

CO₂ 地中貯留における自然電位と比抵抗観測(予備実験)

當舎 利行・石戸 経士・高倉 伸一 (産総研)

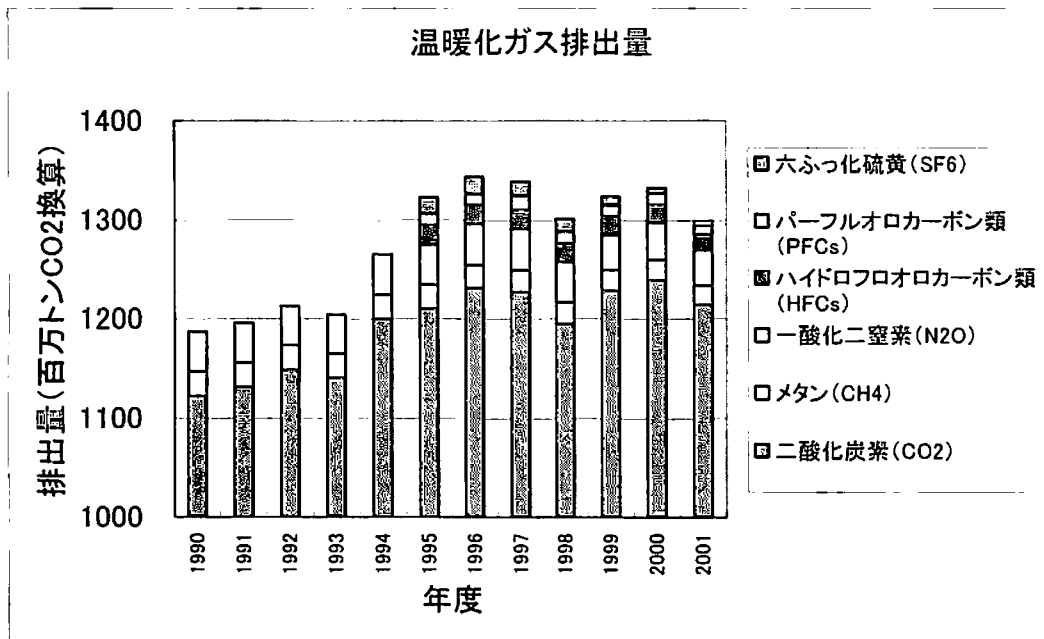
Monitoring for the geological CO₂ sequestration

by using SP and resistivity measurements; preliminary experiments

T.Tosha, T.Ishido, and S.Takakura (AIST/GSJ)

1. はじめに

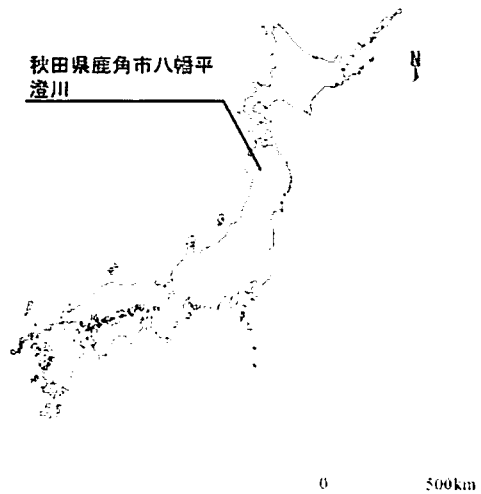
地球温暖化ガス(二酸化炭素を含めて6種類)の排出による地球規模の気温の上昇という地球環境問題が、大きな問題となっている。この気温上昇は、産業革命以降の急激な温暖化ガス排出率の増大がその原因とされており、1997年に提示された京都規定書では、1990年時の温暖化ガス排出量の6%(二酸化炭素換算にて約7千万トン)の削減を我が国の排出規制として求めている。2001年度の温暖化ガスは2000年度より2.5%の減少となったものの、基準年である1990年の排出量と比べると5.2%の増加となっており(第1図;環境省、2003)、京都メカニズムによる森林による吸収や排出権取引による削減を考慮しても、議定書が削減実施予定期日として定めている2008年から2013年までに削減目標を達成するには、新技術を用いた削減計画に対して抜本的な対策が必要とされている。



