

## CO<sub>2</sub> 地中貯留技術

財団法人地球環境産業技術研究機構  
CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループ 中川加明一郎

### はじめに

1961年に世界で初めて地球の大気圏の外に出たソ連(当時)のガガーリン少佐は、「地球は青かった」と自分の住む惑星を外から見ていった。今では私たちは、たとえば月周回衛星「かぐや」のハイビジョン映像をみることができるようになった。そして、その美しさに感動さえ覚える。この惑星には人類をはじめ実に種々の生物が生息している。しかし今の環境はもちろんはじめからあったわけではない。かつては大気には二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)が充満していた。ひよんなことから生物が誕生し、光合成によりCO<sub>2</sub>を吸っては炭素を固定し、酸素を吐き出すという植物の出現により、地球の大気中からCO<sub>2</sub>が減り酸素が増えていった。酸素を吸ってCO<sub>2</sub>を吐き出す動物はその恩恵にあずかって誕生した。これらの太古の植・動物は埋もれ石炭や石油とよばれる化石となって地中深くに眠った。年齢約50億才の地球の上では、つい最近(300万年くらい前)誕生した人類が、つい最近の産業革命以降、地中に眠っていた化石燃料をせっせと使いだした。眠っていた炭素が地上に再び現れ、CO<sub>2</sub>として大気中に戻り始めた。このまま化石燃料を使いつづけると、2100年には大気中のCO<sub>2</sub>濃度は何もしないと1,000ppmを超え、地球の平均気温も4℃上昇するという。さまざまな弊害がでてくると予想される。CO<sub>2</sub>濃度の上昇を抑え、あるいは減らすことが地球温暖化を食い止めるためには必要とされるが、ではどうやったら、CO<sub>2</sub>を減らすことが出来るのだろうか？

### CO<sub>2</sub>を大気中から減らすには

CO<sub>2</sub>の排出量を増やさない、あるいは減らす技術的な方策としては、次のようなものがあげられる。

- 1) 省エネルギー
  - 2) 非化石燃料エネルギー利用
  - 3) 大気中CO<sub>2</sub>吸収
  - 4) CO<sub>2</sub>回収貯留
- 1) はおなじ仕事をするにしても、効率をよくすることで使うエネルギーを減らすというもの。結果としてCO<sub>2</sub>の排出を減らすことができる。
- 2) は、主要なエネルギー源としてCO<sub>2</sub>排出につながる化石燃料の利用をやめようとするもの。原子力や再生可能エネルギーを利用して、必要なエネルギーを確保することが求められる。
- 3) は植物を増やすことでCO<sub>2</sub>の吸収量を拡大しようとするもの。
- 4) は化石燃料を燃やしたときに排出されるCO<sub>2</sub>を回収し、大気から程遠い海の底深くや地中深くに貯めてやろうというもの。

私たちはこれまでエネルギー源を石炭、石油、天然ガスといった、化石燃料に強く依存しているし、しばらくこれからも化石燃料を使わざるをえない。しかし、化石燃料がいずれは枯渇することを考えると、これらに依存しない、いわゆる脱炭素社会を作る必要がある。脱炭素社会のための技術開発を進めなければならないし、また、そうすればCO<sub>2</sub>濃度上昇の心配はなくなる。が、しかし、化石燃料が枯渇することを心配するよりも前に、大気中のCO<sub>2</sub>濃度上昇をなんとかしなければならぬ。直接的に大気中のCO<sub>2</sub>濃度上昇を食い止めるには、上記の3)あるいは4)となる。特にCO<sub>2</sub>を多く出すところからCO<sub>2</sub>を効率的に回収し、大気からほど遠い海の底深くや地中深くに貯留してやろうというCCS(Carbon Capture and Storage)が有効と考えられる。CCSという技術はまだ研究段階ではあるが、わけても地中貯留については、我が国を含め、世界各国で精力的に研究が進められている。

### 地中貯留の方法

CO<sub>2</sub>は水に溶けやすく、また溶けると炭酸水と呼ばれる酸性水になることから、その物理的な性質や化学的な性質を利用して、あるいは特殊なフィルターを使って、火力発電所や製鉄所などの排

気ガスから大量に回収することができる（さらに効率よく低コストで回収するためにはそれぞれに研究開発すべき課題もあるが）。地中貯留では、このように回収されたCO<sub>2</sub>を地下800mあるいはそれより深くの地中に貯めることを考える。

