

# 澄川地熱発電所の地熱貯留層管理

有木 和春<sup>1)</sup>・加藤 久遠<sup>2)</sup>

## 1. はじめに

地熱資源を利用する地熱発電は、他の地下資源と同様に、探査・評価・開発(地熱発電所の建設)および管理のフローで進められる。

地熱資源の探査にあたり、貯留構造(器)、熱構造(熱)および流体流動(水)は、「地熱の3要素」と一般に言われており、その構造を明らかにすべく各種調査が実施されている。また、野田(1990)は、「ある規模の熱を有するフィジブルな流体が貯留されている場所を探す」という探査の究極の目的として、地熱資源の分布、性状および規模を「探査の3目標」として提案し、前述の地熱の3要素と関連付けて論じている。

地熱探査が進むとともに、生産・還元能力の調査を行い、地熱貯留層評価が実施され、環境アセスメントとともに経済性評価を経て、事業化の是非が検討される。事業化が承認されると、発電設備および蒸気設備を建設し、地熱発電所の操業を開始する。操業後、蒸気を安定供給するため、生産・還元にとりまなう地熱貯留層のモニタリングならびに生産井と還元井の運用や地上設備の改善を検討する貯留層管理が行われる。地熱資源の探査・評価・開発・管理においては、熱の媒体である流体が貯留あるいは流動している“割れ目(生産井ではフィードゾーン、還元井ではインジェクションゾーンとなる)”の特性を把握することが重要であり、大きな課題の一つである。

秋田県鹿角市八幡平に位置する澄川地熱発電所は1995年3月に営業運転を開始して約14年が経過した(発電は東北電力株式会社、蒸気供給は三菱マテリアル株式会社)。発電所操業当初およびその後の一時期に定格の50MWeを達成していたが、近年は

35~45MWeの範囲で操業している。本稿では、地熱貯留層管理の一例として、澄川地熱発電所の蒸気生産および今後の取り組みを述べる。

なお、澄川地熱発電所の地熱貯留層の探査・開発の経緯および地熱系については、坂井ほか(1986, 1993)、坂井(1991)および窪田(1985)を参照されたい。

## 2. 開発方針

澄川地熱発電所の地熱系概念モデルと坑跡を第1図と第2図にそれぞれ示す。

澄川地域の開発当初の方針を以下に記述する(坂井ほか, 1993)。

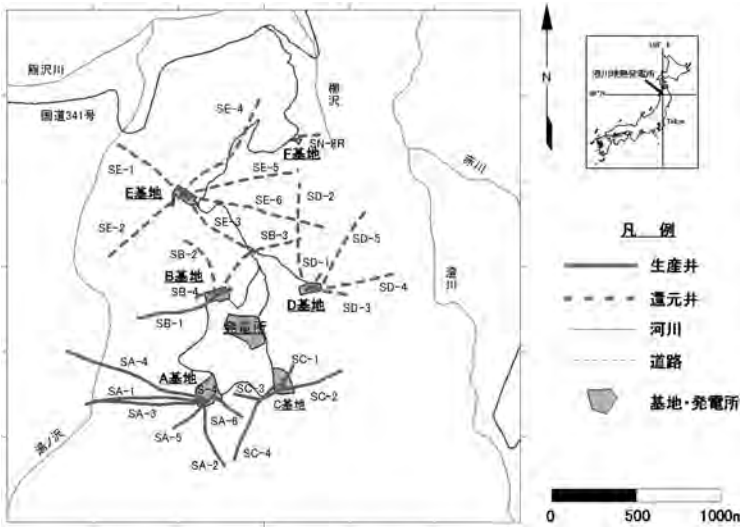
### (1) 深部開発による蒸気生産

澄川地域では探査段階の1981年に深度400m付近で蒸気卓越領域の存在が確認された。その後の評価および開発計画策定において、主要な生産井のターゲットとして浅部蒸気卓越領域開発と深部熱水卓越領域開発について検討された。

