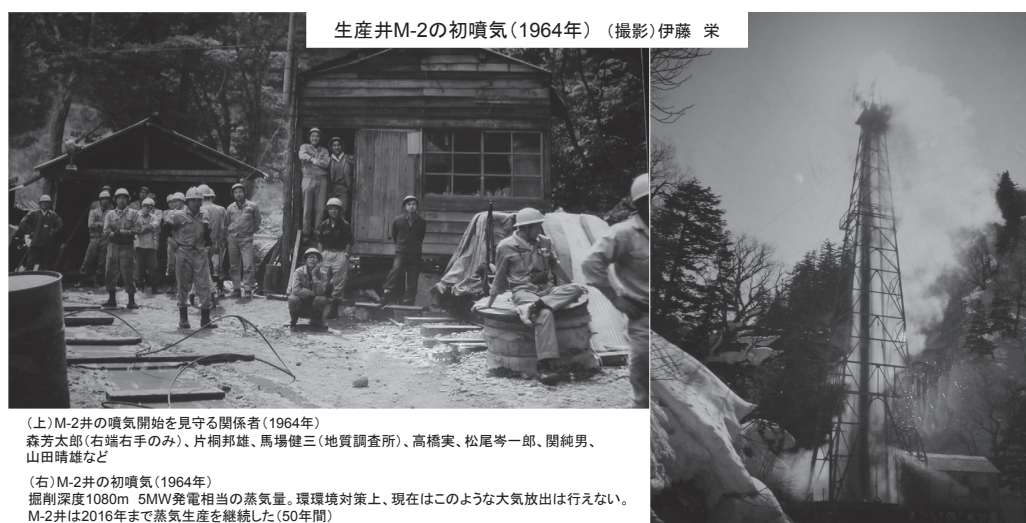


Fig.9 Initial discharge of well M-2.

る遮水深度が決められたが、これが本プロジェクト成功の重要な要因となった。

地質調査所による調査では、地質・変質帯調査<sup>10,11)</sup>も基本的理解に役立ったが、物理探査、特に電気探査の結果は、生産井のターゲット深度(蒸気採取予定深度)、ケーシングパイプによる遮水深度決定に重要な役割を果たした。これに関しては次章で述べる。

これらの結果に基づき1963年10月から生産井の掘削が開始された。最初の生産井であるM-1は1964年1月に噴気成功した。引き続き、M-2、M-3、M-4の掘削が行われたが、M-3は酸性ミスト噴出のため、埋坑の上掘り直しとなった(M-3a)。また、M-4は噴気成功時に生じたケーシングパイプ破損により坑内が崩壊したため、使用できなかった。このため、M-1、M-2の蒸気のみで営業運転が開始され、その後、掘り直されたM-3aと、新掘されたM-5の蒸気を投入することにより、定格出力である20MW発電が達成された。

Fig. 8は1964年頃のM-1の噴気状況であり、Fig. 9はM-2の噴気成功とそれを見守る関係者の姿である。この中には、東化工の現場責任者であった森芳太郎、掘削調査の責任者であった片桐邦雄などのほか、地質調査所の馬場健三博士の姿も見える。

松川の地熱資源の賦存状況や貯留層の状態に関しては、当初から種々の検討が行われたが、結局のところ、十分理解できていなかった。しかし、初期段階に取得された豊富なデータが残されていたことから、後年、関連する分野の技術の進展に伴って再解析が行われ、理解が進んだ。

例えば、貯留層の初期状態に関しては、開発当初は圧力検層の技術がなかったが、温度検層結果とその時点の坑内水位のデータが、センサーのキャリブレーション結果とともに保管されていたため、数値解析が可能になった段階で坑内圧力が復元可能となり、それが貯留層の初期状態の復元につながった<sup>12)</sup>。

それとほぼ同時期に導入された生産井の圧力ビルドアップ試験によって貯留層圧力分布の現在状態が明らかにされ、貯留層内の蒸気の流れと供給域が明らかになった<sup>13)</sup>。その結果、貯留層シミュレーション解析に必要な初期状態と現在状態の物理特性がそろい、定量的な解析が可能となった<sup>14)</sup>。松川の営業運転開始から二十年以上も後のことである。

初期段階のデータは後になってから取得することはできない。このようにして見ると、地質調査所との共同研究は、基礎データを重視して大切にす姿勢が現場の末端まで浸透したという点で

Table 2 Total depths and casing shoe depths of exploration wells.

調査井	掘削深度	遮水深度
AR-1	350m	150m
BR-1	425m	200m
BR-2	571m	330m

Table 3 Historical changes of names of production wells in Matsukawa.

