

鬼首地熱発電所の地熱貯留層管理

中西 繁 隆¹⁾

1. はじめに

宮城県大崎市鳴子温泉鬼首に位置する鬼首地熱発電所は、1975年3月に日本で第4番目に運開した出力12,500kWの地熱発電所であり、運開以来約35年が経過した。元々は出力25,000kWで計画・建設されたが、運開時に所定の蒸気量が確保できず、結果的に認可出力12,500kWとなったものである。

鬼首地熱貯留層は、強酸性及び中性という液性の異なる地熱流体が狭い範囲内に分布するという極めて特異な特徴を有しており、これが運開初期における生産領域の制約、生産井内のスケール析出による坑内閉塞、及び酸性熱水による坑井ケーシングパイプの損傷等、発電所運転管理上の様々な課題の遠因となっている。発電所運開以来出現した様々な困難をその都度克服してきた結果、近年の直近15年程度は認可出力での高い設備利用率の安定的運転を達成している。一方、長年小さい坑井展開域の中で生産・還元を継続してきた結果として、近年は還元熱水による生産ゾーンの冷却の進行といった新たな貯留層管理上の課題が顕在化しつつある。

本稿では、貯留層変動と関連する鬼首地熱貯留層開発の経緯と特徴を述べ、鬼首地熱発電所の貯留層管理及び今後の取組みについて述べる。

なお、鬼首地熱発電所の探査や地熱系の概要及び発電所運転状況については、一杉(1976)、阿部・原田(1985)、阿部ほか(1989)、Abe(1993)、Aijima *et al.*(1998)、Akasaka *et al.*(2001)を参照願いたい。

2. 鬼首地熱発電所の生産・還元の変遷と貯留層管理上の課題

鬼首地熱発電所の現在の坑井配置と地熱系概念

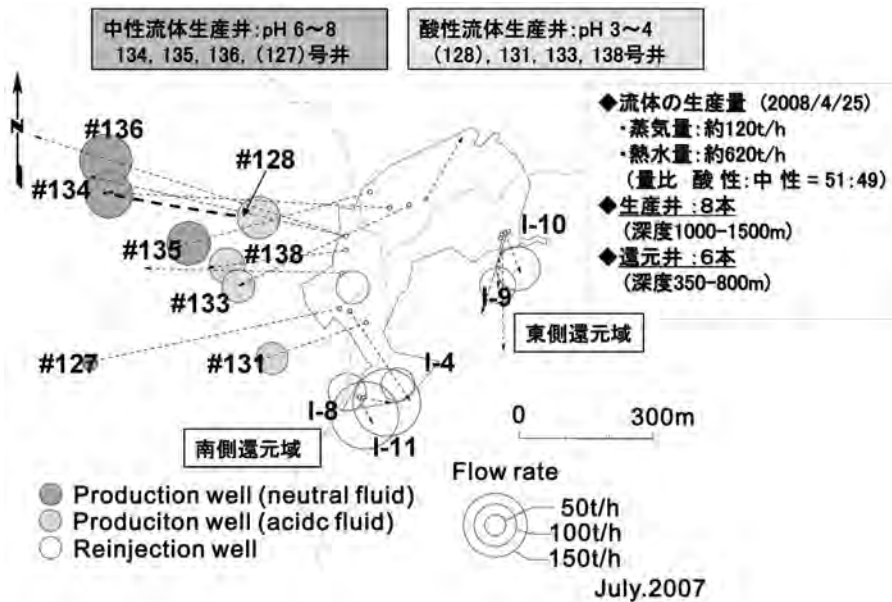
モデルを第1図と第2図に示す。第1図ではpH3~4の酸性熱水とpH6~8の中性熱水を生産する生産井を区別して示している。このように鬼首地熱貯留層は、強酸性及び中性という液性の異なる地熱流体が狭い範囲内に分布するという極めて特異な特徴を有している。現在は、主に傾斜掘りにより発電所敷地外の西側から蒸気・熱水を生産し、発電所敷地南部と東部の2箇所に分けて還元している。第2図に示すとおり、発電所敷地直下の深部にはパイロフィライト変質ゾーンとして表される強酸性熱水ゾーンが存在する。これは調査井GO-10(掘削深度1,350m)及びGO-11(掘削深度1,300m)により確認されたもので、pH2台の熱水を噴出するものであった。