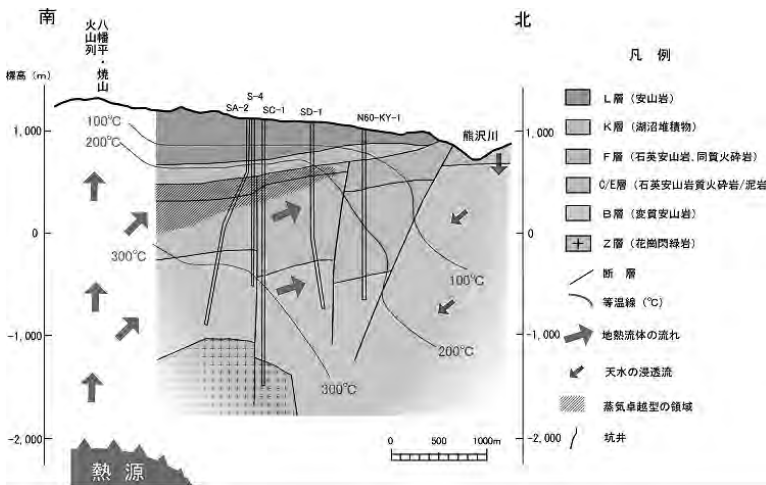
浅部の蒸気卓越領域を主要な生産ゾーンとした場合、長所として生産井の掘削長が短く、還元井の数を低減できることが期待でき、開発コストを抑制できることがあげられ、短所として資源量と長期的な蒸気の安定供給に不安のあることがあげられた。他方、蒸気卓越領域より深部を開発する場合、長所として高い生産性と長期的な蒸気の安定供給を期待できる点があげられ、短所として割れ目へ達する可能性が未知数である点と掘削費が高くなる点があげられた。様々な検討の結果、生産井の標準的な掘削長を

1) 三菱マテリアル株式会社 地熱・電力事業センター  
330-8508 埼玉県さいたま市大宮区北袋町1丁目297番地  
2) 三菱マテリアル株式会社 銅事業カンパニー  
100-8117 東京都千代田区大手町1丁目3番2号

キーワード: 澄川地熱発電所, 地熱貯留層管理



第1図  
澄川地熱発電所の坑跡。



第2図  
澄川地熱発電所の地熱系概念モデル  
(窪田, 1985を修正)。

2,000mとし(現時点の生産井は2,500mを標準としている)、深部の高温高压の熱水卓越領域をターゲットとすることとした。

また、開発初期のSA-1掘削(1986年7月~10月)時の掘削長1,725m以深で、澄川地域で初めての花崗閃緑岩体に達した。当時、本邦においては、深部における結晶岩質の貫入岩体や基盤岩での開口割れ目の事例が乏しく、さらにSA-1の西方で掘削された調査井N59-SN-5では掘削長1,051~1,700mの区間で確認された花崗閃緑岩体中において開口割れ目に達しなかったことから、岩体内での開口割れ目形成の可否について議論がなされた。しかし、当社の鉞脈型鉞床での経験からは、花崗岩体中に開口割れ目が発達しないとする根拠はないという知見が得られてお

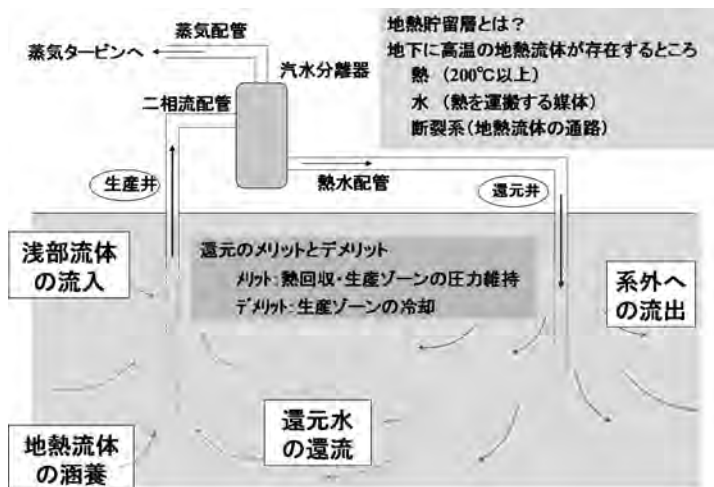
り、掘削を続行した。その結果、SA-1は大規模の割れ目に達し、現在においても80t/h程度の蒸気を生産しているため、花崗岩体を主要な生産井のターゲットと位置付けている。