	現在 <sup>i)</sup>	1960年代の呼称	
		英語 <sup>ii)</sup>	日本語 <sup>iii)</sup>
生産井の呼称	M-1	MR-1 <sup>iv)</sup>	1号井
	M-2	MR-2	2号井
	M-3	MR-3	3号井
	M-4	MR-4	4号井
	M-5	MR-5	5号井
本報告において関連する図表番号	Fig. 4, 5, 8, 9, 10, 20 Table 1	Fig.17, 19	Fig.10, 16, 20

- i) 1980年代に日重化により再整理された呼称
- ii) 地質調査所において多く用いられた呼称
- iii) 東化工、日重化において多く用いられた呼称
- iv) 1988年に掘削された還元井MR-1とは別 (Table 1, Fig.5参照)

大変な価値があったと言える。

### 3. 開発上のポイント

松川での地熱開発成功の技術上のポイントとしては、最初の生産井 M-1 掘削の際のターゲット深度とケーシングパイプによる遮水深度の決定が挙げられる。

調査井の掘削深度、遮水深度を Table 2 に示す。これらの調査井の掘削位置は、AR-1 が M-2 の地点、BR-1 と BR-2 は M-1 の地点である。Fig. 10 にこれらの位置と、蒸気噴出のあった松尾村温泉井 (T2, T3, T7) の位置を示す<sup>††</sup>。

通常のゼロからの地熱探査であれば、地熱資源存在の可能性の検討から始まり、有望ゾーンの絞り込み、掘削調査による資源確認 (噴気確認による貯留層の位置と蒸気・熱水化学性状の確認) に進むが、松川の場合、松尾村の温泉井が蒸気層を捉えていたため、資源と貯留層は確認済の状態から調査が始まった。

調査井 AR-1 は 1960 年 8 月に噴気成功したが、同年 12 月に噴気が自然停止した (Fig. 11)<sup>1)</sup>。同 BR-1 も 1960 年 10 月に噴気成功したが、同年 12 月に噴気は自然停止した。AR-1 は翌 1961 年

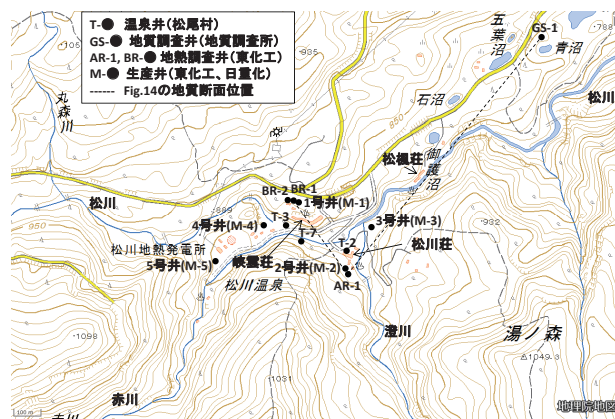


Fig.10 Location of exploration wells and hot-spring wells in early stage of exploration.

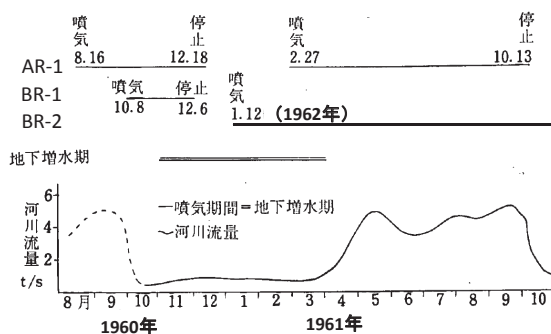


Fig.11 Test records of wells AR-1, BR-1 and BR-2<sup>1)</sup>.

2月に噴気を再開したが、同年 10 月には再度噴気が自然停止した。調査井の噴気が止まった後、毎日のように坑内水の汲み上げによる噴気再開が試みられたが、すぐに止まってしまった。このため、地熱開発は失敗に終わるのではないかと心配になったと、AR-1 に隣接する宿である松川荘の当時のご主人の上野九二男氏は述べておられる<sup>15)</sup>。

この噴気停止の原因について検討したところ、坑内に低温水が流入し、坑内が低温になった時期に AR-1, BR-1 の噴気が停止したことがわかった (Fig. 12)<sup>1)</sup>。その対策の検討のため、松川の