第1図. 地球温暖化ガスの排出量

このような状況の中、帯水層への地中貯留が、従来から石油など行われているEOR(2次回収)技術の延長として温暖化ガス地中貯留の技術的な目標を達成する最短の方法と考えられており、新潟県長岡市の帝国石油岩野原基地にて圧入試験が続けられている。この圧入試験では、一時中断の時期はあるものの、2003年6月より2004年9月頃までの予定で地表から約1,000mの帯水層に超臨界状態の二酸化炭素を圧入している。この圧入実験では、弾性波トモグラフィが圧入試験時のモニタリング方法として予定されており、電磁気的手法は、比抵抗検層が数回行われるもの、モニタリング手法としては実施予定とはなっていない。二酸化炭素地中貯留時の効果的なモニタリング計画を電磁気学的手法も含めて立案するために、浅い実験井に空気を圧入すること

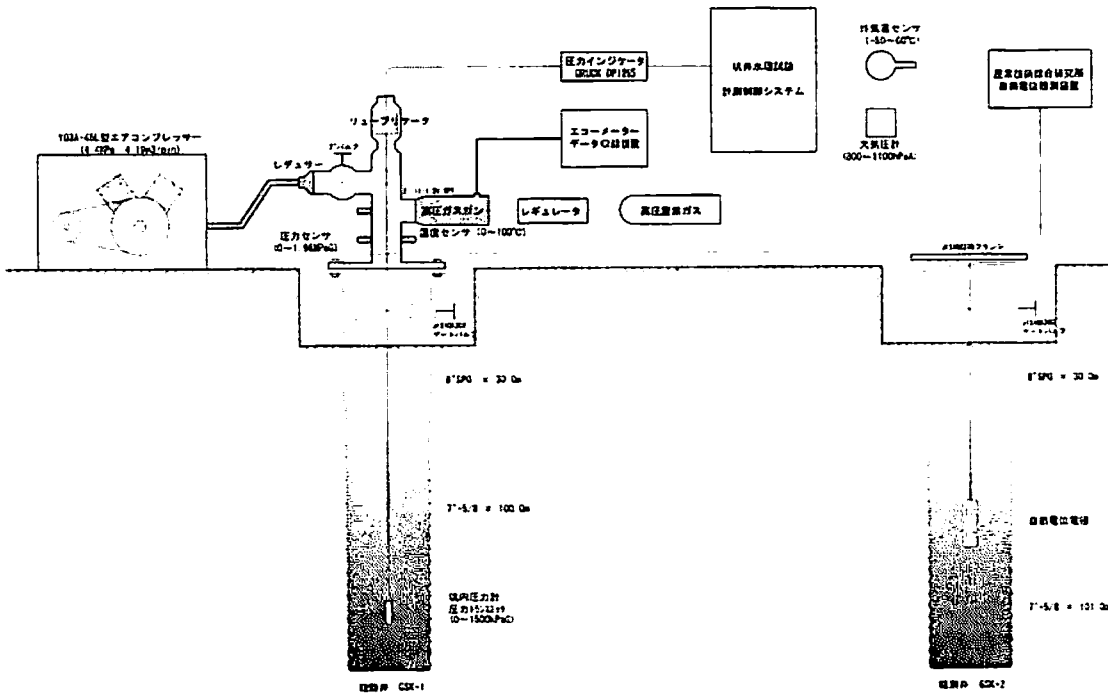
による電磁気的な変化を捕らえる電気探査による比抵抗や自然電位測定を中心とした小規模な現場実験を実施した。現場実験は、地質調査所(現、産業技術総合研究所)が澄川地熱地域(第2図)に水理試験等を実施するために掘削した実験井 GSK-1 および GSK-2 坑井を使用した。



第2図. 澄川地域の位置

2. 空気圧入実験

現地での試験は、平成15年5月20日から開始した。午前中に坑井内に設置されている圧力計などを引き上げおよび坑口装置の取り付けなどを実験井 GSK-1 坑井に施した後、午後から同坑井に空気を予備的に圧入して点検作業を実施した。この予備的な空気圧入は、1時間の圧入の後に1時間の中断、再び1時間の圧入にて行われた。圧入圧力は 20kPaG とし、空気圧入流量は 3Nm³/分とした。これらの圧入条件は、予備的な圧入および本圧入にて同じ条件とした。ただし、実際の圧入では、空気圧入流量を 3Nm³/分で一定値となっているものの坑口圧力は 15~20kPaG の間で時間的に変化をしている。第3図に坑井テスト概念図を示し、第1表に坑井作業工程表を載せる。5月21日午前と午後および22日の午前中に3時間半ほどの空気圧入を実験井 GSK-1 坑井に施した。5月22日の午後は、圧入装置を GSK-1 から GSK-2 に移して、GSK-2 坑井に空気圧入を行った。