第3図には発電所運開以来の発電所総蒸気流量及び熱水流量の履歴を示している。発電所運開初期は熱水量が少なく相対的に蒸気量が多い状態であった。第4図に運開後の鬼首地熱発電所の生産・還元形態の大きな変化を概念的に示すが、前記のとおり発電所建設前の調査で深部に強酸性熱水が存在していることが判明し、調査井GO-11の長期噴出試験で坑井ケーシングパイプに損傷が認められたことから、深部の開発を諦めて浅部の蒸気卓越ゾーンを開発することとなった。そのため発電所運開時の蒸気生産井は全て発電所敷地内における深度230~360m程度の浅い垂直井であり、生産井フィードゾーン周辺の貯留層は二相領域が広がっていたものと考えられる。また熱水還元も生産ゾーンと明確に隔離することなく還元していた。このため、生産流体の平均比エンタルピーの低下と激しい蒸気流量の減衰に直面した。

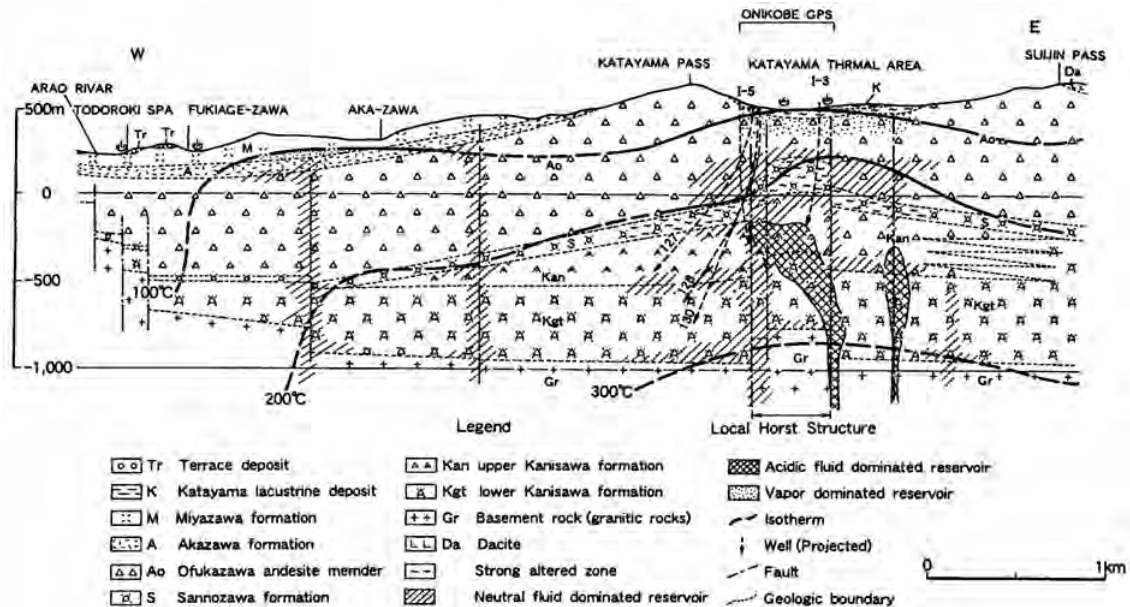
狭い発電所敷地内の浅井戸生産井の追加掘削では、その蒸気量不足を解決できなかったため、敷地外深部に想定された中性の熱水ゾーンを開発することとし、運開5年後の1980年から敷地外の西側への