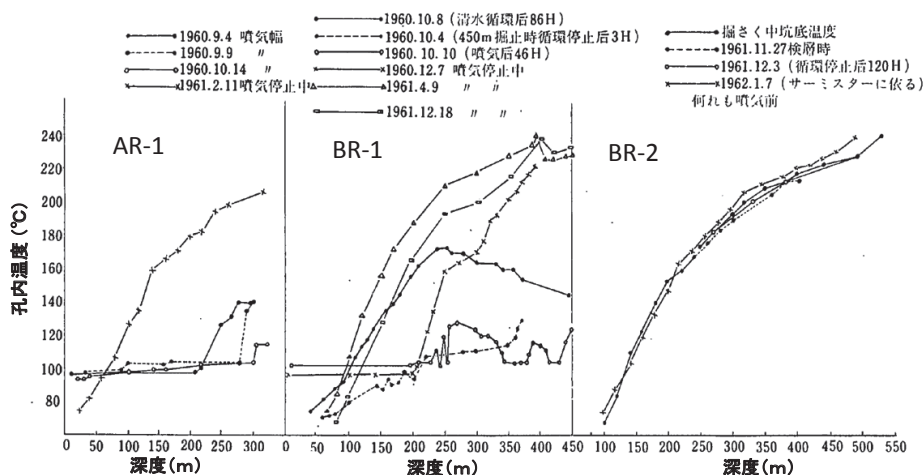


Fig.12 Temperature logging records of wells AR-1, BR-1 and BR-2<sup>1)</sup>.

<sup>††</sup> 日重化の地熱井の呼称は 1980 年代に再整理され変更されたため、松川の生産井の呼称にも変更があった。Table 3 に小文に関連する対比を示す。

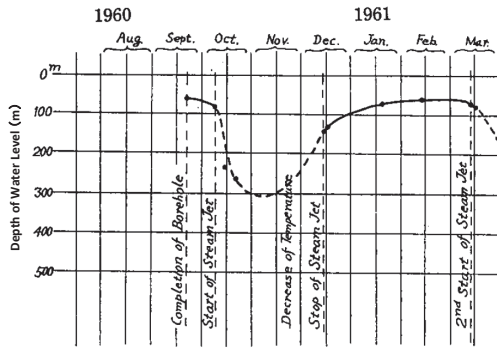


Fig. 13 Water level record of well BR-1<sup>16)</sup>.

河川水量とBR-1の坑内水位の経時変化が調査された。その結果、深度200m級の地下水圧は、河川水量とは半年ほどの時間的差で増減しており、ちょうど噴気が自然停止した期間(11月頃から3月頃まで)に高く、この期間は坑内が低温の流入水によって低温になったことが明らかとなった (Fig. 13)<sup>16)</sup>。

遮水すべき帯水層に関して、地質調査所により地質的検討も同時に行われた。AR-1, BR-1の地下水帯水層と考えられた深度200m級の地層は松川の下流側では深度100m台と浅くなるため、地下に浸透した天水がこの層を通っていることは間違いなく、この層を遮水すべきと考えられた (Fig. 14)<sup>2)</sup>。

これらの結果に基づき、遮水深度を300m級とした調査井BR-2が掘削された。BR-2は1962年1月に噴気成功し、自然停止することなく継続した (Fig. 11)。Fig. 12に示されたAR-1, BR-1, BR-2各井の坑内温度で明らかとなり、AR-1とBR-1では、地下水圧が上昇した時期には坑内に低温水が流入して坑内が低温になってしまったが、BR-2では高温が維持されたことがわかる。なお、当時は200℃超の坑内温度検層も初めてのことであり、多くの困難があったようである<sup>17)</sup>。この点でも、地質調査所との共同研究は役立った。

この時点ではイタリアのラルデレロや米国のザ・ガイザースと同様の乾き蒸気のみを生産する井戸が望まれていた。しかし、BR-2の噴気は、ほぼ乾いてはいたが、若干の湿りがあり、蒸気中のミスト(微水滴)によるタービン翼のエロージョン(液滴による機械的な浸食)が心配されたため、より乾いた蒸気を求めることとなった。

この時課題となったのは、より乾いた蒸気が存在する深度(蒸気採取予定深度)と湿り蒸気の流入を遮断する遮水深度であった。ケーシングパイプによる遮水深度については、BR-2の結果から深度500m程度と考えられた。

生産井の蒸気採取予定深度については、物理探査の結果が生かされた。地質調査所により実施された電気探査の結果 (Fig. 15)<sup>3)</sup>と調査井の結果との比較検討により、低比抵抗層が地熱蒸気の生産層(貯留層)となっていることがわかったが、深度1,000m付近(AB/2が1,000m付近)にもさらに低比抵抗層が存在することが注目された。この低比抵抗層がより深部の貯留層と考えられたため、生産井の掘削深度は1,000m級とすることとなった (Table 1参照)。

この検討結果に基づき、BR-2の地点に最初の生産井M-1が掘削されたが、ほぼ予想通りの掘削深度937mで全量逸泥が発生し、深度945mで掘り止めとなった。その結果、6MW相当の乾き蒸気が得られた。M-1とM-2の噴気流量特性を Fig. 16に示す。これが、松川地熱発電所の成功につながった。

