

地熱地帯での自然電位測定

当舎利行、石戸経士、松島喜雄、安川香澄

(地質調査所)

On self-potential measurements in the geothermal fields

Toshiyuki Tosha, Tsuneo Ishido, Nobuo Matsushima, and Kasumi Yasukawa

(Geological Survey of Japan)

1. はじめに

地熱発電所の稼働している地熱地帯では、環境影響や地熱貯留層の維持管理のために各種モニタリングが実施されている。それらモニタリングにて得られたデータは、地形図上に図示して他のデータなどと比較検討を重ねるといった解析方法が一般的に取られてきた。近年、数値モデルを元としたコンピューターによる地熱貯留層シミュレーションが行われるようになり、地熱貯留層の将来にわたる挙動の予測や生産管理を行うことが可能となってきた。モニタリングデータはこのような数値モデルへの制約条件としても有用であり、今後ますます重要性が増大していると思われる。

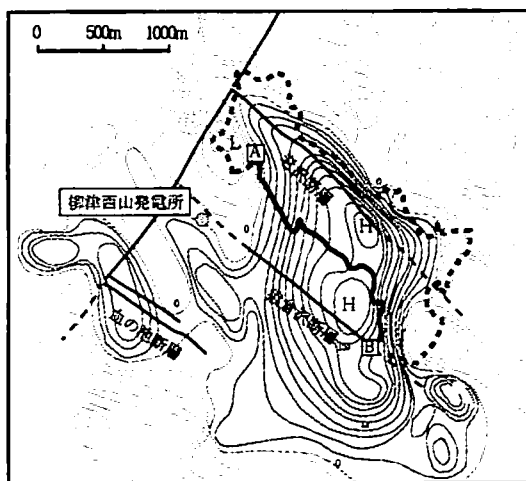
自然電位 (SP) 測定は、比較的簡便な探査手法として70年代後半から各地の地熱地帯で実施されてきた。地熱地帯では通常顕著なSP異常が存在することが知られており、このSP異常の発生原因としてもっとも有力なものが界面動電現象である。界面動電現象のゼータ電位が高温下で負の値を取る場合、地下からの熱水の上昇により地表では正の異常域を作り出す(石戸、1981)。このため、多くの地熱地域では正の異常域が報告されている。本報告では、2つの地熱地域での最近の観測結果を報告するとともに、その観測結果を説明する数値シミュレーションについて述べる。

2. 地熱地帯での観測例(1)奥会津

奥会津地熱地帯は、福島県会津若松市の西南西約20kmのところにある地熱地帯で、東北電力柳津西山地熱発電所が1995年5月から出力65,000KWでの発電を行っている。地熱流体は、北西-南東系の断層群である猿倉沢および血の池沢断層により深部に形成された貯留層から採取されている。この奥会津地熱地帯では、発電所建設以前の調査段階(1982,83年)にNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)によりSP

調査が実施されている。このSP調査では、現在の地熱流体の生産ゾーンである猿倉沢ならびに血の池沢断層沿いに広がる正の異常域が報告されている。特に、猿倉沢断層沿いの正異常域は南北3km、東西1.5kmの菱形を呈し110mVに及ぶ大きな正異常である(第1図)。この異常域は、地熱貯留層を含む範囲にほぼ一致し、熱水流動による流動電位によるものとされた(新田ほか、1987)。

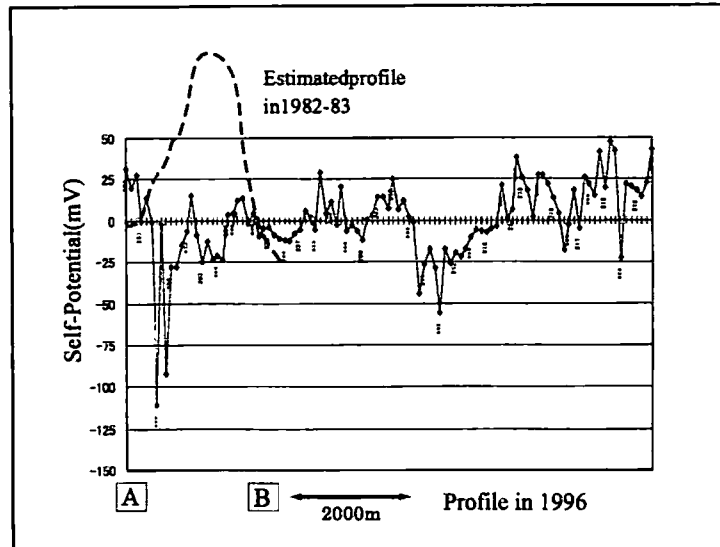
地熱地帯では、発電所の運転開始に伴って地下の流動の変化や二相ゾーンの拡大が発生し、自然電位の分布に変化が期待される。奥会津地熱地帯において、運転開始以前にみられたこの大きな正異常が発電所の運転開始による熱水の汲み上げに伴ってどのように変化したかを求める目的で、1996と98年にSP調査を実施した。SPの分布を調



