

# 帯水層でのCO<sub>2</sub>貯留技術 (高精度地中挙動予測手法の研究)

菅 舎 利 行<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

現在の地球温暖化は、産業革命以降の急激な化石燃料の消費により放出されたCO<sub>2</sub>などの温暖化ガスにより引き起こされている。南極及び北極の両極地域の温度上昇とそれに伴う雪氷の溶解は、海面の上昇を引き起こし、太平洋の島国の中には危機的な状況に陥る国もあることが指摘されている。我が国においても、温暖化により第1表のような影響があると指摘されている。このようなCO<sub>2</sub>の急激な大気への放出に対して、CO<sub>2</sub>を排出する化石燃料の使用を制限することが最も効果があることは自明の理であるものの、現在の化石燃料の代替エネルギーとしての再生可能エネルギーなどCO<sub>2</sub>を排出させないエネルギーの供給は、その出発点に着いたばかりである。したがって、化石燃料に依存しているエネルギー供給構造を今すぐに変換することが不可能であることから、経済活動すなわちエネルギーの供給量を減少させずに温暖化対策を実施する方策として、化石燃料により

第1表 我が国における温暖化の影響(西岡・原沢, 2003).

- 
- ⇒ソメイヨシノ(サクラ)の開花日がここ50年に5日早まっている
  - ⇒北海道での高山植物の減少と本木植物分布の拡大
  - ⇒内陸部におけるシラカシなど常緑広葉樹の分布拡大
  - ⇒チョウ・ガ・トンボ・セミの分布域の北上と南限での絶滅増加
  - ⇒本来九州四国が北限のナガサキアゲハが90年代には三重県に上陸
  - ⇒1970年代には西日本ではみられなかった南方系のスズミグモが80年代には関東地方にも出現
  - ⇒マغانの越冬地が北海道にまで拡大
  - ⇒熱帯産の魚が大阪湾に出現
- 

発生したCO<sub>2</sub>を大気中から隔離する考えが提唱されている。将来は、CO<sub>2</sub>の排出のないエネルギー源を使うものの、エネルギー転換が実施されるまでのつなぎの技術(Bridge Technology)として、化石燃料により発生したCO<sub>2</sub>を隔離して大気圏に放出させない地中貯留などの技術開発が進められている。

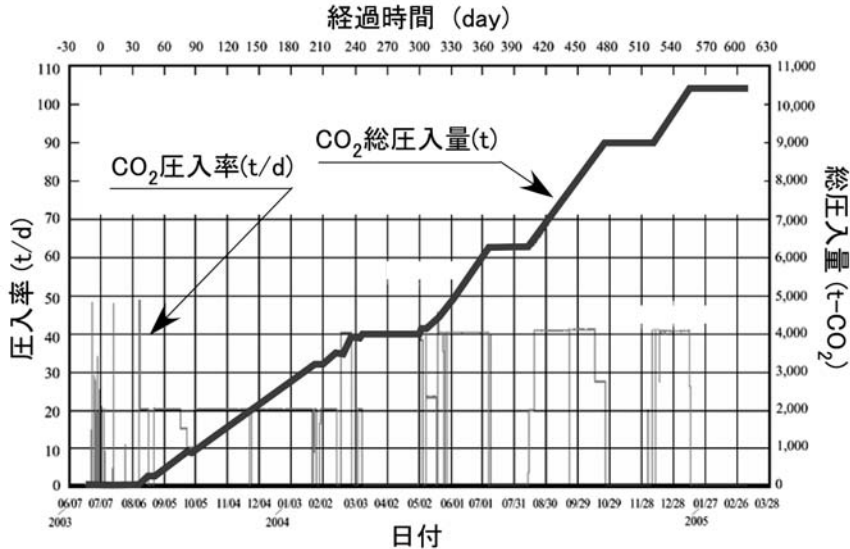
京都議定書が2005年2月16日に発効され、我が国でも2008年から2012年までの第1約束期間に示された削減目標を達成する必要がある。このため、即効的な地球温暖化対策としてCO<sub>2</sub>の地層処分が検討されており、その第1歩として小規模な圧入実証実験が新潟県長岡市にて行われた。CO<sub>2</sub>が地層中に圧入できることは、長岡での圧入実験のみならず、石油の2次増進回収技術(Enhanced Oil Recovery, EOR)としての圧入が米国などで行われていることや、北海のSleipner(スライプナー)での実用的なCO<sub>2</sub>圧入などにより、圧入の実施に大きな問題はないものと考えられている。しかし、CO<sub>2</sub>が圧入された地層中においてどのような挙動をとるのか未知の部分が多く、今後のさらなる研究開発の必要性が指摘されている。従来から実施されているEORでのCO<sub>2</sub>圧入は、CO<sub>2</sub>により石油の粘性を下げて生産量を増大させるのが目的であるため、注入後のCO<sub>2</sub>については、それほど関心を持たれていない。圧入したCO<sub>2</sub>がどのように地層内を移動し、貯蔵滞留されるのかを科学的知見を持って示し、リスク評価等に結びつけるのは、知識、データともに不足をしている。