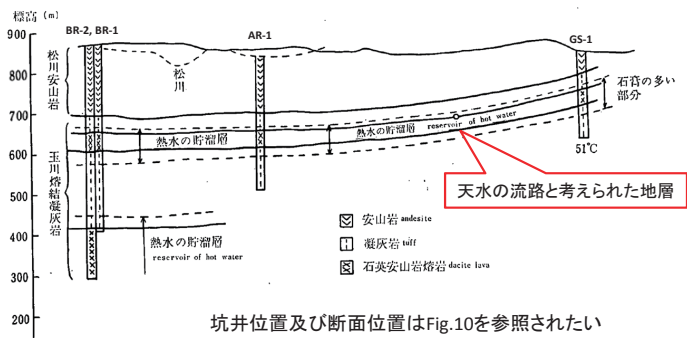


Fig. 14 Comparison of geologic logs of exploration wells (added to Nakamura, 1967<sup>2)</sup>).

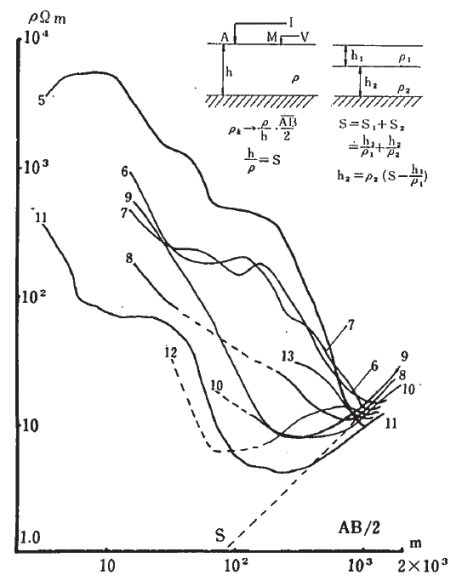


Fig. 15 Apparent resistivity by Schlumberger method carried out by Geological Survey of Japan<sup>3)</sup>.

4. 先駆的かつ独創的な取り組み

地熱資源の賦存状態や発電事業の持続性の検討などに関しても、地質調査所による先駆的な試みがあった。

4・1 地熱系概念モデル

今日、地熱探査の初期段階において重要な点の一つとして地熱系概念モデルの作成が挙げられる。地熱系概念モデルは、各種探査結果に基づき、キャップロックの位置と熱水の流れ(高温熱水の上昇流域と温泉などとしての流出域の間の流れ)を自然噴気や熱水(温泉水)の化学性状の分布と整合するよう図化したものであり、調査井掘削ターゲット検討の基礎となる重要なものである。

地熱探査の初期段階ではモデルの候補や有望ゾーンが一つに絞りきれない場合も少なくないため、仮説として複数のモデルを検討し、次の段階の探査でそれらの適否を検証していくプロセスが採られる。

松川は生産井から蒸気のみを生産する蒸気卓越型の地熱地帯だが、その一般的な概念モデルとしては、合衆国地質調査所(USGS)のWhiteらが1971年に発表したモデル<sup>18)</sup>が有名である。松川の調査・開発は、このモデルの公刊以前のことであり、独自の考えに基づく先駆的な取り組みが行われた (Fig. 6参照)。

4・1・1 中村のモデル 地質調査所の中村久由博士によるモデルを Fig. 17に示す。このモデルは地質と坑井調査結果に重点

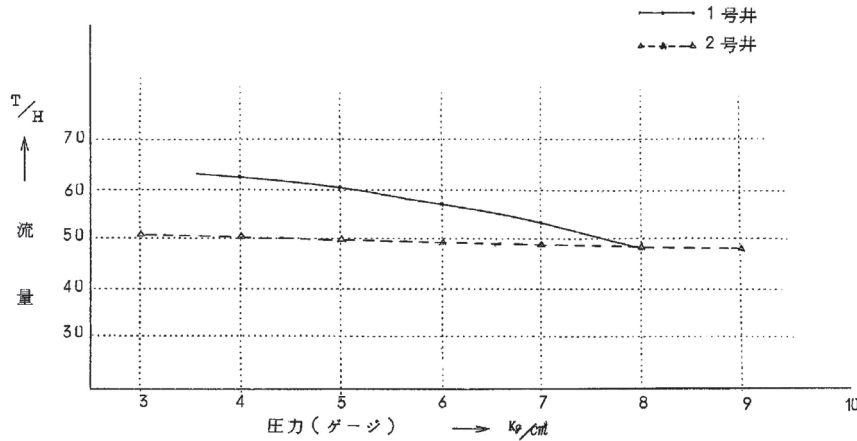


Fig.16 Steam productivity of wells M-1 and M-2 (from internal report of Japan Metals & Chemicals Co.).