1) 電源開発株式会社 火力エンジニアリング部
東京都中央区銀座6-15-1

キーワード: 鬼首地熱発電所, 地熱貯留層管理



第1図 鬼首地熱発電所の坑井配置。

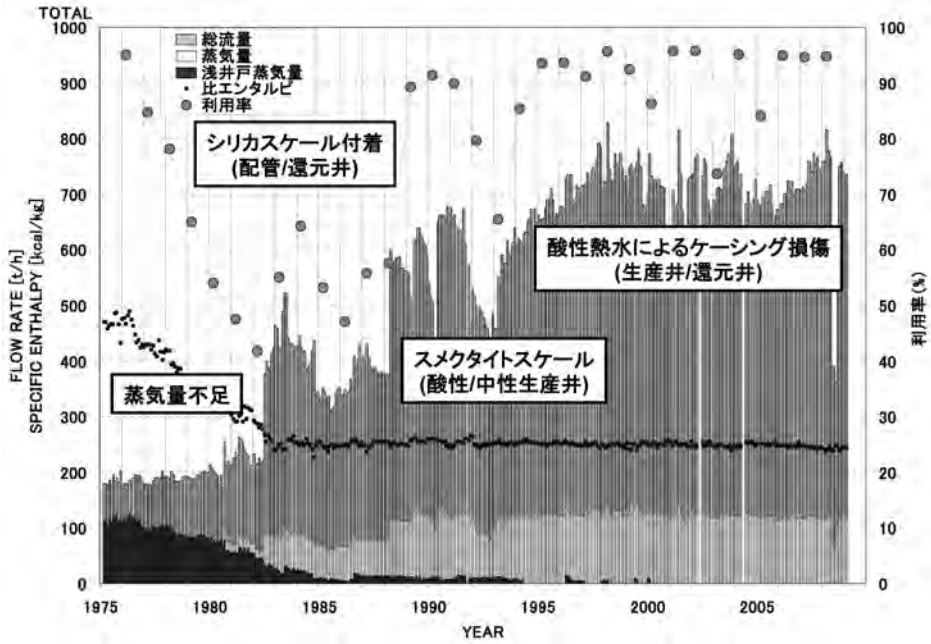


第2図 鬼首地熱発電所の地熱系概念モデル。

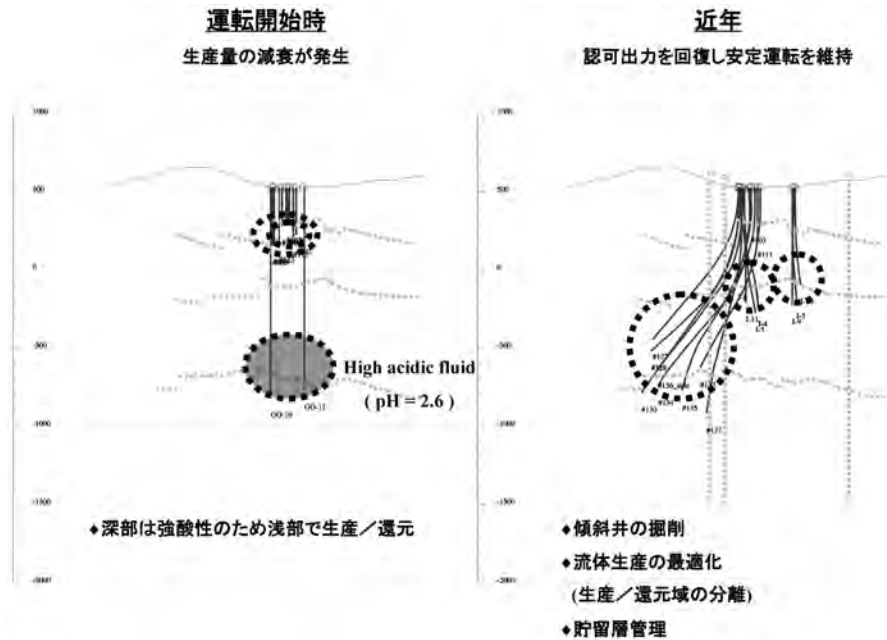
傾斜井による蒸気生産が始まった(山田, 1981)。その後、認可出力12,500kWまでの回復に向けて、また認可出力回復後は蒸気量の減衰に対応して必要蒸気量を確保するため敷地西側に生産補充井を掘削しており、現在では全て西側への傾斜井による蒸気生産となっている。また熱水還元域と生産域をできる限り

分ける貯留層管理・運用を行っている。

西側への傾斜生産井による生産が始まると、生産ゾーンが熱水単相の貯留層であることから、第3図に示すとおり生産流体の気水比も熱水の割合が高くなった。また中性の熱水の産出量が多くなってくると、還元井・熱水配管へのシリカスケール付着が問題と