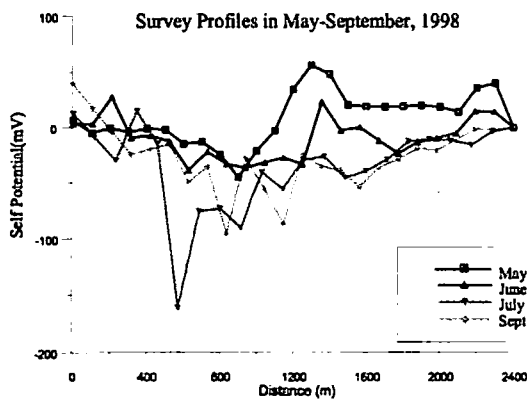
第1図 奥会津地熱地帯での運転開始以前のSP分布と運転開始以後の閉ループ測線

べる分布調査では、なるべく小さな閉ループを重ね合わせて測定範囲を広げていくことが、電極のドリフトなどの測定上問題となる閉合誤差を最小にする手段である。しかし、同地熱地域では小さなループを閉合させることが地形的に困難であったため、大きな正異常を横切る閉ループについて測線を設定した(第1図)。測線長は約12kmである。

第1図のA点から反時計回りにSPを測定したときの結果を第2図に示す。A点から600mならびに800mの測定点では大きな負のSP測定結果となっている。この測定地点付近では熱水供給用のパイプが通っており、大きな負の異常はこの熱水供給パイプの影響と考えられる。このパイプの影響を除くと82-83年当時大きな正の異常が観測された領域では正の異常は測定されずゼロ付近を推移している。このような生産開始に伴うSPの減少は、浅部に熱水・蒸気の二相ゾーンが発達している貯留層内での蒸気相の発達に伴う液相の下降流によるものと考えられる。



第2図 1996年の閉ループSP調査。点線は82-83年の分布調査の結果



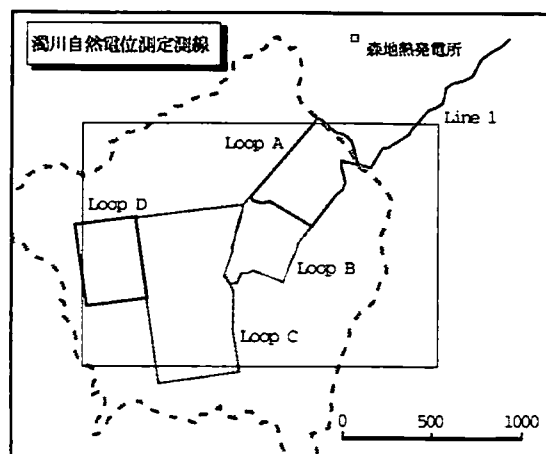
第3図 奥会津地熱地帯での98年5,6,7,9月の繰り返し測定結果

96年測定と同じ閉測線ならびに測線の一部について98年5,6,7,9月に繰り返し測定を行った。98年5月は、柳津西山地熱発電所が2ヶ月の定期点検が終了した時期に当たっており、停止していた熱水生産が開始された。閉ループ測線の一部第2図上A点からB点までの98年の繰り返し測定の測定結果を第3図に示す。第3図のほぼ全点が82-83年当時正の異常域であった。同図左半分の測定点での結果は、熱水輸送パイプなどの人工構造物の影響で、熱水生産開始後の変化がそれほど顕著には現れていない。これに対し、図右側の測定点の結果では、5月に50mVほどあった正の異常が時間が経つに従って減少をしていったことが読みとれる。