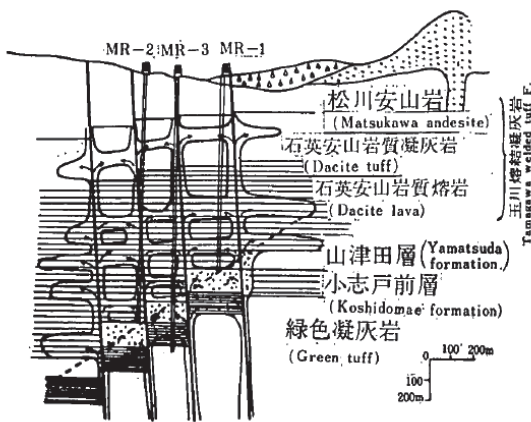


Fig.17 Conceptual geothermal model by Nakamura<sup>2)</sup>.

を置いて検討されたものである。

松川での生産流体は、噴気開始当初は熱水混じりの湿り蒸気であったが、噴気継続とともに熱水は減少し、過熱蒸気になっていった。このことから、中村は、最初に噴出した熱水は坑井周囲に存在したものであり、その遠方には蒸気または熱水混じり蒸気が存在するのではないかと考えた。

これらの地熱流体は全量逸泥箇所から生産されるため、全量逸泥を引き起こすほど透水性のよい断層を中心とした断層系のネットワークに地熱流体は胚胎されていると考えた。そして、その主要な大規模断層としては断層を考えた。また、全量逸泥が特定の地層（当時山津田層と考えられた地層）において発生する傾向もあるため、その地層内は破砕された状態になっている可能性があると考えた。なお、この地層は現在は山津田層ではなく玉川溶結凝灰岩類の一種であると考えられている<sup>19)</sup>。

本モデルの考え方は、1970年代後半になるまで、追加掘削ターゲット検討の基礎となった。

**4・1・2 早川のモデル** 地質調査所の早川正巳博士によるモデルを Fig. 18 に示す。このモデルは物理探査結果に重点を置き、熱や流体などの物理情報を加えて検討されたものである。

本モデルは、中村のモデルと比べてより広範囲の地熱系を考えて描かれている。すなわち、熱は、地下深部から断層等の大規模断層を通路として、火山性の流体とガスを伴って上昇し、地下に浸透した天水がそれによって加熱されて地熱流体となると考えている。早川は、後述するように、松川地域の生産井からの噴出量の事前予測や、地熱発電（蒸気生産）の持続性の検討を担当した

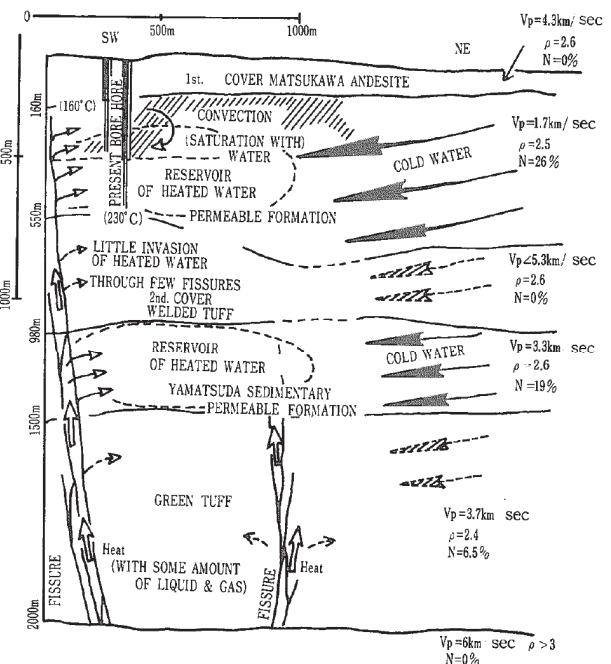


Fig.18 Conceptual geothermal model by Hayakawa<sup>3)</sup>.