なお、生産井は、高い生産井を確保することを目的に、複数の割れ目を掘り抜き、複数のフィードゾーンを有する生産井に仕上げることにした。

## (2) 坑井配置

地熱エネルギーの大半は、地熱貯留層を構成する岩盤に貯蔵されており、それをいかに効率良く回収するかが重要である。従って、坑井配置は下記の方針で計画された。

・南方の高温域に生産井、北方の比較的低温域に

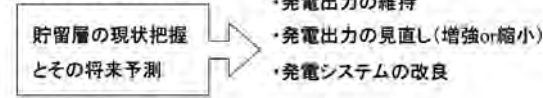


第3図 地熱発電所操業後の地熱貯留層の挙動。

第1表 生産能力と還元能力の低下原因。

|        | 生産能力の低下            | 還元能力の低下 | 調査方法               |
|--------|--------------------|---------|--------------------|
| 貯留層温度  | 低下                 | —       | 温度検層、地化学温度、比エンタルピー |
| 貯留層圧力  | 低下                 | 上昇      | 圧力検層、圧力観測          |
| 透水性    | 低下                 | 低下      | 圧力遷移試験             |
| 坑井トラブル | スケール・ケーシングブレイク・崩落等 |         | キャリバー検層他           |
| その他    | —                  | ガスロック等  |                    |

☆ 貯留層管理の目的



☆ 貯留層管理の流れ



第4図 地熱貯留層管理の目的とフロー。

還元井を配置する。

- ・ さらに、還元流体の生産井へ還流するまでの滞留時間を長くするため、坑井相互の間隔を極力大きくして、平面的に広い範囲に分布させる。

しかし、計画した深度より浅部に存在する割れ目閉塞の技術的困難による不徹底あるいは深部割れ目への未達着などのため、実際には一部の坑井相互のフィードゾーン間、フィードゾーンとインジェクションゾーンの間、あるいはインジェクションゾーン間の距離が十分と言えない結果となっている。

3. 貯留層管理

(1) 貯留層管理の概要

ここでは、地熱貯留層のモニタリングと貯留層管理の一般的な概要について述べる。

地熱発電所運転開始後、生産井から噴出する蒸気

流量と熱水流量および還元井の還元流量は変化し、発電出力に影響を及ぼす。これらの変化は、地熱貯留層および生産井や還元井の坑内状況の変化に起因する。地熱貯留層の生産能力（蒸気流量）と還元能力（還元流量）の一般的な低下原因を第1表に示す。

地熱発電所運転後の地熱貯留層の変化は、貯留層圧力、化学組成（例えば、化学成分の濃度）、温度の順に一般的に現れる。これらの変化をモニタリングし、地熱発電所が安定操業できるように、適切に対処することが貯留層管理の役割と言える。地熱発電所操業後の貯留層の挙動、貯留層管理の目的とフローおよび地熱発電所で適用されている貯留層モニタリングの項目を第3図、第4図および第2表にそれぞれ示す。

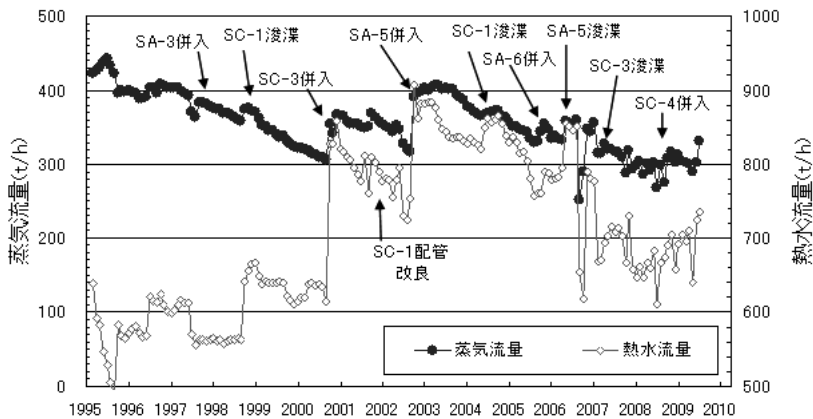
地熱発電所操業後、各種モニタリングが実施され、貯留層管理に活かされる。地熱発電所が操業してか

第2表 地熱貯留層のモニタリング項目。

- ◆生産ヒストリー
  - ①生産井の生産流量、比エンタルピー、坑口圧力
  - ②還元井の還元流量、還元温度、坑口圧力
  - ③蒸気、熱水および非凝縮性ガスの定期的なサンプリング、分析
- ◆坑井調査
  - ①生産中・還元中(あるいは停止中)の温度・圧力・スピナー検層
  - ②キャリパー検層(坑径検層)、ボアホールテレビ、その他
  - ③観測井の圧力・温度モニタリング
  - ④トレーサテスト、圧力遷移テスト(注水テスト、圧力干渉テスト)
- ◆物理探査モニタリング
  - ①重力調査…流体流動、流体の涵養ほか
  - ②比抵抗調査…塩分濃度の変化、蒸気相の発達過程
  - ③自然電位…流体流動
  - ④Acoustic Emission…流体流動、割れ目