3. 地熱地帯での観測例(2)濁川

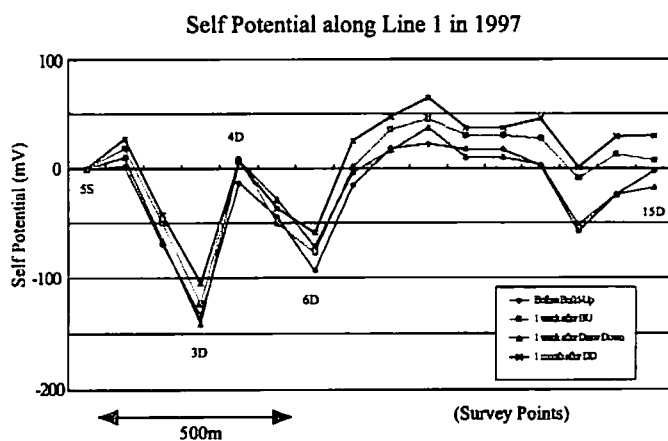
濁川地熱地帯は、北海道の南西部、茅部郡森町にあり、北海道電力森地熱発電所が1982年から出力50,000KWにて発電を行っている。この濁川地熱地帯は、直径約3km小型クレーターのカルデラ内に発達している。このカルデラ内での熱水流動は、ボーリング孔がカルデラ内部から外部の第三系に入った直後に逸泥があること(安藤、1983)や開口性鉱物脈がカルデラ壁周辺部およびカルデラ外部の特定の地層中からみられること(赤澤ほか、1993)ならびに温泉の温源がカルデラの北半分に分布しその中でも自然湧水の温泉がカルデラ北壁に沿って分布すること(浦上・西田、1977)などからカルデラ内北半分の壁面に発達していることが推定されている。濁川地熱地帯では発電所の運転開始を挟んで1988年まで複数回のSP調査がなされており、カルデラ内、特に北半分で正の異常が観測されている(Ishido et al., 1989)。その後、1996年から発電所の定

期点検にあわせて分布測定を実施した（安川ほか、1998）。盆地内は人工物等が多くそれらがノイズ源となるが、盆地から海岸へ抜ける道路沿いに基準測線（Line 1; 第4図）を設定し、その測線上のSP値は坑井の操作による影響が及ばないものと仮定した。事実、観測期間中にこの測線にて観測したSP変化のパターンはどれも似通っており、測定開始点（S5）を基準としたためのオフセットのみであった（第5図）。また、基準測線 Line 1 を測定した 97 年と 98 年では SP 変化のパターンは類似していた。したがって、この測線では盆地での坑井操作などによる貯留層変動による SP 変化が少ないと推定できる。第5図の地点 3D ならびに 6D では大きな負異常となっているが、これはこれらの測点が酸性変質帯上に設定されたためと考えられる。



第4図 濁川地熱地帯でのSP測定測線。
四角の枠は空間分布の解析表示範囲

Line 1 上の測点 4D から 15D の間の測定点について、4 回の測定値の差が最小となるように補正項を計算し、他の盆地内測定に補正を施した。閉合ループ A, B, C, D（第4図）の測定結果から解析領域内を 10×10 の小領域に分けて各時期の SP 空間分布を求めた（第6図）。第6(a)図は、井戸の操作を行っていない状態での SP 分布であるが、発電所が運転を開始して2年後の84年の分布調査でも同様の分布が得られている（Ishido et al., 1989）ことから、発電所の運転が行われ蒸気生産が定常的に実施されている時の SP 分布と考えることができる。40mV の正異常の付近には、熱水を汲み上げる生産井基地があり、生産に伴って発生した正異常と考えることができる。これに対し、この熱水生産を停止すると地熱流体生産域での正異常は小さくなり、反対に盆地西側での正異常が見え始める（第6(b)図）。この傾向は、運転再開後もしばらく続くものの（第6(c)図）1ヶ月くらい経過すると、第6(a)図に見られるような定常的な分布に近くなっていく（第6(d)図）。濁川地熱地帯での SP 観測は、発電所運転開始に伴う長期的な熱水流動変化を捕らえるのみならず比較的短期間の熱水流動変化に対しても有用な情報をもたらすものと期待される。