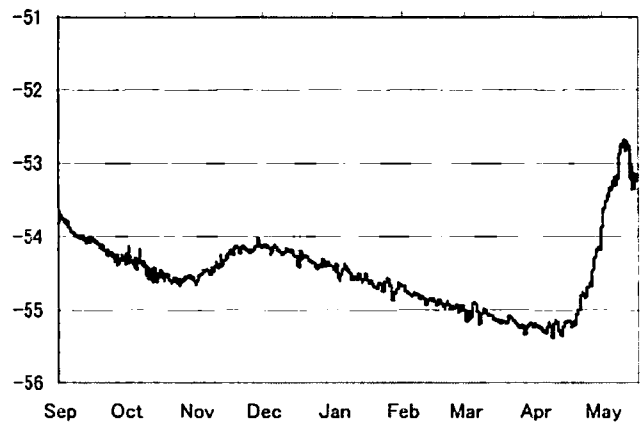


第3図. 坑井テスト概念図

実験日	空気圧入井	開始時刻	終了時刻	圧入時間 (分)	フォールオフ 時間(分)	トータル時間 (分)
5月20日	GSK-1	13:53	16:00	63	64	127
		16:00	17:35	60	35	95
9:11		13:30	229	30	259	
13:30		17:30	210	30	240	
5月22日	GSK-2	9:00	12:15	180	15	195
		15:05	18:15	180	10	190

第1表. 坑井作業工程表

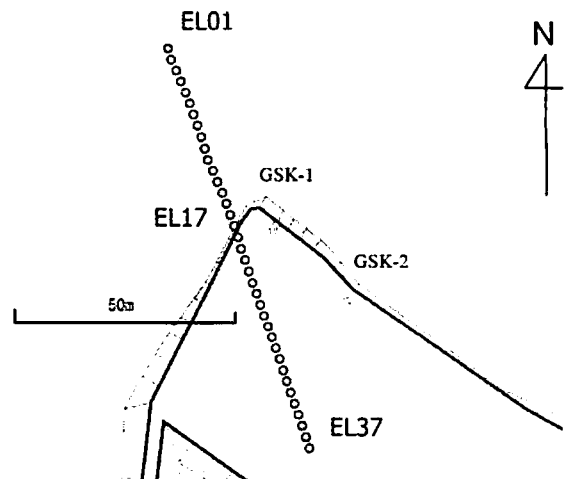
実験井 GSK-1 ではこの圧入実験以前から水位モニタリングを継続して実施しており、空気圧入実験以前の水位は、2002年9月より実験が行われた2003年5月までの間は第4図のように変化をしている。記録が開始されてからの水位は低下を続けていたが、2002年11月に一時水位が回復したものの、積雪時になり再び水位は低下をしており、雪解け時の4月になって水位は急激に上昇をした。空気の圧入に際しては、水中に直接空気が圧入されることを考えて、30m以浅に設置されているケーシングパイプより上まで水位が上昇している時期に実験を実施することを計画したが、実際の水位は雪解けの時期にもかかわらず2mほどの上昇に留まり、ケーシングパイプより上までは上昇しなかった。



第4図. GSK-1 の水位変化(2002.9~2003.5)

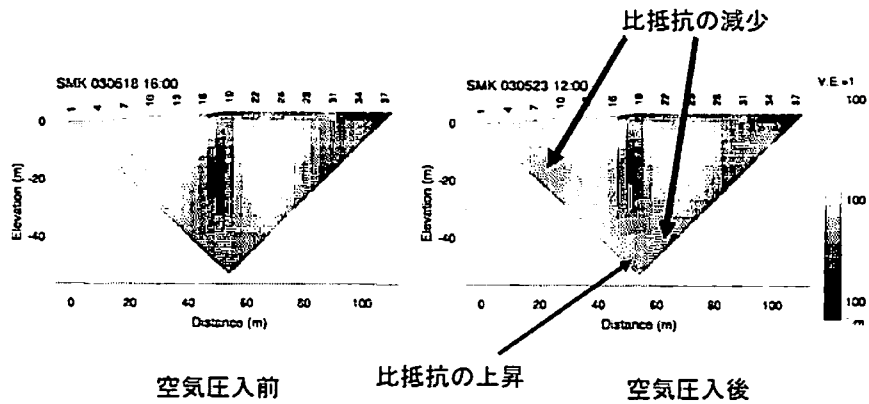
3. 比抵抗調査

第5図のように計測測線を北北西-南南東方向に設定し、約3m間隔にて37本の電極を配置した。実験井 GSK-1 ならびに GSK-2 を通過する計測測線の設定が望ましいが、実験現場の地形上の制約から図のような測線配置となった。測定には、電気探査装置として協同電気製 AES-6 を使用した。この電気探査装置は、高出力多チャンネル電気探査装置である AES-30 (高倉, 2003) のプロトタイプとして設計され、電流電極と電位電極をあらかじめ設定したプログラムに沿って自動的に切り替えながら比抵抗の測定が実施可能である。電流電極に流す電流強度は、50mA に設定をし、自然電位の測定時間と調整を行い、一日に2~4回の測定を行った。なお、1回の測定における電極組み合わせ数は371通り、所用時間は100分ほどである。