ところでなぜ地下800mより深いところなのだろうか？？ CO<sub>2</sub>は、炭酸ガスとも呼ばれるように、通常の大気圧状態では気体なのだが、温度や圧力によってその状態をいろいろ変える。圧力や温度を上げていって、圧力を約7.4MPa、温度を約31℃以上にすると、CO<sub>2</sub>は超臨界状態とよばれる液体とも気体とも区別のつかない流体になる。このときの密度は水の約半分流動性がきわめて大きく、効率よく地中で貯留するのに都合がよい。地下水圧は深さに応じて（1mあたり約0.01MPaずつ）増える。また、地温も深さに応じて（1mごとに0.03℃ずつ）高くなる。したがっておよそ800m以深の地下では、このような圧力、温度条件（およびそれ以上）が得られる。

ただし、地下800m以深であればどこでも入れられるかという、これはまた話が別。私たちの足の下の、そのまた下の地下深くには岩が広がる。その岩のうちでも地中貯留に利用しようとするのは堆積岩と呼ばれるもの。堆積岩とは太古に海や湖沼に流れ込んで堆積した泥、砂あるいは礫が長い年月の間に固まったものをいう。もとが泥主体なら泥岩、砂主体なら砂岩と呼ばれる。このうち砂（や礫）を主体とする砂（礫）岩は、構成粒子が荒いため、空隙の量が多くかつ水などを通しやすい（透過性が大きいという）。一方泥岩はきわめて小さな粒子から構成された緻密な岩石で水を通し難く、水などは容易に入り込まない（透過性が小さい、あるいは難透過性という）。堆積岩ではこのような性質のものが交互に現れる。つまり透過性の大きな砂（礫）岩の上には難透過性の泥岩があり、またその上には砂岩が現れ泥岩が現れるという層構造をなす。このような堆積岩のなかの砂（礫）岩層は帯水層と呼ばれ、地下水が閉じこめられているかあるいは流動している。浅いところの地下水であれば、汲み出して飲料水につか

ったり、工業用水あるいは農業用水となるが、800mもの深さになると、地下水は大昔の海水（塩水）であったりする。場合によっては、石油や天然ガスが貯まっていることもある。

CO<sub>2</sub>地中貯留では、この帯水層にCO<sub>2</sub>を送り込み、貯めることにする。浮力を受けて帯水層から上昇しようとするCO<sub>2</sub>は、帯水層の上にある難透過性の泥岩層を遮蔽層として、帯水層内に貯留されることになる。帯水層内のCO<sub>2</sub>は、徐々に水に溶解し始め炭酸となり、やがては、周囲の元素と反応して固定化される。こうやって、CO<sub>2</sub>は帯水層内に眠ることになる（図1）。

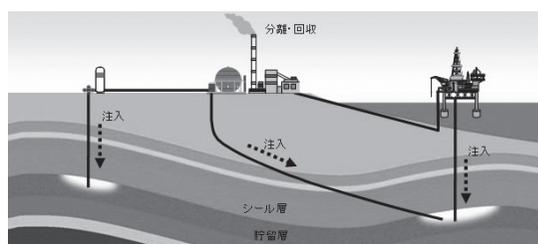


図1 CO<sub>2</sub>地中貯留の概念

## 研究の進み具合

諸外国ではすでにいくつかの実例がある。ノルウェーのSleipnerでは、天然ガスの生産に伴って出てくるCO<sub>2</sub>を分離して、ガス田の上位にある帯水層に100万t（トン）/年入れている。カナダのWeyburnでは、やはり100万t/年を隣国の米国よりパイプラインで輸送して、油層に注入しEORを行っている。アルジェリアのIn Salahでは、天然ガス随伴のCO<sub>2</sub>を分離して枯渇ガス田に注入している。なお、ここでいうEORとは石油回収増進法（Enhanced Oil Recovery）というもので、産出のわるくなった油層にCO<sub>2</sub>を注入して石油の生産性を上げようとするものである。計画中のプロジェクトだと、それこそあげたらきりがなくらいである。

我が国では、2000年から2007年に長岡市で総量10,000tのCO<sub>2</sub>の注入実験が深度1,100mの地下で行われ、CO<sub>2</sub>地中貯留の現場実証と、データ取得が行われた。上記の実例で示されるようにCO<sub>2</sub>を地中に入れるという技術の基本はある程度できあがっていると考えてもいい。それでは我が