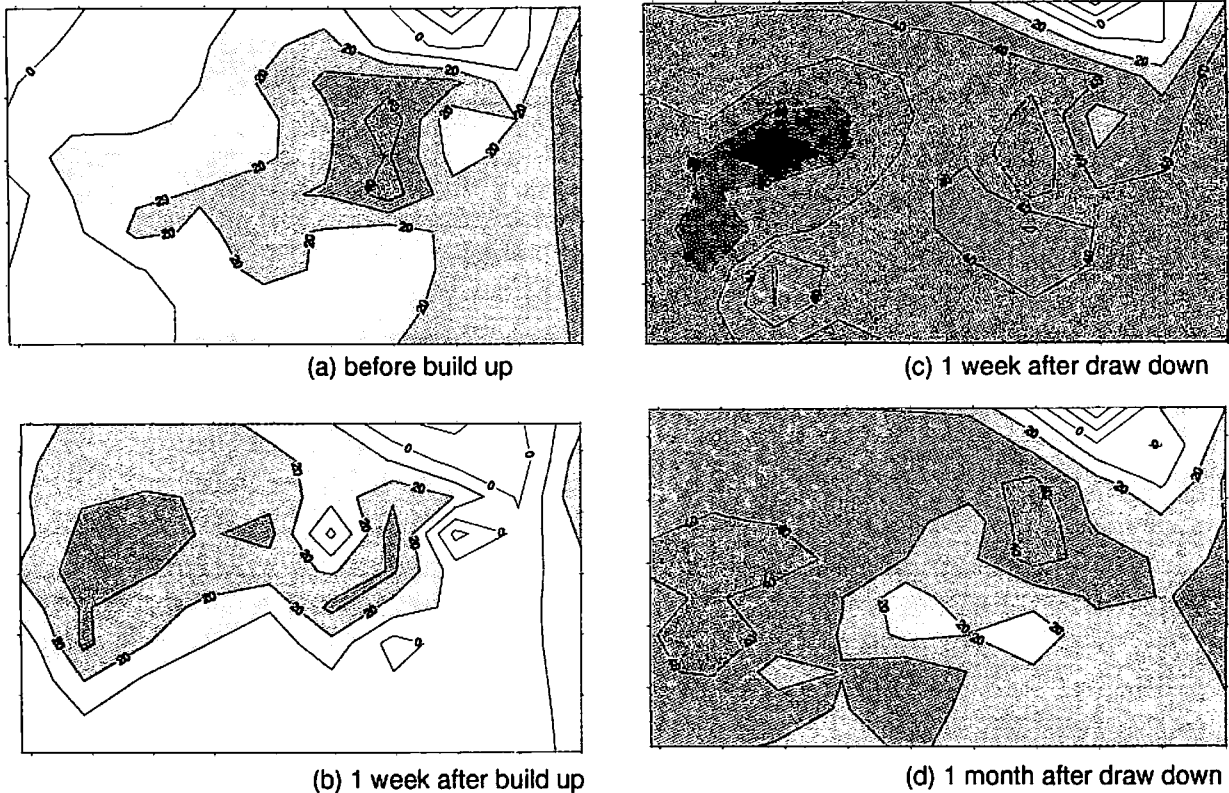


第5図 基準測線（Line1; 第5図）での繰り返しSP測定結果

4. 数値モデルによる解析

短期的な地下の熱水流動変化による SP 変化も地表の観測により捕らえられることが判明したので、数値モデルによる数値実験を行った。地熱地帯に発生する SP 異常の原因としてもっとも有力なものは、地下の熱水が流動する事による界面動電現象である。地下の流体流動シミュレーターの結果を用いて界面動電現象による電場を計算するには、ポストプロセッサを用いる（Ishido and Pritchett, 1996）。この界面動電現象における基本方程式は、次の二つの式で表される。

Self Potential distribution with 10 x 10 mesh (exc. B17)



第6図 97年のSP分布測定の結果。範囲は第5図の実線枠内

- (a) 発電所の定期点検前
- (b) 点検のため坑井を閉じて1週間後
- (c) 坑井を再開して1週間後
- (d) 坑井を再開して1ヶ月後

$$I = -Lee\nabla\phi - Lev\nabla\xi$$

$$J = -Lve\nabla\phi - Lvv\nabla\xi$$

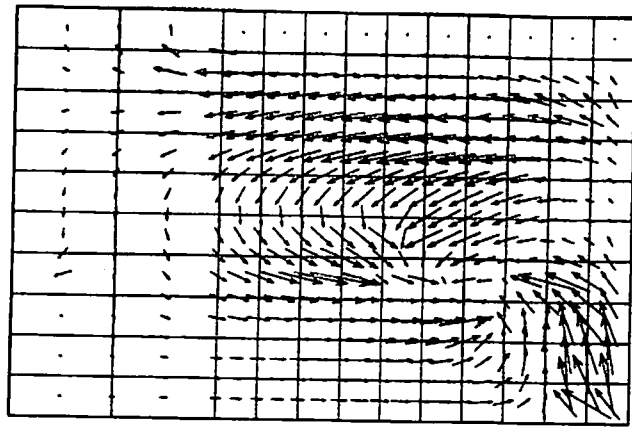
ここで、 I は電流密度、 J は体積流量密度であり、 $\nabla\phi$ は電位勾配、 $\nabla\xi$ は流体の駆動力（間隙圧勾配）である。第1式右辺の第1項はオームの法則に相当し、第2式右辺の第2項はダルシー則に相当する。通常の地質条件では電位勾配に比例する流体の流れは無視しうるので、第2式右辺の第1項は省略できる。したがって、第1式と第2式を連立させて解く必要はなく、第2式のダルシー則を流体流動シミュレーターによって解いて第1式に当てはめればよい。また、第1式の第1項を伝導電流 (I_{cond})、第2項を携帯電流 (I_{drag}) と呼ぶが、解析領域で電荷の保存則 ($\nabla I = 0$) を適用すれば、伝導電流について、