第3図 鬼首地熱発電所の総蒸気流量及び熱水流量履歴。



第4図 鬼首地熱発電所の生産・還元形態の変遷。

なってきた。この問題に対しては、当初酸性熱水と中性熱水を地上で混合させて中性熱水のpHを下げる試みを行ったが、熱水流量の配分を管理できないことから、場合によっては酸性熱水に溶けていたスケール成分が大量に析出する事態ともなるため、採用を断念した(阿部, 1995)。現在では、中性熱水は高温直接還元とし、酸性熱水と中性熱水は還元熱水配管・還元井共に別ラインにして処理している。

敷地西側への傾斜井が全て中性熱水ゾーンに逢着したわけではなく、生産井によっては酸性熱水ゾーンから蒸気生産しているものもある。第1図に示すとおり、現在は、中性熱水と酸性熱水の流量割合はほぼ1:1である。これまで敷地の西側で多くの補充生産井が掘削されて熱水性状が確認されたこと、及び掘削中のカッティングスの変質鉱物の分析結果も併せて検討評価した結果、現在の西側の生産領域においては酸性熱水分布域と中性熱水分布域が概ね推定できるまでになっている。しかしながら、西側への傾斜生産井が少ない時期においては、新規生産井の掘削の結果、想定外の熱水性状だったという経験もしている。更に、1本の井戸で蒸気量をできる限り多く確保したいということから生産区間を長く設定した生産井において、中性熱水ゾーンと酸性熱水ゾーンの両方からの流体が坑内で混合することによってスメクタイトスケールが析出して坑井閉塞する問題も発生した(Ajima *et al.*, 1998)。この問題に対しては、近年掘削前に生産流体の性状(中性or酸性)がほぼ想定できるようになったことも踏まえて、生産井の最終段生産区間を比較的短く設定することにより対応している。

酸性熱水を産出する生産井や還元処理する還元井において、通常のケーシングパイプを使用している場合、酸性熱水による厳しいエロージョン・コロージョンにより、最終的に坑井維持ができなくなったものもある。この障害の経験を踏まえ、近年、酸性熱水ゾーンを生産井のターゲットとする場合は、蒸気・熱水2相流の流速が速くなる坑井上部区間のケーシングパイプにステンレス鋼管を使用するなどの対応策をとった上で生産井を掘削している。また、酸性熱水還元用の補充還元井を掘削する際にも、一部のケーシングパイプの材質をステンレスに変える等の工夫を実施している。

以上述べたような様々な貯留層管理上の困難な課題に対して、その都度対処してきて得られた知見を踏

まえ、ここ20年程度は高い設備利用率での発電所運転実績となっている(第3図参照)。しかしながら未だ地下の状況が完全に判っているとは言い難く、鬼首地域で特有の酸性熱水・中性熱水の地下での混合、岩石水反応(鉱物の溶解・析出)について解析・検討(Todaka *et al.*, 2004)する等、鬼首地熱系の更なる理解の進展を図っているものである。

3. 鬼首地熱発電所の貯留層管理

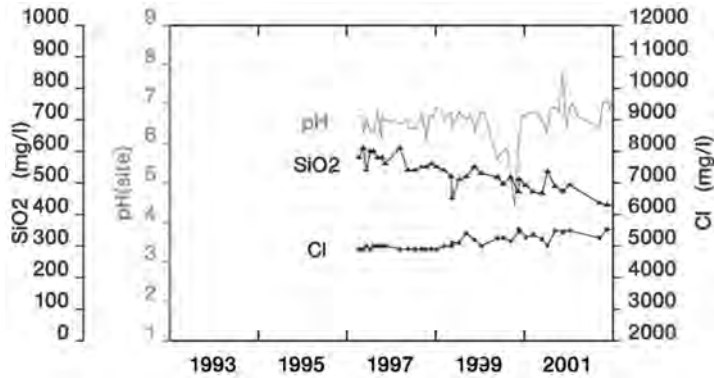
(1) 貯留層管理の基本的考え

一般に、地熱発電所運転開始以降の生産・還元の継続、及び鬼首のような生産・還元形態の変化等に伴って、貯留層の状態は変動する。各種モニタリングにより、その変動をできる限り把握して、効率的(コストミニマム)に発電出力の安定・維持を図ることが貯留層管理の基本と考えている。