## 2. 地中貯留

CO<sub>2</sub>地中貯留では、天然ガスや石油の貯留にその科学的根拠を求めており、長い時間資源を閉じこめ

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 二酸化炭素, 地中貯留, 帯水層, シミュレーション, モデル, 地化学, キャップロック, 断層



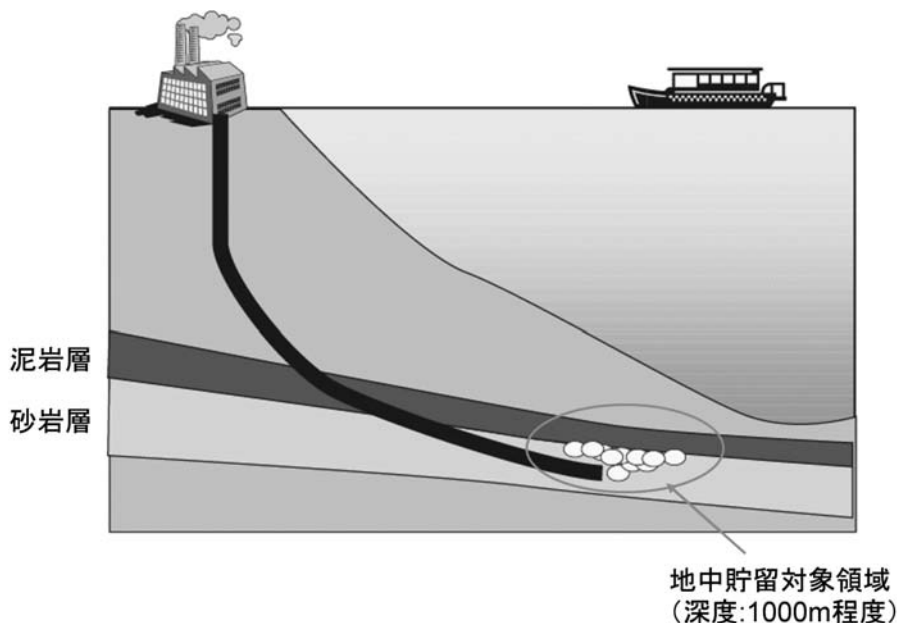
第1図 長岡でのCO<sub>2</sub>圧入量の日変化(圧入率)と総圧入量(Xue *et al.*, 2006を基に作成)。

ておくような、地質構造(クロージャー構造, ドーム構造あるいは背斜構造)がその貯留対象となっている。石油やガスは地質時代を通じて長期間にわたり資源をそのクロージャー構造の中に保持していたことから、その類推としてクロージャー構造を有する地層にCO<sub>2</sub>を貯留すれば、CO<sub>2</sub>を長期間にわたり貯留することが可能になると考案された。これは、特に地質的に古い地層に石油・天然ガスが胚胎している欧米にて支持されている考えであり、岩塩ドームなどを貯留対象とする考えに発展している。また、枯渇した石油井戸にCO<sub>2</sub>を圧入し、油層中に残る原油を流動化させて回収するEORが欧米では実用化されていることから、CO<sub>2</sub>の貯留に石油・ガス田を用いることは自然の流れであった。また、従来は分離して空気中に放出されていた天然ガスに含まれる数%のCO<sub>2</sub>を天然ガス層より上位の地層に戻すことがノルウェーで行われている。ここでは、沖合約240kmの北海中央部のSleipner鉦区石油ガス田から生産される天然ガス中に9%含まれるCO<sub>2</sub>をアミン吸収法で分離し、海底1,000mの砂岩帯水層に貯留を実施している。年間100万トンのCO<sub>2</sub>を1996年より海底帯水層に圧入しており、ノルウェーのCO<sub>2</sub>年間総排出量の3%を削減している(Zweigel *et al.*, 2004)。