$$\nabla \cdot I_{cond} = \nabla(-Lee\nabla\phi) = -\nabla \cdot I_{drag}$$

が成り立つ。右辺の I_{drag} の分布がわかれば、電位 ϕ はこのポアソン方程式を解くことで求められる。

幅 500mの縦型高透水性の岩石層（断層系の貯留層）の深部から熱水が供給され、キャップロック（帽岩；透水性が低い）下に熱が蓄積してゆき地熱貯留層を形成するという数値モデルを考える。熱水の上昇流は、一部は側方から系外へと逃げるものの多くはキャップロック下に熱を有効

に運搬し、やがて蒸気層を形成する。この状態では地表でのSP分布はすべて正異常となり、これが、この地熱系での自然状態となっている。この状態を初期状態として、ある深度で地熱熱水を取り出して発電を開始する。第7図は、発電を開始してから1.2年後の貯留層内の熱水流動である。生産井に集中する流れが卓越し、また、キャップロック下では2相ゾーンが広がり蒸気相の形成とともに液相が下方に移動する。このため地表でのSPは急激に減少する。このような状態で運転が続いた後に、定期点検のため坑井からの熱水の生産が停止されると貯留層内では液相の下降流が弱まり、それに伴ったSP変化が地表で観測される。第8図はこの数値モデルにて運転開始1.2年後に坑井からの熱水生産を停止し、0.25年後（3ヶ月後）に運転を再開したときに、地表で現れるSP変化を明示したものである。この計算結果から、発電所の運転開始に伴って急激に正のSP異常値が減少すること、並びに、定期点検時の生産の停止に伴って40mV程度のSP上昇が予想される。数値モデルのパラメータを調節することにより、奥会津地熱地帯で観測されたSP分布の変化を説明できるものと期待される。濁川地熱地域の数値モデルは、同地熱地域がカルデラ構造を呈することから奥会津地域と異なる数値モデルの適用が必要となる。しかし、観測されたSP変化を説明することは十分可能と考えられる。