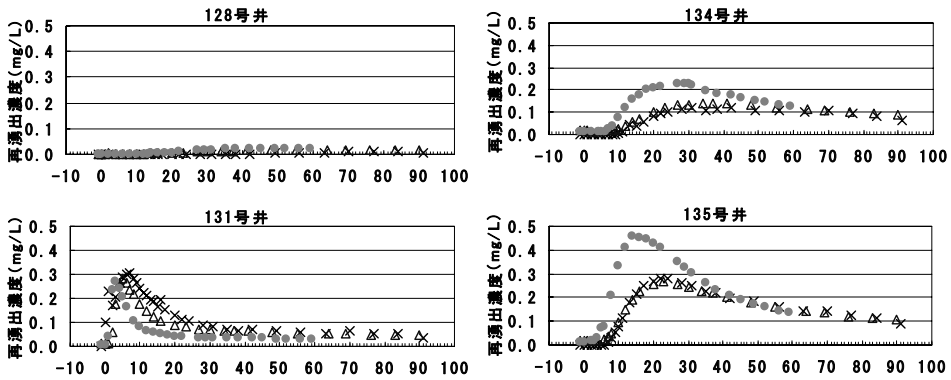
一般的に想定される大きな貯留層の変動としては、生産域の圧力低下と蒸気・熱水2相領域の拡大、その究極としての貯留層のドライ化、還元熱水の生産域への直接的浸入による生産流体の温度低下、及び生産域の圧力低下に伴う周辺からの冷水の浸入による温度低下等が考えられる。このうち、鬼首地熱に関連しては、運開初期における比較的狭い敷地内の多くの浅井戸生産井による蒸気生産の期間では、生産域の圧力低下が引き起こした事象により急激に蒸気量が減衰したものと考えられる。一方、主生産域を敷地の西側に变化させた後では、比較的狭い敷地範囲内で生産井・還元井の坑口位置が制約された中での生産井・還元井配置とせざるを得ないことから、できる限り生産域と還元域を切り分けているといえども、還元熱水の生産井への混入による温度低下・水質変化は避けられない状況にある。従って、現在は還元熱水の挙動と生産井流体の温度低下・水質変化に特に注意しながら貯留層管理を行っているところである。モニタリング等で貯留層の変動を把握しつつ、対応としては①補充井の掘削位置の選定(最適化)及び②還元量(生産量)の適正配分を図っている状況である。

(2) モニタリング項目

鬼首地熱発電所においては、生産井ごとにセパレータが設置されているため、生産量・坑口圧力等の



第5図 生産井135号井の化学成分モニタリング(例示).



トレーサー濃度経時変化図(I-4)

- 2008年度: 1,5-ナフタレンスルホン酸二ナトリウム: 300kg
 - △ 2007年度: 1,5-ナフタレンスルホン酸二ナトリウム: 300kg
 - × 2004年度: トルエンスルホン酸ナトリウム: 472kg
- (トルエンスルホン酸Naの再湧出濃度を300/472とし、投入量補正を行っている)

第6図 トレーサ試験結果(投入: I4).

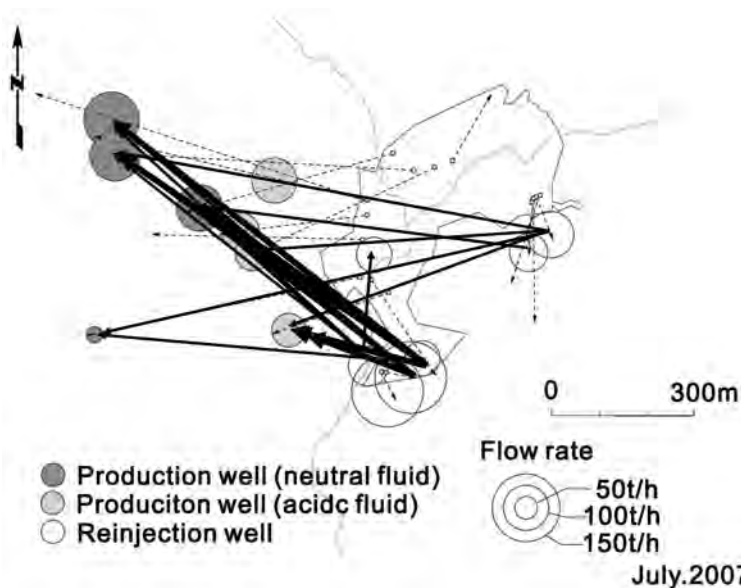
データは生産井ごとに取得されている(高温直接還元している中性熱水産出井の熱水流量は1回/年の測定). 還元量も、高温直接還元している還元井以外の熱水量は適宜測定されている。また、各生産井の噴出流体の化学成分変動については、主要成分は1回/月分析しており、2回/年は熱水・蒸気・凝縮水の化学成分・同位体の分析を行っている。第5図に生産井135号井の化学成分モニタリングの一例を示す。様々な熱水成分のこのような経時変化プロットにより、還元熱水の影響の程度等が把握できている。