第3表 澄川地熱発電所の地熱貯留層モニタリング項目。

| モニタリング項目および検査項目 |                   | 検査                           |   |
|-----------------|-------------------|------------------------------|---|
| 生産ヒストリー         | 生産井               | 坑口圧力                         | 各生産井 連続   |
|                 |                   | 坑口温度                         | 各生産井 連続   |
|                 |                   | 蒸気流量                         | 各系統 連続  |
|                 |                   | 熱水流量                         | 各系統 連続  |
|                 |                   | トレーサ希釈法による二相流流量測定<br>比エンタルピー | 各生産井 2回/年<br>流量データから計算                          |
| 還元井             | 還元井               | 還元温度                         | 各還元井 連続   |
|                 |                   | 還元流量                         | 各還元井 連続   |
|                 | 湧出流体の化学性状         | 蒸気<br>熱水<br>非凝縮性ガス           | 各生産井、各系統 4回/年<br>各生産井、各系統 4回/年<br>各生産井、各系統 4回/年 |
| 坑井調査            | 坑口圧力              | 温度・圧力・スピナー検層<br>キャリパー検層、その他  | 各坑井 必要に応じて<br>各坑井 必要に応じて                        |
|                 | 坑内圧力観測<br>トレーサテスト | 1本(Q60-KY-1)                 | 連続<br>必要に応じて                                    |
| 物理探査<br>モニタリング  | 重力モニタリング          |                              | (独)産業技術総合研究所で実施                                 |
|                 | 自然電位モニタリング        |                              | (独)産業技術総合研究所で実施                                 |



第5図 澄川地熱発電所の蒸気流量と熱水流量の経時変化。

ら、最も大きな貯留層管理上のテーマは、発電出力の維持・回復ならびに発電出力の増強(あるいは発電システムの改良)である。

(2) 澄川地熱発電所の貯留層管理

①モニタリング項目

澄川地熱発電所の地熱貯留層管理のためのモニタリング項目を第3表に示す。

貯留層管理において最も重要な噴出流量データは、複数の生産井からの噴出流体を処理する集中汽水分離器の下流で蒸気流量と熱水流量を測定しているため、各生産井の流量を連続モニタリングできず、個々の挙動が把握しにくい。従って、2回/年の頻度でトレーサ希釈法による二相流流量測定ならびに定期点検時(原則として1回/4年)などの発電停止の時に各生産井の流量測定を実施し、各生産井の経時変化を把握している。そして、各生産井からの生産流体の比エンタルピーは流量データから求めている。他方、還元井の還元流量はそれぞれ計測している。

地化学モニタリングに関しては、定期的に蒸気、熱水および非凝縮性ガスを採用し、地熱流体の性状を把握し、貯留層および坑井の挙動把握に活かされている。

坑井の挙動に変化が認められた場合あるいは坑井工事の計画を検討する場合、必要に応じて、圧力・温度・スピナー検層(PTS検層)、キャリパー検層(坑径検層)やトレーサテストなどの坑井調査を実施している。

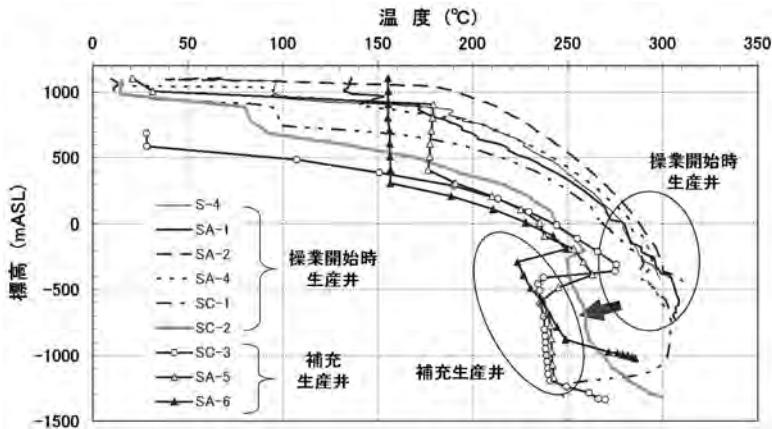
物理探査モニタリングとしては、独立行政法人産業技術総合研究所の研究開発の一環として、重力モニタリングと自然電位モニタリングが実施されている(例えば、Ishido *et al.*, 1995; Matsushima *et al.*, 2000)。