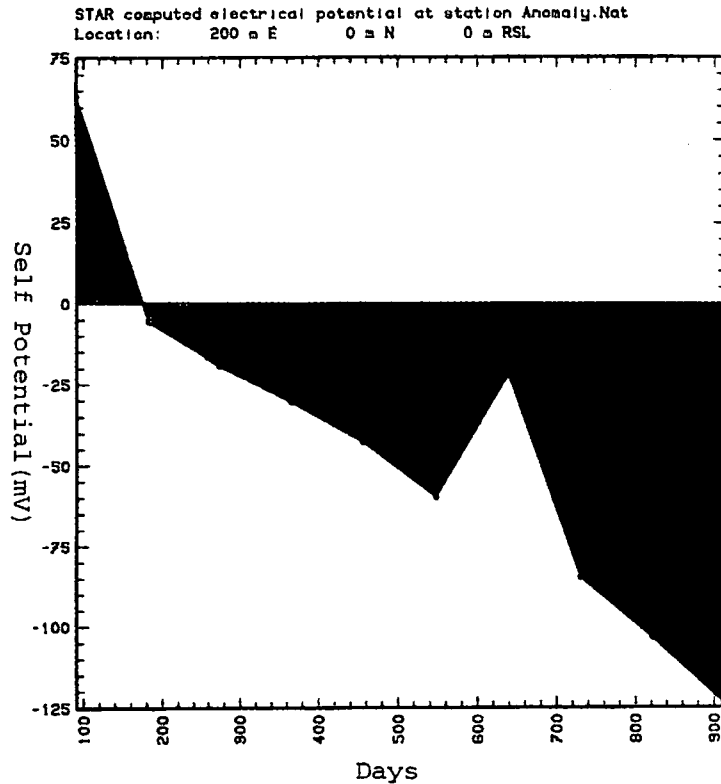


第7図 発電所運転開始から1.2年後の流動パターン

第8図はこの数値モデルにて運転開始1.2年後に坑井からの熱水生産を停止し、0.25年後（3ヶ月後）に運転を再開したときに、地表で現れるSP変化を明示したものである。この計算結果から、発電所の運転開始に伴って急激に正のSP異常値が減少すること、並びに、定期点検時の生産の停止に伴って40mV程度のSP上昇が予想される。数値モデルのパラメータを調節することにより、奥会津地熱地帯で観測されたSP分布の変化を説明できるものと期待される。濁川地熱地域の数値モデルは、同地熱地域がカルデラ構造を呈することから奥会津地域と異なる数値モデルの適用が必要となる。しかし、観測されたSP変化を説明することは十分可能と考えられる。

5. 問題点とまとめ

これまで、地熱地帯でのSP分布観測ということで、地質調査所におけるSP観測のうち2カ所の事例について述べた。調査所では、これらの地域以外でも、八幡平（菊地ほか、1987）、澄川（松島ほか、1999）などの地熱地帯や青ヶ島（西ほか、1998）、ロシア・ムトノフスキー（松島ほか、1997）など様々な地点での測定を実施して測定例やノウハウの蓄積を行っている。短期的な井戸の操作に伴うSP変化を観測することにより貯留層の数値モデルに対する新たな制約を与えることになるので、SP分布の繰り返し測定に加えて連続観測も実施する計画である。このためには、長期間安定した電位を測定できる連続観測用の電極の開発は急務と考える。また、分布観測でも測点周囲の土壌や環境などの影響により電位が不安定であったり、電位勾配が大きく数mの位置の変化で大きな変化となって記録される場所などがあるため、より信頼性の高いSPデータを取る工夫が必要となる。分布調査を実施する上での問題点としては、(1)人工構造物、(2)酸性変質帯、(3)降雨、(4)地電流などが上げられる。このうち(1)については、パイプラインや坑井近傍で酸化還元電位による大きな負電位が観測されるので積極的にこれらの構造物の近くをさけることが必要となるが、整地した道路際や電柱の周りなど予期しないところで影響が現れる場合がある。また、(4)の地電流などの影響を評価する上でも、電位とともに磁場の連続的なモニターが今後必要となってくる。



第8図 モデル計算によるSP変化

参考文献

赤澤司史・黒墨秀行・小松亮・伝法谷宣洋、1993. 森地熱地帯におけるフラクチャーについて。日本地熱学会平成5年学術講演会講演要旨集、A4。

安藤重幸、1983. ボーリング結果から見た濁川カルデラの構造。月刊地球、5, 116。

石戸経士・菊池恒夫・杉原光彦・松島喜雄、1997. 地熱貯留層のSPモニタリング。地熱、34, 1。

Ishido, T. and Pritchett, J.W., 1996. Numerical Simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow, In Proc. 21st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ., 143.

Ishido, T., Kikuchi, T., and Sugihara, M., 1989. Mapping thermally driven upflows by the self potential method, In Hydrogeological Regimes and their subsurface thermal effects, Geophys. Monogra., 47, IUGG vol2, 151.

菊池恒夫・杉原光彦・石戸経士、1987. 八幡平・焼山周辺の自然電位、地調報告、266, 533。

松島喜雄・当舍利行・石戸経士・Delemen, I・Kiryukhin, A, 1997. カムチャッカ半島ムトノフスキーでの地熱井周辺の自然電位モニタリング、地熱学会誌、19, 157。

松島喜雄・石戸経士・菊池恒夫・矢野雄策、1999. 澄川地域における自然電位繰り返し測定。準備中。

西祐司・石戸経士・松島喜雄、1998. 自然電位データに基づいた青ヶ島火山の地熱系シミュレーション。地熱学会誌、20, 139。

新田富弥・寿賀祥五・塚越重明・安達正敏、1987. 福島県奥会津地域の地熱資源について。地熱、24, 26。

浦上晃一・西田泰典、1977. 全国地熱基礎調査 駒ヶ岳北部地域法熱量調査物理探査報告。地調月報、28, 1。

安川香澄・松島喜雄・菊池恒夫・石戸経士・桑野恭・鈴木巖・高橋昌宏、1998. 濁川地域の自然電位分布の変動について。日本地熱学会平成10年学術講演会講演要旨集、3-23。