また、鬼首地熱発電所では定期点検時は全ての坑井を停止させており、その時各坑井の温度・圧力検

層や還元井の注水試験(還元能力試験), あるいはキャリパー検層等の坑内調査を必要に応じて実施している。これらのモニタリングや坑内調査データは、貯留層管理・運用のために必要不可欠なものである。

(3) トレーサ試験

前述のとおり、鬼首地熱発電所の生産域と還元域の間隔はそれ程は離れていないため、還元熱水の生産井への影響度合いの把握が重要な課題となっている。運開以来35年の中で生産井・還元井配置を変化させてきたこともあり、鬼首地域においてはこれまで多くのトレーサ試験が実施されてきた。検出感度が高



第7図
トレーサ試験結果集約図。

いこと、試薬の価格が比較的安いこと、複数の試薬で同時に試験可能なこと等の理由で、最近では、芳香族化合物のトレーサ試薬を用いた試験を行っている。

第6図に還元井I-4に投入したトレーサの幾つかの生産井への再湧出の結果を示す。複数の年度で同じ還元井を使ったトレーサ試験も実施しているが、第6図では、還元井I-4の熱水は生産井128号井には殆ど影響していないことが判る。一方、131号井については複数年度で影響度合いはあまり変わらず、135号井ではI-4還元熱水の影響は2004年度と2007年度は変化がないが、2008年度では再湧出率が增大していることが窺える。第7図には、これまで実施したトレーサ試験を集約したものを示す。還元井と生産井の繋がりにより線の太さを変えているが、概略的には、敷地南部の還元井群からの熱水の西側生産井への影響が卓越しており、東側還元井の生産井への影響は大きなものではないことを示している。様々な還元井を用いたトレーサ試験の結果を集約することにより、生産井の総生産量の中での各還元井熱水の混入割合も概略明らかとなっている。これにより、還元熱水の場所の再配分等を行い、極力貯留層の生産能力を保つようにしている。

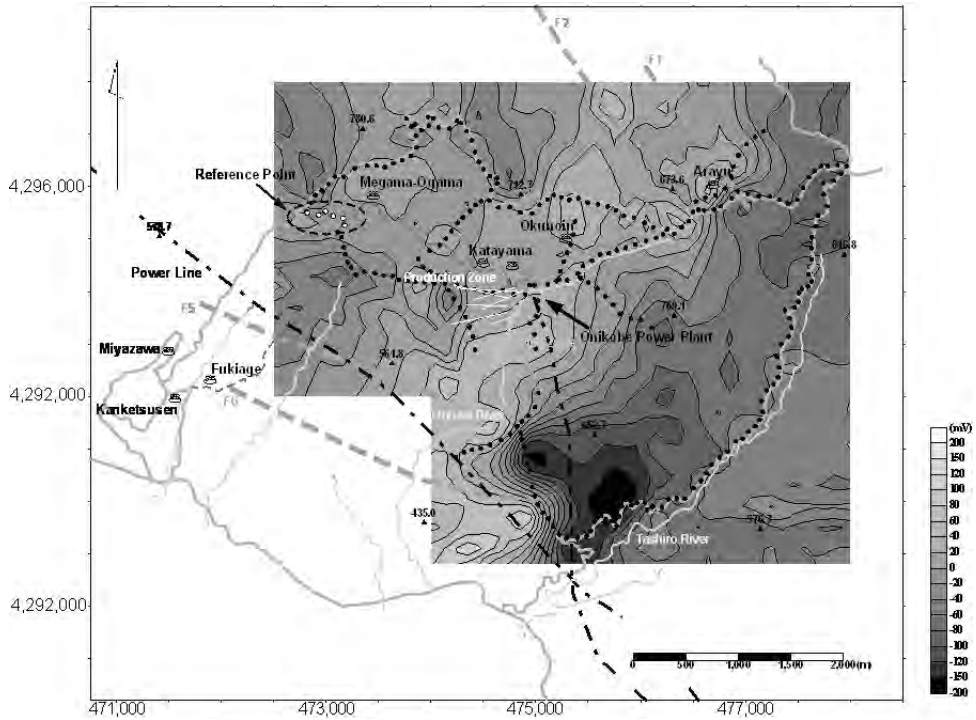
なお近年、前記の地化学成分モニタリングの結果を総合的に評価して還元熱水の影響を検討するため、多変量解析の一手法である主成分分析を実施している。究極的にはトレーサ試験を実施しなくても、