②蒸気生産の推移および蒸気流量低下原因

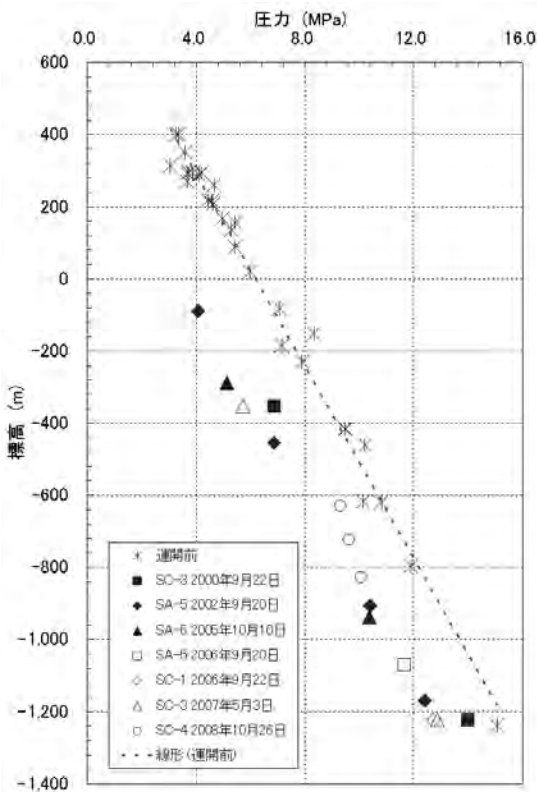
澄川地熱発電所では定格の50MWeを発電するため、約400t/hの蒸気を必要とする。1995年3月の澄川地熱発電所操業開始以降の蒸気流量と熱水流量の経時変化を第5図に示す。

操業開始以降、蒸気流量は時間経過とともに低下





第6図  
澄川地熱発電所生産井の温度検層結果。



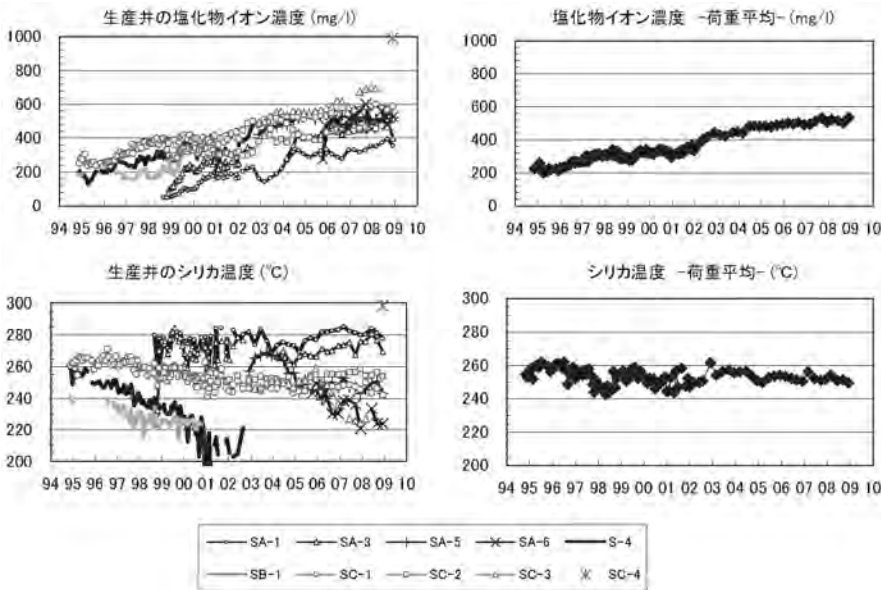
第7図 澄川地熱発電所生産井のフィードゾーンにおける標高と圧力の関係。

し、補充生産井の掘削、浚渫工事および地上設備の改良などで対処している。他方、熱水流量は運転開始当初で500～600t/h程度を噴出していたが、補充生産井が多量の熱水を噴出したこともあり、2000年以降は700～900t/hの範囲で推移している。なお、2006