ことから、マグマ溜まりを含むより広範囲の熱や地熱系（蒸気・熱水の供給系）も含めて考えていたようである。

**4・2 地熱発電の持続性の検討**

生産井の掘削や地熱発電所の建設のための資金手当として融資を受ける必要があったが、その際、地熱発電（蒸気生産）の持続性について説明が求められた。この検討は、地質調査所の早川正巳博士によって行われた。基本的には仮定した体積中の熱量を求め、その回収可能年数を考えるものであり、容積法に基づくものと言える。その点では現在の調査の初期段階の検討と本質的に差はないと言えるが、その考え方は、現在用いられている方法とは異なり、独自の考えに基づくものであった<sup>16)</sup>。

- ・まず、マグマ溜まりを半径2kmの球と仮定し、周囲の地層との温度差100Kに対応した熱 ( $6.9 \times 10^{18} \text{J}$ ) が抽出可能と考えた。
- ・生産井1本あたりの蒸気量の熱量は  $8.4 \times 10^6 \text{J/s}$  である。
- ・従って、生産井4本で抽熱を継続可能な年数は  $2 \times 10^{11} \text{s}$ 、約1万年と推定された。

現在では、貯留層に存在する熱の一部のみしか抽出できないことがわかっているため、回収率なる係数を導入しているが<sup>20)</sup>、

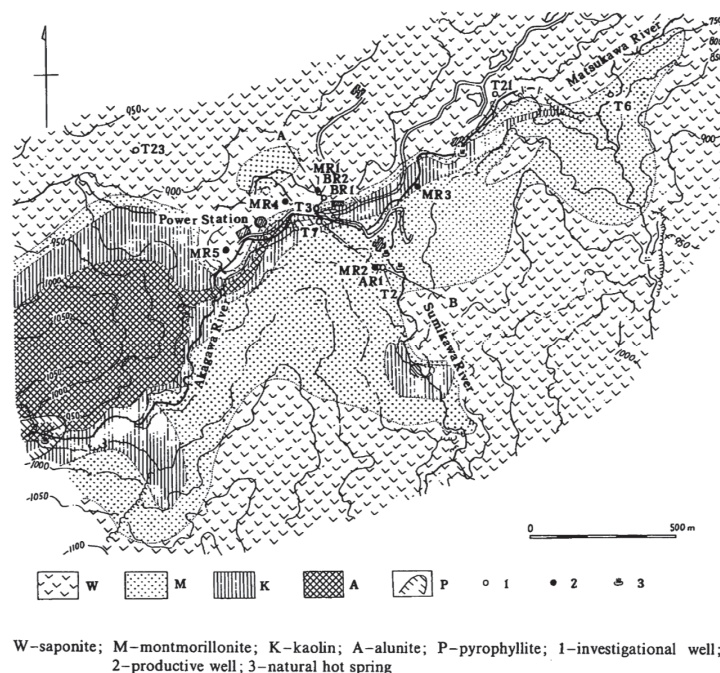


Fig.19 Distribution of hydrothermal alteration in Matsukawa<sup>22)</sup>.

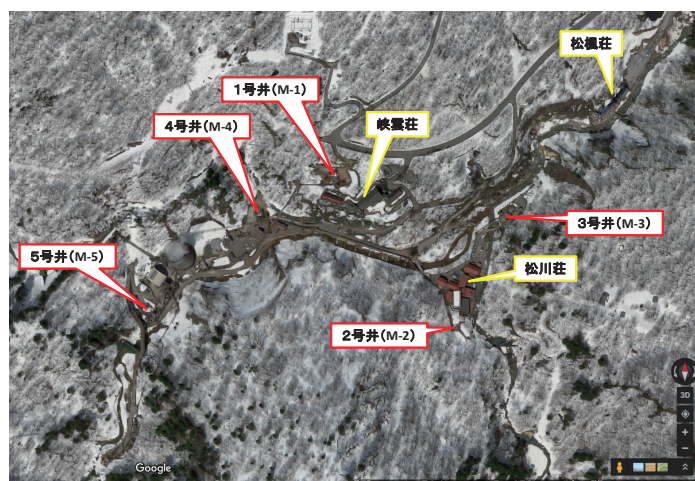


Fig.20 Locations of power station, production wells and hotels (Aerial photo by Google).

当時は初めてのことであり、そこまで考えることができなかったのはやむを得ないことと言えよう。USGSのNathensonによって回収率が初めて定義されて公開されたのは、松川の営業運転開始から9年後の1975年のことである<sup>21)</sup>。

#### 4・3 変質帯調査の重要性

現在の地熱探査では変質帯の調査や情報は非常に重要と認識され、初期段階や坑井調査において精力的に行われている。幸い、松川の場合は松尾村温泉井による地熱資源確認後に調査が始まったため、ゼロからの調査ではなかったことから、初期の坑井掘削地点検討には変質帯調査が直接的に役立ったというわけではないようである。

しかし、坑井調査が進んで、蒸気生産層周辺深度に高温で形成される変質鉱物であるパイロフィライトが特徴的に出現することが明らかになり、高温下で形成される変質鉱物の分布が探査上重要な指標となることが明らかになった<sup>22)</sup>。