第5図. 電気探査測点配置図

第6図に観測された比抵抗変化を示す。空気圧入前の5月18日に計測した比抵抗分布では、電極番号 EL18 付近を中心として比抵抗値が他と比べて低い(100 Ωm 程度)領域が観測された。電極番号 EL18 は、実験井 GSK-1 に最も近い電極であることから周囲に比較して低い比抵抗値は実験井のケーシングパイプによるものと推察される。



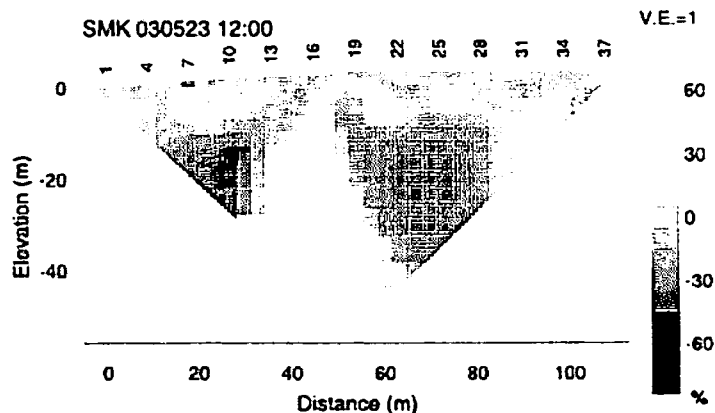
第6図. 観測された比抵抗変化

測定を実施した場所は、地熱発電所からの熱水還元などを目的として造成された基地であるため、地表面は砂や小石などから形成されている。このため、地表付近は比抵抗値にも比較的大きな 10,000 Ωm 以上の値が観測されている。電極番号 EL37 番に近い基地の中心部には、流体還元のための坑井が掘削されており、比抵抗値にも低比抵抗として表れている。

空気圧入後の5月23日に計測した比抵抗分布では、地表の高比抵抗、流体還元のための坑井に関係すると考えられる基地中心部に近い低比抵抗(電極番号 EL37)や実験井 GSK-1 に起因する低比抵抗(電極番号 EL18 の浅部)などは空気圧入前と変化は見られない。一方、実験井 GSK-1 近傍(電極番号 EL18)の 40m 以深では比抵抗値の上昇(約 500 Ωm から約 1000 Ωm)がみられるとともに、その比抵抗上昇域の南東側(電極番号 EL24)の深度 40m 付近や観測域の北西側電極番号 EL10 の深度 20m 付近では比抵抗の減少(約 1000 Ωm から約 800 Ωm)が観測された。

実験井 GSK-1 では水位計による地下水位の常時観測を実施しており、実験時は 50m 前後の水位となっていた。また、空気圧入に伴う水位低下は最大 2 m 程度であった。従って、実験井 GSK-1 近傍(電極番号 EL18)での 40m 以深で観測された比抵抗値の上昇は、主として、地下水面付近にある地層に空気が混入し地層中の含水率が減少したためと考えられる。比抵抗が上昇しているその南東側では、圧入された空気により押し出された地層水により地層中の含水率が上昇したと考えられる。観測北西域、電極番号 EL10 の深度 20m 付近の比抵抗の減少場所についても、実験井近傍の地層と同じように地層中含水率の上昇による変化と考えることが出来るが、空気圧入の実験井 SKG-1 から 30m 程度離れており、解析深度も実験井で観測される水位深度(約 50m)に及ばないことから、含水率の上昇など水の移動以外にも原因があるとも考えられる。

比抵抗値の変化をより直感的に捕らえるため、空気圧入前後の増減を割合として第7図に表示した。地表付近(深度 10m 以浅)では、圧入前後により比抵抗に変化が見られないが、実験井 GSK-1 近傍にて顕著な増減が見られる。坑井に対応する領域では比抵抗値が 60% を超える増加となり、その周囲では 60% 近くの比抵抗値の減少が見られた。定性的には、圧入された空気により坑井近傍の地層の含水率が低下し、また、押し出された間隙水により坑井周囲の地層の含水率が上昇したと考えられる。(坑井周囲の低比抵抗は、ケーシングパイプによるものと考えているが、空気の圧入によりケーシング