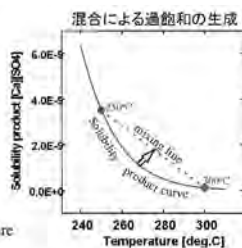
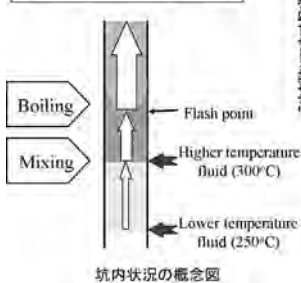
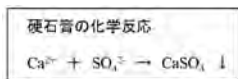
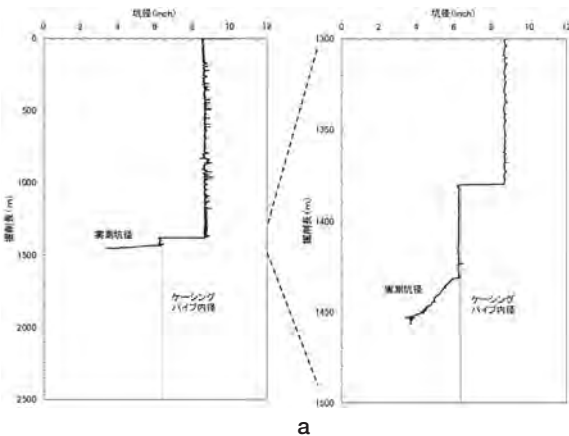
年11月以降の短周期の流量変化は、生産井SA-6でタービン通気が可能な期間と不可能な期間が発生する噴気変動が認められるようになったことに起因する。

蒸気流量低下原因と考えられる温度低下、圧力低下および坑内トラブルについてモニタリングデータと坑井調査に基づいて以下に述べる。

各生産井の温度検層結果、フィードゾーンにおける標高と圧力の関係および塩化物イオン濃度とシリカ温度計の経時変化を第6図、第7図および第8図にそれぞれ示す。第6図に示す温度検層結果によれば澄川地熱発電所の生産井は、運転開始前は海水準(掘削長約1,100m)において250℃以上を示していたが、運転開始後の補充生産井では250℃未満を示している。この原因として、補充生産井の坑内温度曲線を見ると、浅部フィードゾーンからの低温水が坑内に流入して下降流となり、深部フィードゾーンから貯留層へ流出していることが推定される。また、第7図の圧力データによれば、操業開始約14年間における生産領域の圧力低下は約3MPaであり、近年は低下傾向が緩和している。第8図に示す貯留層規模の塩化物イオン濃度は発電所操業後の時間経過とともに上昇し、2003年以降は上昇傾向が緩やかになっている。この塩化物イオン濃度の時間経過は蒸気分離後の化学成分の濃縮された還元熱水が生産井に還流していることを示唆している。また、貯留層規模のシリカ温度計は発電所操業後、大局的には低下傾向を示しているが、2003年以降は若干の変動はあるものの約250℃で推移している。各生産井のシリカ温度を見ると、低いシリカ温度を示した生産井は生産能力が低下し、



第8図  
澄川地熱発電所生産井の塩化物イオン濃度とシリカ温度の経時変化。  
(左) 各生産井の塩化物イオン濃度とシリカ温度、(右) 各生産井の噴出流量による荷重平均で求めた貯留層規模の塩化物イオン濃度とシリカ温度。



a  
b

第9図 坑内スケールによる坑径減径と硬石膏スケール生成のメカニズム。(a) 澄川地熱発電所生産井のキャリパー検層結果の事例、(b) 硬石膏スケール生成の化学反応、混合による過飽和および坑内状況の概念 (加藤ほか, 2000)。

タービン通気が困難となり、生産井S4、SB-1およびSC-3では生産を休止し、SA-6は連続したタービン通気が困難となり、断続的にタービン通気が可能となっている。澄川地熱発電所のトレーサテストによれば、これらの生産井では還元熱水の還流が早く、かつ、混入率も高く(Kumagai et al., 2004)、温度低下が認められる。故に、前述のタービン通気が困難になった生産井(S4、SB-1およびSC-3)の生産能力低下は還元熱水の短時間の還流による温度低下が主要な原因と考えている。

澄川地熱発電所の生産井は、複数のフィードゾーンから異なる温度の地熱流体が坑内に流入し、混合することで硬石膏スケールが坑内に生成することが確認されている(加藤ほか, 2000)。キャリパー検層で測定した坑内スケールによる坑径減径と硬石膏スケール生成のメカニズムを第9図に示す。澄川地熱発電所の生産井では、これまでにSA-5、SC-1およびSC-3で硬石膏スケールが認められている。

以上のことから、澄川地熱発電所の生産能力低下の原因として、温度低下、圧力低下および坑内スケール(硬石膏スケール)が確認されている。この中でも、補充生産井と浚渫工事の実績および坑井シミュレーションの結果から、温度低下と坑内スケールが蒸気流量低下の主要な原因と考えている。特に、温度低下に関しては、前述のとおり、還元熱水の短時間の還流が最も大きな原因と考えている。

