

CO2 地中隔離に関する Geomechanics の課題 - 石油開発の経験から

Geomechanical agenda for the CO2 geological sequestration: from the experience of petroleum industry

山本 晃司[1]; 小出 仁[2]

Koji Yamamoto[1]; Hitoshi Koide[2]

[1] 富士総研; [2] 早大

[1] FRIC; [2] Waseda

1. はじめに

地層中に圧入された二酸化炭素が短期的、長期的にどのように挙動するかは、温暖化対策の有効性と、安全性の二つの観点から重要な課題である。石油開発産業は、探鉱、油層評価、油層管理等の目的から地下深部の流体の挙動に着目して研究を行っており、また坑井刺激 (Well Stimulation)、あるいは増進回収 (EOR: Enhanced Oil Recovery) の目的から、石油貯留層内に流体経路となるき裂を人工的に形成させたり、水、ガスの圧入で間隙流体圧力を人工的に変化させる作業を行っている。またその中では、流体の挙動に起因する様々な障害、事故にも遭遇している。ここでは、地中のガスの安定性に関連する事象のうち、流体圧力変動が地層の力学的安定性に影響を与え、流体挙動にフィードバックされる現象について整理して、研究課題の提言を行う。

2. 流体の挙動と地層の破壊・安定性

石油の生産や EOR による地層内の流体圧力の変動はしばしば 10MPa を超え、地層を構成する岩石に次に挙げられるような不可逆的な変形、破壊を生じうる。CO2 隔離と関連があると思われる事象として次のようなものが挙げられる。

(1) 地層の圧密沈下と CO2 の貯留能力

北海 Ekofisk 油田などを代表例として (Joint Chalk Research, 2002)、世界中の各所で石油生産に伴う地盤沈下が報告されている。一方で、日産 10 万バレル ($\sim 1.6 \times 10^4 \text{m}^3$) を超える巨大油田が数十年に渡って生産を続けても地表面に目立った変化が生じない例も多い。これは沈下が、油層を構成する岩石の圧密特性に依存するためであり、Ekofisk 油田の場合は孔隙率が高く孔隙圧壊が生じやすいチョークが油層を構成しているためと考えられる。このような油ガス田の場合、地層の孔隙率、浸透率が初期より低下して貯留能力に影響を与える。また、強度、弾性係数の変化によって圧入時の地層の安定性が変化している。

(2) 断層、き裂の再活性化 (Reactivation)

流体圧入による間隙流体圧力の上昇と有効応力の低下に伴い岩盤内のき裂、断層が破壊基準を越えすべりが生じることがよく知られている。また、流体圧力変動は地層の水平方向の全応力の変化を生じさせる。そのため、正断層型の応力状態の下では圧力低下による水平応力低下も断層の再活性化を生じうる。このような例はメキシコ湾岸の油田地帯等に見られる (Morton and Purcell, 2001)。また、油・ガス田においてもこのようなメカニズムにより、流体採取・圧入の作業に伴う誘発地震が発生する例が知られている。このような断層、き裂の再活性化は新たな流路の形成につながり、CO2 のリークの要因となる。

(3) CO2 コラムによる地層の断裂

気体あるいは超臨界状態の CO2 は水よりも密度が低く垂直方向の圧力勾配が小さくなるため、上端をキャップブロックでシールされ、下端が地層水に接した状態で、CO2 コラムが高くなると上端の圧力は周囲の地層の圧力、及び応力よりも高くなり、地層の引張り破壊 (水圧破砕) を生じたり、CO2 のリークの要因となりうる。したがって、坑井配置と圧入スケジュールは CO2 コラムを制御するという観点でも検討されるべきである。

3. 結論

2 章で挙げた例は、間隙流体圧力の変動が圧縮、せん断、引張り各モードの地層の不可逆的な変化を引き起こし、CO2 の貯留能力や安定性に影響を与える例である。従って、これらの事象の検討に際しては、

(1) 対象層及びシールとして期待される地層の初期の応力、間隙流体圧力を知ること。

(2) 対象層の岩石の特性として、弾性定数とせん断強度のみでなく、圧密特性、き裂・断層の分布・方位・浸透性等の情報を得ること。

(3) 圧入後の CO2 及び CO2 溶存水の分布状況から、垂直方向の密度分布を知り、圧力を予測すること。

の三点が重要であることがわかる。

地震探査等の地表からの物理探査は三次元的な広がり得るものであるが学変数を直接計測できる手法ではなく、掘削時のコア・物理検層の情報は個別の情報を直接得ることができるが、点または線の情報である。これらの制約の下で現実の地層からの情報を得るためには、探鉱、掘削、圧入中及び圧入後のモニタリングの各段階で、これらの情報をどう取得し、それを総合化して適切な力学的描像を得るかが課題である。特に、掘削時は地層の情報を直接得られる唯一の機会であり、定圧コア採取による地下ガスの状態解明、水圧破砕法等による応力測定、地下の状態や物性を測定できる検層技術の開発、弾性波・比抵抗・浸透率などのトモグラフィ技術の高度化な

を積極的に進めるべきである。