我が国では、北海道夕張市での炭層固定実験とともに新潟県長岡市での帯水層へのCO<sub>2</sub>圧入実験があ

る(Tanase *et al.*, 2006)。長岡の地中貯留実験現場は帝国石油岩野原基地内に設定され、ガス田上部の帯水層(深度約1,100m)への圧入を行った。CO<sub>2</sub>地中貯留では、地上設備の最小化や圧入エネルギーの最小化などのために、CO<sub>2</sub>を超臨界状態(臨界点: 7.38 MPa, 31.1°C)にして圧入することが望ましいとされていることから、液体状態で輸送されたCO<sub>2</sub>を加圧、加温して超臨界状態へ相転移させて坑井への圧入が行われた。2003年から2005年にかけて貯留実験が行われ、1日あたり20トンから40トンで合計約1万トンの注入が実施された(第1図)。この長岡の貯留実験は、先行するSleipnerなど商業ベースでの地中貯留とは異なり、温暖化対策としての帯水層貯留に取り組んだ研究プロジェクトであり、圧入量として1万トンと小規模ながらも、数多くの検層や弾性波トモグラフィーなどを実施して貴重な学術的データを残した(Xue *et al.*, 2006; Saito *et al.*, 2006)。

長岡で実施されたような構造性帯水層への圧入は、欧米での帯水層地中貯留にて想定されている圧入形態であり、石油・ガス田が発達している地域では説得力のある地中貯留方法と考えられている。しかし、変動帯に属する我が国では、CO<sub>2</sub>をその場に保持させて地層からの漏洩を防ぐために必要なキャップロック(帽岩)が完全無欠であり、小さな割れ目や古い孔井のような漏洩箇所がまったくないことを事前に



第2図 産総研が想定する一般帯水層での地中貯留(イメージ図)。

証明することが難しい。また構造性帯水層に貯留を限定すると、いわゆる大規模発生源(石炭火力発電所、製鉄所、セメント工場などが対象といわれている)近傍に構造性帯水層が常に存在するとの保証が得られず、発生源からのCO<sub>2</sub>輸送費用が必要となる。CO<sub>2</sub>地中貯留など地球温暖化対策は、京都議定書の遵守という国として実施が要求されている事業であるものの、実際の圧入などによるCO<sub>2</sub>削減は、民間が事業として実施することになる。このため、貯留にかかる費用は、実施に当たって重要な因子となりうる。

一方、1990年代には、石油天然ガスに類似性を求めた構造性帯水層への貯留とは異なり、水溶性天然ガスに類似性を求めた帯水層貯留の考え方が表明された(小出, 1993)。この帯水層貯留では、石油や天然ガスにある構造的な貯留構造を必要としないことから、非構造性(ないしは一般)帯水層貯留と称されている。構造性帯水層貯留が凸状の地層内にCO<sub>2</sub>を物理的に封じ込めるのに対し、非構造性帯水層貯留では、圧入されたCO<sub>2</sub>は溶解するか気体ないしは超臨界状態のCO<sub>2</sub>として滞留する。地質構造に由来する貯留メカニズムを必要としないことから、非構造性帯水層貯留では塩水に満たされた帯水層が存在することが貯留の必要条件となる。たとえば、千葉県

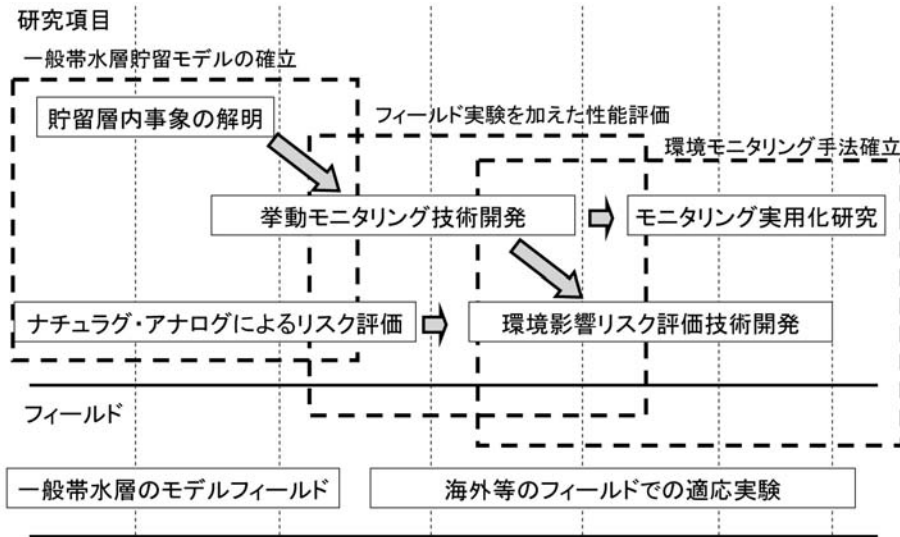
の地域などの塩水帯水層には、メタンなどの水溶性のガスが溶解している地層があり、これらは水溶性天然ガスとして利用されてきた。このような水溶性ガスを包有する地層は、向斜構造、一様に傾斜する単斜構造、背斜構造など様々な地質構造を取っている。このため、ドーム構造という地層の地形学的な形態に支配される構造性帯水層へのCO<sub>2</sub>地中貯留に比べ、その貯留可能地域が比較的に増大する。多くが沿岸域に立地している大規模排出源近くにも、水溶性天然ガス田やメタンを溶解した化石塩水帯水層の存在が確認されているので、非構造性帯水層への貯留は、コストが安く大量処理が可能になる(第2図)。