第4表 澄川地熱発電所の複数のフィードゾーンを有する生産井の状況。

○複数のフィードゾーンがない生産井

| 坑井名  | 噴気変動 | 硬石膏スケール | 浅部温度低下 |
|------|------|---------|--------|
| SA-1 | 小    | —       | —      |
| SA-3 | —    | —       | —      |
| SA-4 | —    | —       | —      |

◎複数のフィードゾーンを有する生産井

| 坑井名  | 噴気変動 | 硬石膏スケール | 浅部温度低下 |
|------|------|---------|--------|
| SA-5 | (小)  | あり      | あり     |
| SA-6 | 大    | ?       | あり     |
| SC-1 | 小    | あり      | あり     |
| SC-2 | 大    | —       | ?      |
| SC-3 | —    | あり      | あり     |

③複数のフィードゾーンを有する生産井の長所と短所

前述のとおり、澄川地熱発電所の生産井は複数のフィードゾーンを有する生産井に仕上げた。その結果、生産開始当初は多量の蒸気を噴出したが、一部では時間経過とともに短所が顕在化してきた(有木ほか, 2008)。澄川地熱発電所の生産井の状況を第4表に示し、複数のフィードゾーンを有する生産井の長所と短所を以下に列記する。

《長所》

- ・ 比較的浅部(ここでは深度1,500m以浅)での割れ目達着による“割れ目未達着リスク”の回避
- ・ 多量の蒸気生産

《短所》

- ・ 浅部フィードゾーンへの還元熱水の短時間の還流および浅部低温水の流入
- ・ 異なる温度の地熱流体が混合する場合の硬石膏スケール

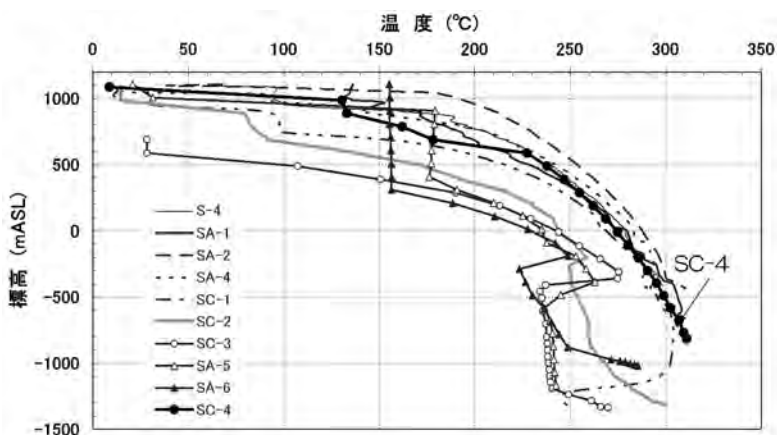
- ・ 噴気変動, 場合によっては噴気停止
- ・ 浅部逸水に起因する掘削の難易度増大

(3) 今後の取り組み

澄川地熱発電所の蒸気流量低下の主要な原因は、温度低下と坑内スケール(硬石膏スケール)と考えている。特に、複数のフィードゾーンを有する生産井の浅部フィードゾーンの温度低下が顕著であり、還元熱水の短時間の還流が原因と考えている。また、複数のフィードゾーンを有する生産井では異なる温度の地熱流体が混合し、硬石膏スケールが生成している。

今後の取り組みとして、補充生産井を掘削する場合、蒸気減衰抑制を目的に坑井間隔(ここでは、「フィードゾーンやインジェクションゾーンの相互の間隔」を指す)を長くするとともに、還元の悪影響回避と硬石膏スケール生成抑制のため、可能な限り生産井の浅部フィードゾーンは閉塞して生産の対象としない計画である。2008年に掘削した補充生産井SC-4は南方で掘削し(第1図参照)、生産対象区間を従来より深くして仕上げた結果、発電所操業開始前の生産井の温度曲線に近い結果が得られた(第10図参照)。さらに、既存の複数のフィードゾーンを有する生産能力の低下した生産井に対して、生産能力を回復するため、浅部フィードゾーンの閉塞を検討している。また、坑内の硬石膏スケールによる蒸気流量減少に関しては、これまで浚渫工事で対処してきたが、キレート材を用いた化学洗浄(加藤・笠井, 2007)についても、調査・検討を進めている。