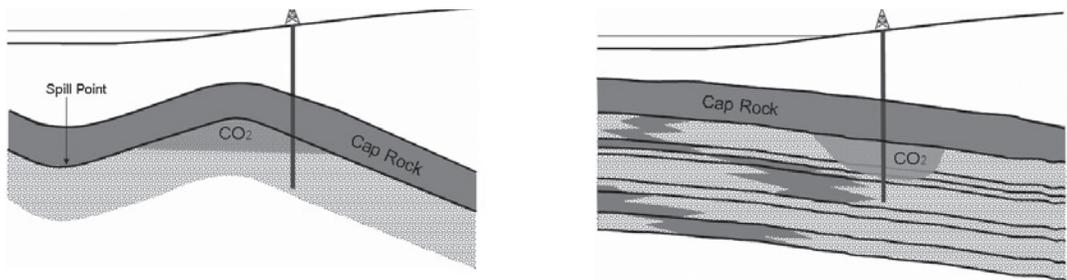


図2 背斜構造と単斜構造の帯水層におけるCO<sub>2</sub>地中貯留の様子

国でCCSを地中で行おうとする上での課題とはどのようなものだろうか？

地中貯留を行おうとするとき、想定される地質は堆積岩で、対象となるのは砂（礫）岩からなる帯水層であることは先に述べたとおりであるが、地質構造として背斜構造と呼ばれる形状であれば、もっとも確実に貯留することができる（図2）。

我が国では、このような構造の帯水層は概略の見積もりで50億t相当の貯留が可能であるとされる。背斜構造でなくても、地層の傾斜が緩やかであれば、この場合も、CO<sub>2</sub>の移行は穏やかで、必要な時間滞留させることができると考えられており、この場合は、やはり概略の見積もりではあるものの、1,000億t強もの貯留が可能となる。我が国のCO<sub>2</sub>排出量が現在12億t/年程度であることから、およそ100年分になる。

ただし、いずれの貯留可能量も、既往の探査資料の概査から得られたものであって、今後はこれらの地質、構造、帯水層の分布なり、貯留可能量の見積もりを精度よく行うことが必要なことはいうまでもない。このような適地の見積もりの精度を上げることが今後の重要な課題の一つである。CO<sub>2</sub>地中貯留は技術的に可能であることの見通しがあることをすでに述べた。この技術がCO<sub>2</sub>削減の重要な技術として役割を担うには、CO<sub>2</sub>地中貯留が安全であることを示し、CO<sub>2</sub>削減技術として採用することに社会的な合意を得ることが重要である。このためには、貯留されたCO<sub>2</sub>の挙動を、しかも長期にわたる挙動をしっかりと理解し、予測する技術を身につけておくことが必要である。

特に、背斜構造以外の帯水層を用いたCO<sub>2</sub>地中貯留においては、帯水層内に滞留するメカニ

ズムを科学的に明らかにすることは重要である。CO<sub>2</sub>がこの空隙内に滞留する（捕捉される）機構（トラップメカニズム, trapping mechanism）の観点から見ると、およそ次の4つの機構が機能する。

#### (1) 構造的トラップ

帯水層内の水との密度差により、上方に移行しようとする。このとき、砂（礫）岩層上位の泥岩層が難透過性であれば、鉛直上方への移行は妨げられる。これを構造的トラップという。

#### (2) 残留トラップ

帯水層内でCO<sub>2</sub>が移行しようとするとき、砂（礫）岩層内の空隙形状の不均一性から、一様に動くことはなく、徐々に捕捉されていくと考えられている。このようなCO<sub>2</sub>滞留機構が残留トラップと呼ばれる。

#### (3) 溶解トラップ

CO<sub>2</sub>は水への溶解度が大きく、いずれはすべて帯水層内の水に溶解すると考えられる。溶解水の比重は帯水層内の水より大きくなるため、上昇することなく帯水層内にとどまることになる。

#### (4) 鉱物トラップ

帯水層内の空隙水に溶解したCO<sub>2</sub>は岩石から溶出する元素と結びつき鉱物となって固定化されると考えられている。

以上のような、帯水層内でのトラップメカニズムを理解し、効果の大小に寄与する条件などを明らかにすること、そして、将来の挙動を予測する手法を確立することが、今後の重要な課題である。

#### 参考文献

(財)地球環境産業技術研究機構編、「図解CO<sub>2</sub>貯留テクノロジー」工業調査会、2006年