一方、地表の変質帯調査結果から、松川の初期の開発域の南西側にパイロフィライトの巨大な露頭があることが知られていた

(Fig. 19)<sup>22)</sup>。後年、この方向に追加井(生産井)が傾斜掘削されたが、1970年に掘削されたM-7は減衰がきわめて少なく高いレベルの蒸気生産量を継続している<sup>13)</sup>。1980年代後半には生産井の圧力ビルドアップ試験が行われるようになり、その時点での貯留層圧力分布が明らかになった。この結果、当地域で生産されている蒸気の供給域は地域の南西方向にあることが明らかになった<sup>13)</sup>。このことから、南西側にあるパイロフィライトの分布域は、当地域における有力な地熱流体上昇域ではないかと考えられるようになった。高温下で形成される変質鉱物の重要性があらためて認識されたのである。

#### 5. 地域との共生

地熱発電所の開発や運転継続には地域との共生が欠かせない。現在、松川地熱発電所の域内には2軒の旅館(映雲荘、松川荘)が共存しており、すぐ下流側にはさらに1軒の旅館(松楓荘)がある(Fig. 20)。生産井M-1は映雲荘のすぐ横であり、M-2は松川荘の敷地の一部を借用して掘削された。これらの旅館うち、松



楓荘と松川荘は地熱開発前から現在の場所にあり、峽雲荘は、調査開始当初は川沿いにあったが、規模拡大に伴いM-1隣接地点に移転した。長年にわたって、これらの旅館の源泉<sup>†††</sup>に悪影響を与えず共存できたことは地熱発電継続の重要な要因であった。

発電所には見学者用のPRルームを設けてあるが、日本で最初の地熱発電所であることから修学旅行等の見学者が少なくなく、松川やその周辺の旅館等での宿泊・食事の利用にも貢献しているようである。なかでも、峽雲荘では、発電所が見える場所に露天風呂を設けており、観光資源として利用頂いている。

地域との共生の一環として、松川地熱発電所から温水供給も行われている(1971年11月開始)。現在は、八幡平市や第三セクターの運営会社(株式会社八幡平温泉開発)を通して、病院や、温泉施設、ホテル等宿泊施設、別荘、農業用ハウスなどに供給されている。

地域の方々と接するたびにうれしく思うのは、地域の方々が松川地熱発電所を誇りに思っていることである。これも長期間にわたる地域との共生の賜物であろう。

## 6. 松川での地熱開発の成功要因

松川での地熱発電が50年もの間順調に継続できた要因として、現在の視点で振り返ると以下の点が挙げられるであろう<sup>6)</sup>。

### 6・1 発電出力の設定

松川地熱発電所は合金鉄製造用の自家用電源として計画されたため、資源規模一杯の開発は考えられていなかった。当初は5MWで計画されたが、生産1号井の蒸気量が予想以上であったことから20MWに計画変更された。当時は貯留層の範囲や資源量、適正開発規模の推定も確立された方法はなく全て手探りであり、安全サイドの考え方が採られていた可能性が高い。

現時点から見ると、この基本方針は、損失の最大値を最小化するよう考えられていたと思われることから、明らかにミニマックス戦略<sup>23)</sup>である。地下資源である地熱資源の資源量や適正開発規模は、評価技術が進んだ現在においても推定や評価には不確実性が残り、意志決定は簡単ではない。発電事業としての経済性が追求される今日であるからこそ、松川で行われたアプローチは参考になるのではないかと。

### 6・2 増設を行わなかったこと

蒸気生産量に余裕が生じても発電ユニットの増設を行わなかったことも減衰の少ない安定した発電継続に寄与した。松川地熱発電所は自社の工場に送電するための自家用電源であるので、工場が必要とされる以上の発電を行っても、当時の電気事業法上の制約から電力の販売に大きな制約があったためである。

これとあわせて、Fig. 5などからわかるように、当地域の有力生産ゾーンである南西側は地形が険しく、更なる掘削敷地の確保が事実上不可能であるという事情もあった。従って、多くの生産井掘削を必要とする地熱発電所の増設は行われなかった。このことは、結果的に、貯留層の全体規模に対して過剰な生産とはならず、実際、運転開始から十数年を経過した時点でも、蒸気量の減衰は顕著ではなかった。松川において蒸気量の減衰が顕在化し始めたのは1980年代の後半になってからである。

### 6・3 運転管理方針

松川においては、蒸気量が減少した場合の追加井掘削に関しても、定格出力の維持が必ずしも大命題ではなかった。あくまで自家消費電力としての発電であるので、発電出力が低下した場合、工場で不足する電力を外部から購入するコストと追加井掘削のコストとの比較の中で追加井掘削のタイミングが決められていた。