他方、還元について述べると、これまでの坑井調査および浚渫工事の実績から、還元能力低下は坑壁



第10図 澄川地熱発電所の生産井SC-4温度検層結果。



崩落、スケール剥落による坑内閉塞、還元井間の相互干渉による還元域の圧力上昇、およびシリカスケールが一因であると考えている。その他の原因については確認していないが、還元能力低下の原因は、単独でなく、複数である可能性が高いと考えている。これまでの還元能力の回復および確保は、注水洗浄、改修工事（浚渫工事、ストレーナ設置、増掘）および補充還元井掘削で対応している。そして、発電所冷却水などの低温流体（約40℃）は噴出熱水（140～150℃）と比較して遠方へ還元している。還元に対する今後の取り組みとして、還元熱水の短時間の生産井への還流を抑制するため、補充還元井は生産井からの距離がさらに遠方となるように北方域でのターゲットを調査・検討している。

#### 4. おわりに

本稿では、地熱貯留層管理の一例として、澄川地熱発電所の蒸気生産と今後の取り組みについて述べた。

澄川地熱発電所では、当初の開発方針に基づいて、生産井は南方、還元井は北方に配置して、平面的に広い範囲で生産と還元を行い、生産のターゲットは深度約400mで確認された蒸気卓越領域でなく深部に存在する高温高圧の熱水卓越領域とした。そして、生産井は、多量の蒸気生産を目的に、生産対象区間を長くして複数のフィードゾーンを有する生産井を仕上げた。しかし、一部の坑井において、浅部割れ目の閉塞の不徹底あるいは深部割れ目への未達着などのため、坑井相互のフィードゾーン間、フィードゾーンとインジェクションゾーンの間、あるいはインジェクションゾーン間を離すことが十分といえない結果となった。また、複数のフィードゾーンを有する生産井は生産開始当初は多量の蒸気を噴出し、1本あたりの発電電力は高い数値を得たが、一部では生産継続とともに硬石膏スケール、低温水流入による温度低下および噴気変動による生産能力低下が顕在化している。

今後の蒸気生産の取り組みとして、生産対象区間を短くして深部フィードゾーンをターゲットとし、浅部フィードゾーンを閉塞することで、還元熱水の短時間の還流による温度低下や硬石膏スケールの抑制を図っている。また、補充生産井と補充還元井はフィードゾーンとインジェクションゾーンの間隔が離れるように配置すべく、割れ目構造についての調査を継続している。

#### 引用文献

- 有木和春・加藤久遠・北尾浩治(2008)：澄川地熱発電所における複数のフィードゾーンを有する生産井の長短。日本地熱学会平成20年学術講演会講演要旨集。B19。
- Ishido, T., Sugihara, M., Pritchett, J. W. and Ariki, K. (1995) : Feasibility study of reservoir monitoring using repeat precision gravity measurements at the Sumikawa geothermal field. Proceedings of the world geothermal congress, 1995, 853-858.
- 加藤久遠・亀井淳子・北尾浩治(2000)：沈殿-流動モデルを考慮した硬石膏スケールの生成メカニズム -澄川生産井SC-1坑の解析事例-。日本地熱学会誌, 22, 171-185。
- 加藤久遠・笠井加一郎(2007)：硬石膏スケールの化学洗浄に関する実験的研究。日本地熱学会平成19年学術講演会講演要旨集。B35。
- 窪田康宏(1985)：八幡平-焼山北部地域の地熱系モデル。日本地熱学会誌, 7, 231-245。
- Kumagai, N., Tanaka, T. and Kitao, K. (2004) : Characterization of geothermal fluid flows at Sumikawa geothermal area, Japan, using two types of tracers and an improved multi-path model. Geothermics, 33, 257-275.
- Matsushima, N., Kikuchi, T., Toshi, T., Nakao, S., Yano, Y., Ishido, T., Hatakeyama, K. and Ariki, K. (2000) : Repeat SP measurements at the Sumikawa geothermal field, Japan. Proceedings of the world geothermal congress, 2000, 2725-2730.
- 野田徹郎(1990)：地熱資源調査の実際的戦術。平成元年度地熱開発技術マネジメント研究会資料、財団法人新エネルギー財団、169-204。
- 坂井定倫(1991)：澄川地熱開発プロジェクトのマネジメント。地熱エネルギー, 16, 65-74。
- 坂井定倫・窪田康宏・島山和義(1986)：秋田県北八幡平澄川地区の地熱資源探査。地熱, 23, 281-302。
- 坂井定倫・松永栄勇・窪田康宏(1993)：澄川地区の地熱開発。資源地質, 43, 409-425。

ARIKI Kazuharu and KATO Hisao (2010) : Reservoir Management on the Sumikawa Geothermal Reservoir.

< 受付：2009年11月10日 >