第7図. 観測された比抵抗変化(増減率)

パイプによる比抵抗値への寄与は変化していないものの、周辺地層の含水率が変化し比抵抗値が上昇したと考えられる。)

この比抵抗の変化(R_t)から Archie の式

$$R_t = \frac{aR_w}{\eta^m S_w^n}$$

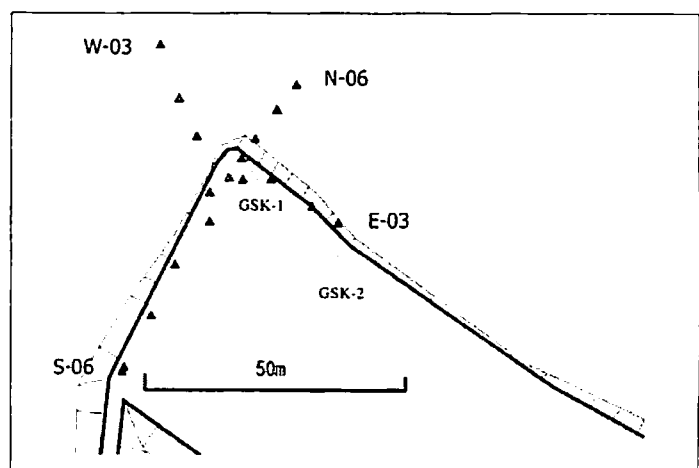
を用いて液相飽和率(S_w)の変化を推定する。ここで、 R_w :空隙をみたしている液体の比抵抗 η :空隙率 S_w :液相飽和率 であり、 m は空隙同士のつながり具合を反映した 1.3 から 2.5 の値取るパラメーター(膠結係数)で迂回係数 $a(0.5\sim 2.5)$ とともに地層の性質に依存した量である。簡便な方法としては、 $m=2$, $a=1$ という値がとられており、 n (飽和指数)は2前後の値となる。液相飽和率(S_w)の変化によって比抵抗(R_t)が変化したとき、Archie の式より、

$$\frac{R_t}{R_{t0}} = \frac{1}{\left(\frac{S_w}{S_{w0}}\right)^2}$$

となる。60%の比抵抗値の減少(たとえば、1000 Ωm から 400 Ωm)では、 $S_w = 1.58 S_{w0}$ となるので、約 60%の液相飽和率の増加として計算される。実験井 GSK-1 近傍に対応する領域では、比抵抗値が 60%を超える増加(たとえば 500 Ωm から 800 Ωm)が見られるので、 $S_w = 0.79 S_{w0}$ となり約 20%の液相飽和率の減少として計算される。このような液相飽和率の減少による比抵抗値の上昇は、CO₂ 圧入による石油2次回収フィールドでも比抵抗検層により観測されている(井上、2004)ことから、超臨界状態の CO₂ 地中貯留においても比抵抗変化にて CO₂ の広がりを捕らえることは可能と考える。しかし、帯水層を対象とした CO₂ 地中貯留では、CO₂ を超臨界状態とするための注入深度は 1000m 程度の深さとなる。本実験では、比較的小電流での電気探査であり、深い探査深度を得るためには測線長を長く取り大電流による計測が必要となる。また、CO₂ 地中貯留では低比抵抗帯の粘土層がキャップロックとなり、その下の帯水層中の CO₂ の広がりをモニターすることになり比抵抗の変化として捉えられにくい状況にある。このように地表からの探査では探査深度などに制限があるが、含水率の変化に対応した比抵抗の変化としてのモニタリングの可能性が高いことから、電磁トモグラフィーなど坑井を利用した電磁気探査方法も CO₂ 地中貯留でのモニタリングとして有効と考えられる。