地化学モニタリングデータの解析により、トレーサ試験で得られる情報と同等の還元熱水の影響に係る検討ができることを志向している。

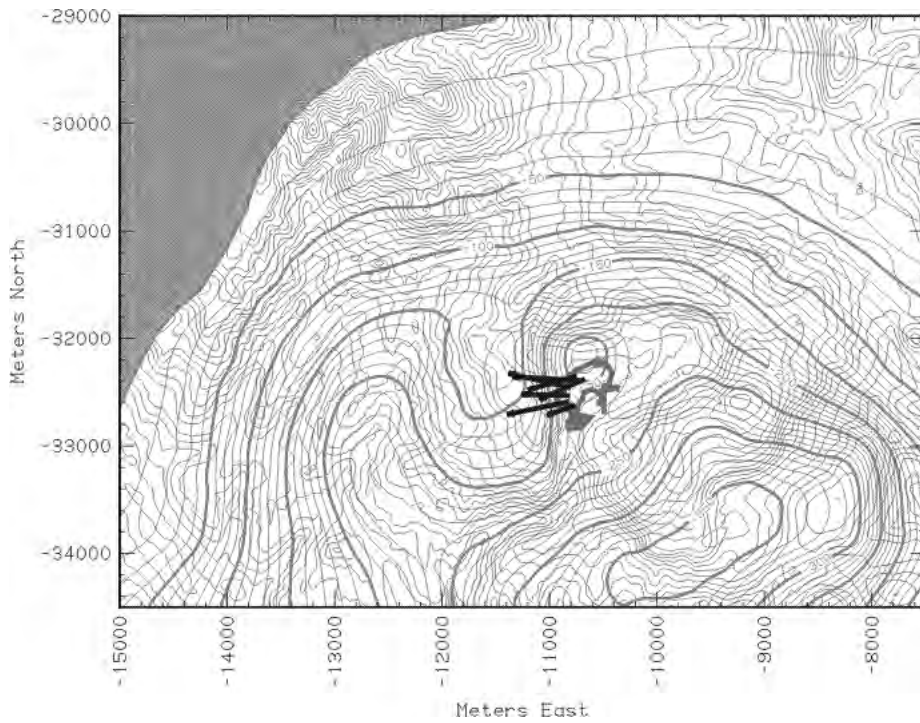
(4) 自然電位モニタリング

NEDOの貯留層変動探査法開発の中で、自然電位モニタリングの研究開発も行われたが、鬼首地熱発電所においても、自然電位モニタリングを試験的に実施した。第8図に1982年(発電所運転開始7年後:産業技術総合研究所実施)と2000年(運転開始25年後:電源開発(株)実施)との18年間の自然電位分布の変化(自然電位変動)、及び貯留層モデルに基づき自然電位ポストプロセッサで計算した自然電位変動分布を示す。両者は共に発電所の生産・還元領域を含む地域で自然電位の増加を示し、発電所南部で大きな自然電位の減少を示しており、概ね変動分布傾向に整合性がある。従って、自然電位モニタリングは数値モデルの妥当性の検証に利用できる可能性がある。一方、自然電位ポストプロセッサで計算された発電所定期点検のための短期間の生産停止/再開に伴う自然電位の変化は実測値よりも数倍～十数倍大きなものであった(Akasaka et al., 2003)。

鬼首地熱発電所では、このような地球物理学的モニタリングについて運開前のバックグラウンド測定値がないこと、生産・還元が比較的狭い地域で密集していること等の影響で、運開後30年弱経過した後の



a



b

第8図 自然電位変動分布の実測値(a)とシミュレーション結果(b).