<sup>†††</sup> 源泉は各旅館の近傍(峽雲荘に関しては移転前の場所)にあり、それらの位置は、例えば角(1970)<sup>10)</sup>に記載がある。

工場がフル稼働でない場合は、フル出力での発電は必ずしも必要なかったという事情もある。Fig. 2で最大電力が定格を下回っている時期があるのはこれらの理由による。

このような運転管理方針も貯留層の過度の減衰を防いだと言える。地熱発電所と一口に言っても、発電の目的や売電契約内容によって運転方針は変わりうるものである。また、資金調達の方法等によってもそれは変わりうるであろう。このような点も、今後の参考になるのではないかと。

## 7. おわりに

東化工の社内報「東苑」の地熱発電所完成記念特集<sup>24)</sup>と日重化の以前の社内報「敬愛」の地熱発電20周年記念特集<sup>15)</sup>をあらためて読み返してみると、関係者が異口同音に述べているのは、東化工の富岡重憲社長(当時)のリーダーシップである。新たなプロジェクトを推進するためにはリーダーが重要であることをあらためて認識させられた。それに現場で応えた先輩方の努力にも頭が下がる思いである。

松川の開発は一見順調に進んだように見えるが、実際のところは、順調なことばかりではなかった。高温下での井戸掘削や仕上げ、スケール問題など、ここには書ききれなかった技術的苦労に加え、諸手続(許認可)や資金調達にあたって、事業の実現性と持続性の説明にも大きな苦労があったようである<sup>24)</sup>。この中では、新技術開発事業団からの「地熱発電技術」研究開発の委託契約は事業推進に大きな力となった。

工事やプラント関係者の努力も大きかった。掘削は帝石削井工業が、蒸気配管は日本鋼管(現在のJFEエンジニアリング)が、発電プラントは東芝が、冷却塔は大成建設が、土木工事は佐藤工業が、送電線は山加電業が担当された。通常の火力発電とは全く性状の異なる地熱蒸気を用いた発電には、種々の苦労があったはずである。日本製の地熱発電プラントは、現在、発電出力で、世界の地熱発電設備の約7割を占めている。その端緒となったのは松川であり、関係者の努力に感謝する次第である。

## References

- 1) 森芳太郎: 地熱, No.10 (1967), pp.52-67.
- 2) 中村久由: 地熱, No.10 (1967), pp.13-34.
- 3) 早川正巳: 地熱, No.10 (1967), pp.35-51.
- 4) 角清愛: 日本の地熱資源, (日本地熱調査会, 東京, 1970), pp.126-131.
- 5) 森芳太郎・片桐邦雄: 地熱エネルギー, 16 (No.1) (1991), 64-71.
- 6) M. Hanano: Geothermics, 32 (2003), 311-324.
- 7) 中島洋二・中村昭一: 地熱, No.25 (1970), 11-21.
- 8) 大関仁志・福田大輔・奥村貴史: 地熱, 38 (2001), 339-368.
- 9) 角清愛・橋本知昌・池田一雄: 地質調査所月報, 39 (1988), 435-445.
- 10) 角清愛: 地質ニュース, No.189 (1970), pp.16-24.
- 11) 角清愛: 地質ニュース, No.337 (1982), pp.89-99.
- 12) M. Hanano and G. Matsuo: Geothermics, 19 (1990), 541-560.
- 13) M. Hanano and Y. Sakagawa: Geothermics, 19 (1990), 29-42.
- 14) 例えば, M. Hanano: J. Energy Resources Technology, 114 (1992), 309-314.
- 15) 日本重化学工業株式会社: 敬愛(地熱発電20周年記念特集)(1986), pp.1-36.
- 16) 早川正巳: 地球熱学, (東海大学出版会, 東京, 1988), pp.1-324.
- 17) 高木慎一郎・田中信一: 地質調査所月報, 19 (1968), 507-518.
- 18) D.E. White, L.J.P. Muffler and A.H. Truesdell: Economic Geology, 66 (1971), 75-97.
- 19) 赤澤司史・村松容一: 日本地熱学会誌, 10 (1988), 359-371.
- 20) 例えば, M.A. Grant and P.F. Bixley: Geothermal Reservoir Engineering, (Academic Press, New York, 2011), pp.1-359.
- 21) M. Nathenson: U.S. Geological Survey Open-File Report 75-525 (1975), pp.1-35.
- 22) K. Sumi: Report No.225, Geological Survey of Japan (1968), pp.1-44.
- 23) 例えば, 唐津一: かけひきの科学, (PHP研究所, 東京, 1997), pp.90-94.
- 24) 東化工株式会社: 東苑, No.71 (特集地熱発電所完成記念)(1966), pp.1-29.