4. 自然電位

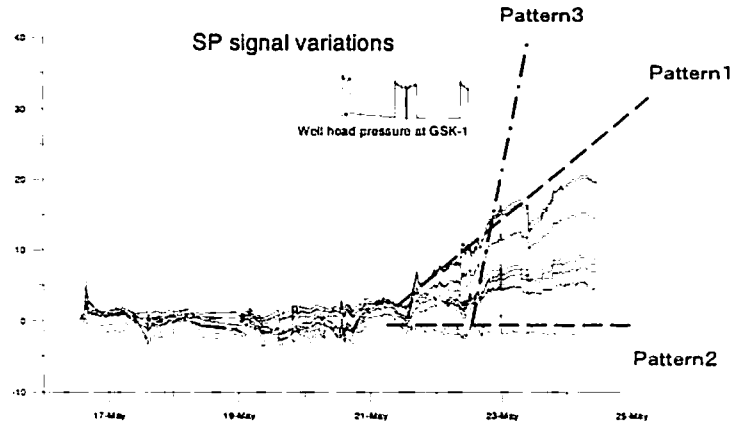
電気探査による比抵抗測定と同時期に自然電位観測を実施した。電気探査では、電流電極に電流を流して電位電極での電位を測定するため、電気探査による比抵抗調査が実施されているときには自然電位電極にも大きな電位変化がノイズとして現れてしまう。したがって、一日4回の比抵抗調査時のデータは解析対象から外した。自然電位測定のための電極の配置図を第8図に示す。自然電位測定用の電極は、実験井 GSK-1 を中心として東西南北に配置することを計画した。しかし、基地内はほぼ平坦であるものの基地からはずれると藪に覆われた斜面となることから、実際の測点は必ずしも予定していた十字状の測線とはなっていないが、実験井 GSK-1 から北に延びる測線を N 測線とし、電極を実験井 GSK-1 に近い電極



第8図. 自然電位電極配置図

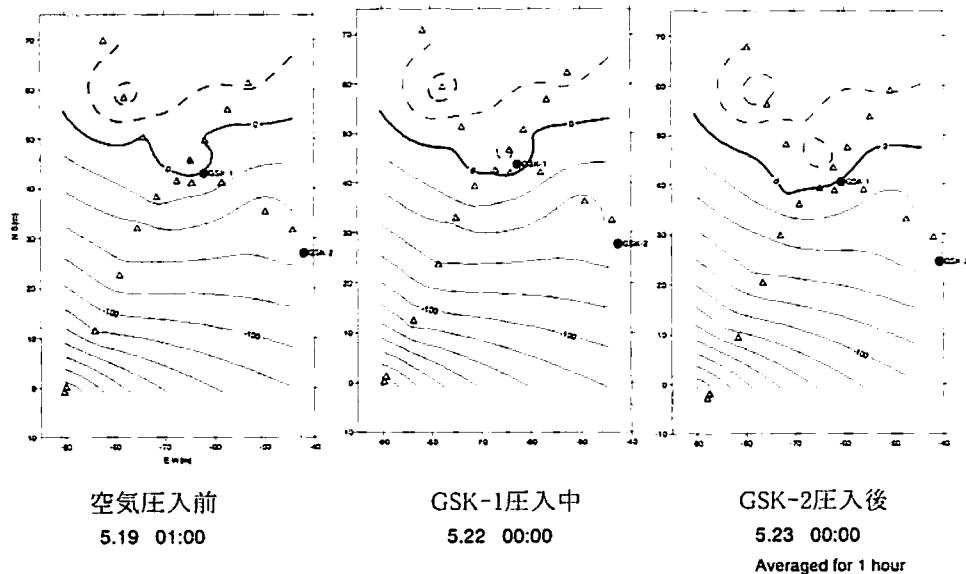
設置点から N-01, N-02, N-06 と命名した。電極間隔は、5m を基本としたが現地で設置のしやすさを優先したため、必ずしも等間隔とはなっていない直線状ともなっていない。自然電位電極の電位は、電線にて記録計に伝送されて記録される。記録計は、差動 12 チャンネル(シングルエンド 24 チャンネル)の入力を有しており実験井 GSK-1 から南東約 300m 離れた電位電極(第8図の範囲外)を基準として記録を行った。

ノイズの大きな比抵抗調査時の電位変化を取り除いた時間変化を第9図に示す。第9図には、実験井 GSK-1 および GSK-2 に空気を圧入した時刻、ならびにそれらの圧入に先だつて実験井 GSK-1 に試験圧入した時刻も示している。第9図では、全観測点での記録開始時(2003年5月16日13時00分)の自然電位をゼロとして表示している。全ての電極電位は、若干の時期(5月19日と20日の日中)を除いて空気圧入開始以前はほぼゼロの値を保っているが、本格的な空気圧入を開始した5月21日以降電位が大きく変動し、明らかに空気圧入の影響が見受けられる。この空気圧入以降の自然電位の上昇を特徴的な3パターンに分けて考えることにする(第9図)。パターン1型は、5月20日のGSK-1井への空気圧入に伴って明瞭な自然電位の増加が始まり、5月22日午後のGSK-2井への圧入が始まっても特に大きな自然電位の上昇率に変化が見られないタイプであり、S-01, N-01, N-02 地点の電位変化に見られる。パターン2型は、GSK-1井への空気圧入が始まっても特に変化が見られないもので、S-04, S-05, S-06, W-03 地点の電位変化などに見られる。パターン3型は、E-03, E-02 地点の電位変化に代表されるGSK-1井への空気圧入に対して自然電位変化が見られない(ないしは、小さい)が、GSK-2井への圧入には大きく反応するパターンである。各地点の電位変化は、これら3つのパターンに分類できるが、パターン1型に属する電位変化を示す地点が最も多い。