モニタリングではなかなか明確な成果は上がらなかったものと考えている。地球物理学的モニタリングを含む貯留層変動探査技術の今後の研究開発に大いに期待するものである。

4. おわりに

本報告では、鬼首地熱発電所の生産・還元を経緯と、地熱貯留層管理の現況について述べた。

鬼首地熱発電所は、強酸性と中性の液性の極端に異なる熱水が狭い範囲内で存在しているという極めて特異な特徴を有しており、開発当初はこのことが直接的・間接的に原因となる様々な問題に直面し、貯留層管理上困難な課題も多かった。近年は安定した定格出力運転を継続している。一方、比較的狭い範囲内で運開以来約35年生産・還元を継続してきたことから、近年は西側生産域への還元熱水の熱的影響(冷却フロントの進行)が顕在化しつつある。

また、鬼首地域は数枚の卓越する断裂のみが貯留層となっているものではなく、比較的広がって断裂が発達している地域と考えているが、残念ながら実際の不均質な断裂分布が明確に把握されているわけではない。この断裂分布把握については、的確な地熱貯留層管理のためにも、また発電出力維持のための適正な補充井掘削仕様決定のためにも、重要な研究開発すべき課題と考えられる。

鬼首地熱発電所においては、これまで坑井が掘削されていなかった敷地東側に有望な貯留層(断裂)が確認できたことから、東側での新規生産井1本の追加による12,500kWから15,000kWへの増出力が計画され、平成22年2月5日に増出力営業運転が開始された。今後は、この15,000kWの安定運転のために、より一層緻密な貯留層管理が必要と考える。断裂の明確な把握のための探査技術と貯留層変動モニタリング技術のより一層の研究開発が望まれるところである。

引用文献

- 阿部 信・原田 円(1985):鬼首地熱発電所における反射法地震探査:ミニソーシー法,物理探鉱,38, No.5, 47-60.
- 阿部 信・中西繁隆・三島敦夫・藤田吉章(1989):鬼首地熱発電所の運転と貯留層管理,地熱,26, 165-191.
- Abe, M. (1993): Long term use of acidic reservoir at Onikobe geothermal power plant, Proceedings 15th NZ Geothermal Workshop, 5-10.
- 阿部 信(1995):酸性熱水とアルカリ性熱水の混合について-鬼首地熱発電所における熱水混合法によるスケール析出抑制試験結果-,地熱エネルギー,21, 364-380.
- Ajima, S., Todaka, N. and Muratake, H. (1998): An interpretation of smectite precipitation in production wells caused by the mixing of different geothermal fluids, Proceedings of 23rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, SGP-TR-158, 264-269.
- Akasaka, C., Nakanishi, S., Tezuka, S., Ishido, T. and Pritchett, J. W. (2003): Using Self-Potential Monitoring to Help Characterize the Onikobe Geothermal Reservoir in Japan, 2003, Stanford Geothermal Workshop.
- Akasaka, C., Nakanishi, S., Todaka, N. and Tezuka, S. (2001): Twenty-six years of sustained operations at the Onikobe geothermal power plant, Japan, Geothermal Resources Council Transactions, 25, 719-723.
- 一杉武治(1976):鬼首における地熱探査について,物理探鉱,29, 89-96.
- Todaka, N., Akasaka, C., Xu, T. and Pruess, K. (2004): Reactive geochemical transport simulations to study the formation mechanism of an impermeable barrier between acidic and neutral fluid zones in the Onikobe geothermal field, Japan. Journal of Geophysical Research, 109, B05209.
- 山田 守(1981):鬼首地熱発電所の現況,地熱技術,6, No.1&2, 39-47.

NAKANISHI Shigetaka (2010): Reservoir management on the Onikobe geothermal reservoir.

<受付:2010年7月27日>