第9図. 自然電位時間変化

パターン3型に属する電位変化を示す地点はE測線の地点となっている。これは、E測線が実験井GSK-1およびGSK-2沿う方向に設定されているためと考えられる。空気圧入前と実験井GSK-1空気圧入後、ならびに実験井GSK-2空気圧入後のそれぞれの自然電位平面分布を第10図に示す。この第10図で

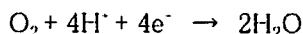


第10図. 自然電位平面分布

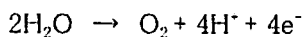
は、空気圧入以前の電位を5月19日午前1時の電位データにて作成しているが、第9図にて明らかなように他の日の自然電位も、19日の電位分布と大きくは変わらないことが推察される。(日中の電位分布には、夜間と異なる電位分布となっている日もあるが、これらも夜間には元の電位分布に戻っており、工事等何らかの外来ノイズによるものと考えられる。時に、近傍の道路にて工事が行われており、その影響などが考えられる)。

空気の圧入後の電位は大部分が第9図のパターン1型に属しており、第10図でもGSK-1を中心として上昇していることが読み取れることから、地下の帯水層に空気が混入したことにより地表電位が上昇したと考えられる。地下の状態に起因した地表の電位変化は様々な原因により引き起こされるが、帯水層内の水の流動による自然電位変化は界面動電現象により解釈されることが多い。界面動電現象による自然電位変化は、岩石と液相との間のゼータ電位が定性的にも重要な要因である。このゼータ電位は通常負電位である(Ishido and Mizutani, 1981; Tosha et al., 2003)ことから、液相中に正の電荷が溜まる。このため、水の流動に伴って正の電荷が移動すると考えられることから、水が流入する場所では正電位となり、流出するところでは負電位が現れる。実験井 GSK-1 に空気を圧入することにより帯水層中の水が移動(拡散)すると考えられるので、界面動電現象による電位変化を考えると地表付近は負電位となることが予想される。しかし、観測結果は空気を圧入した実験井GSK-1を中心として自然電位が上昇していることから、他の原因であることが考えられる。

地中に埋設された導電体により地表に負の電位異常が形成されることが知られており、導電性の金属鉱床の探査法として利用されてきた(物理探査学会、1998)。この金属鉱床による電位異常は、酸化還元電位起源と考えられ以下のように説明されている。第11図は、この酸化還元電位を模式的に表したものである。地中では、地表からの酸素供給が少なくなるため深さとともに還元環境になると考えられる。このため、地表に近い酸化環境では、酸素の供給により



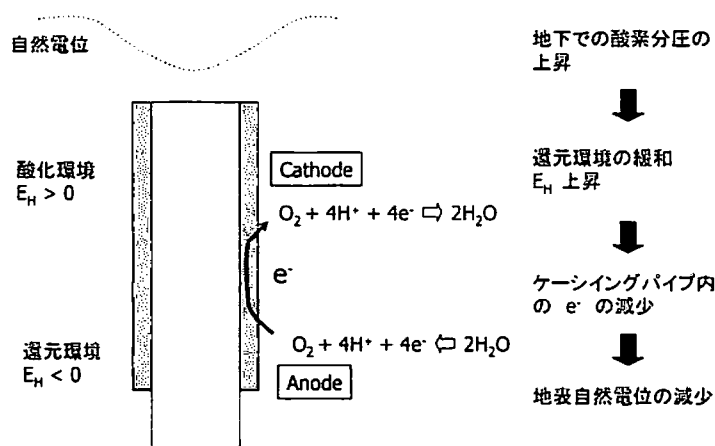
という水の生成環境にあり、深部では



という水の分解環境にある。このような、環境下に導電性の物体が埋没しているとすると、深部で発生した電子を浅部に輸送することにより水の生成・分解が促進される。この導電性の物体の中を移動する電子により地表付近では負電位になることが予想される。このような電位異常をマッピングして導電体としての金属鉱床の見つけることが探査手法の一つとして実施されている。

実験井 GSK-1 は導電性のケーシングパイプにて構成されており、このような酸化還元電位による電位異常が地表に発生していると考えられる。実験井 GSK-1 周囲で酸化還元電位による電位分布があるところに、空気を圧入すると深部の還元環境が緩和されることが予想され、それまでの負電位異常が小さくなる(正の電位変化となる)ことが考えられる。空気圧入実験により電位の上昇が実験井 GSK-1 周囲にて観測されたことから、酸化還元反応が空気の圧入により緩和されたものと考えられる。

第12図は、5月22日の正午から13時までの1時間の電位を平均した電位を縦軸に、GSK-1井から電位観測点までの距離を横軸として表示した図である。この図から明らかなように、GSK-1井への注入による電位変化は距離の-1乗で変化しており、電位変化が坑口付近の点電流源によって引き起こされていることが理解できる。酸化還元電位による自然電位異常が、実験井のケーシングパイプ浅部からの負イオンの放出によることから、こ



第11図. 酸化還元による電位変化の模式図

の点も、今回観測された電位変化が酸化還元電位起源であることを示唆している。

5. おわりに

二酸化炭素の地中貯留は、2004年3月現在、新潟県長岡市の帝国石油岩野原基地で1万トンの圧入実験が続けられている。京都議定書では排出されている二酸化炭素を基準年に対して6%削減することが求められており、そのうち三分の一(全排出量の2%)を地中貯留など革新的な技術によって達成することとされている。地中貯留に関しては、貯留の前段となる分離回収技術がコスト的な計画の中ではボトルネックとなっており、この分野での技術開発が地中貯留を実施する上で大きな問題点となっている。また、貯留時やそ

の後のモニタリングなど解決すべき問題も多い。今回は、電磁気的なモニタリング手法の適用可能性を検討する上から、秋田県澄川地域に掘削されている浅い実験井にて空気圧入実験を行い、その圧入に伴う変化を比抵抗と自然電位により観測した。

圧入実験はごく短期間であり、超臨界状態の二酸化炭素の代わりに空気を圧入することにより実施されたが、比抵抗ならび自然電位のどちらの観測にも空気圧入の影響と考えられる変化が見られた。しかし、実際の二酸化炭素地中貯留では、安定して地中に注入するための二酸化炭素を超臨界としているため、圧入深度は、1000m近くに達することから、地表からの探査では解像度などの問題点が残る。坑井を利用した比抵抗調査や自然電位調査などの探査方法を検討する必要があると考えられる。

参考文献:

物理探査学会(1998) 物理探査ハンドブック.

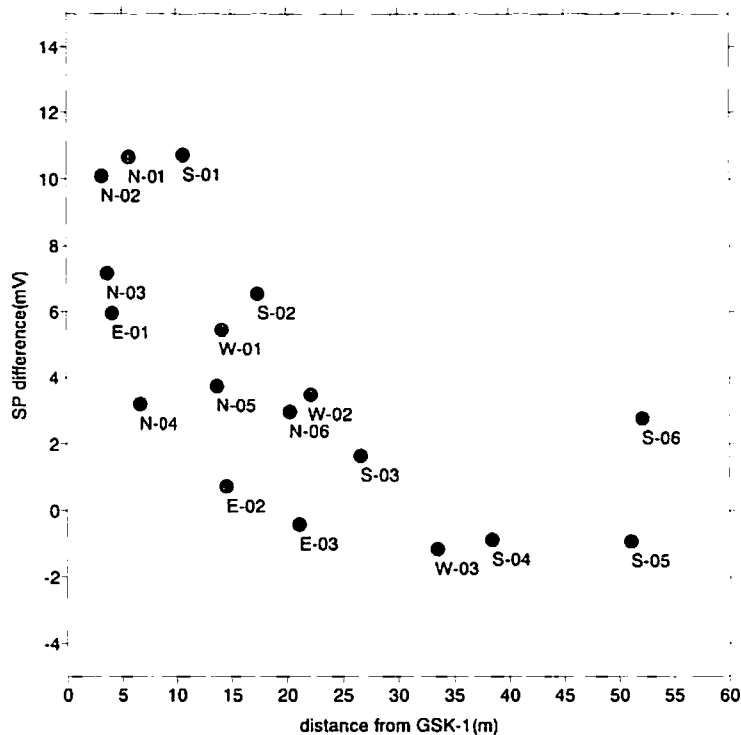
井上望(2004) 私信.

Ishido, T. and Mizutani, H.(1981) Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, 86, 1763-1775

環境省(2003) 2001年度(平成13年度)の温室効果ガス排出量について.

高倉伸一(2003)比抵抗・自然電位モニタリング用の高出力多チャンネル電気探査装置の開発、物理探査、56、229-237.

Tosha, T., Matsushima, N., and Ishido, T.(2002) Zeta potential measured for an intact granite sample at temperatures to 200 °C, *GRL*, 30, 28-1~28-4



第12図. 圧入終了時の圧入井からの距離と自然電位の関係