### 3. 非構造性帯水層への貯留

水溶性天然ガスに類似性を求めた非構造性CO<sub>2</sub>帯水層貯留では、CO<sub>2</sub>が溶解できる塩水があることが必要条件であることから、我が国沿岸に大きく分布する一般帯水層にその適応範囲を広げることが可能と考えられる。しかし、このような非構造性帯水層にCO<sub>2</sub>地中貯留の適応範囲を広げるに当たっては、解決すべき様々な問題がある。それらは、

- 1) CO<sub>2</sub>を圧入した帯水層内では何が起

## CO<sub>2</sub>一般帯水層貯留研究アロー



第3図 事業化まで想定される研究の流れの一案。

るのか？

- 2) CO<sub>2</sub>を貯留するメカニズムは何か？
- 3) どのくらい長期にわたって貯留が可能なのか？
- 4) 地層や既存の坑井を通じて地表への漏洩はないのか？ あるとすればどの程度か？
- 5) 非構造的帯水層に対しても圧入の技術は完成された技術か？
- 6) 圧入されたCO<sub>2</sub>や塩水のモニタリング方法は？
- 7) リスクはどのように評価すべきか？
- 8) 法や規制の枠組みは？
- 9) コストは事業に見合うのか？
- 10) 事業を実施するためにはどのようなビジネスモデルがありうるのか？

などに集約される。

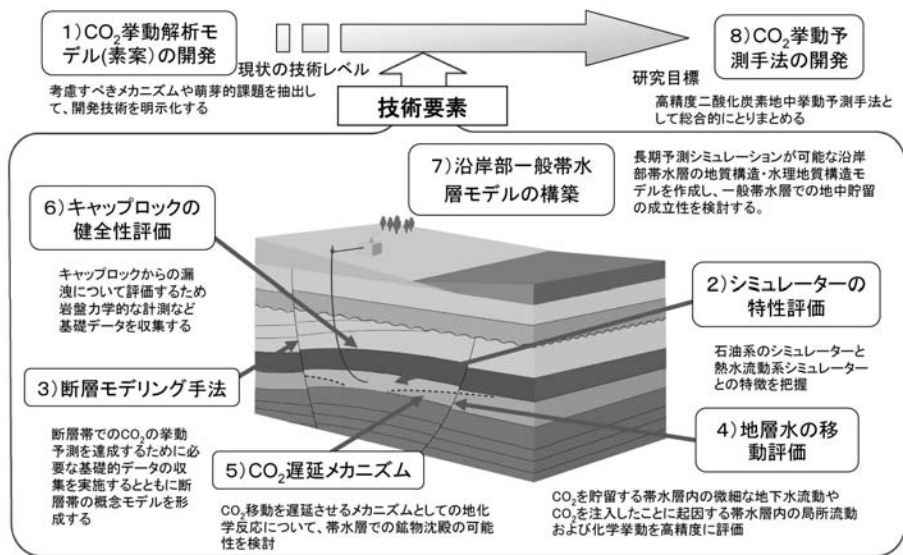
産業技術総合研究所(産総研)では、第2期中期計画・目標の中で今後重点的に研究開発を進める分野としてCO<sub>2</sub>の地中貯留研究を選定した。この研究対象はCO<sub>2</sub>地中貯留全般にわたるが、研究の最終目標は地中貯留の事業化の実現である。この目標を受けて、地圏資源環境研究部門では、平成17年度より産総研の重点化予算として「CO<sub>2</sub>地中貯留のための基礎的研究」を開始するとともに、今後必要な技術開

発の先駆けとして貯留層内でのCO<sub>2</sub>の挙動を総合的に、また、科学的に説明することを研究目標として、(財)地球環境産業技術研究開発機構(RITE)からの委託研究「高精度地中挙動予測手法の研究」に着手をした。この研究プロジェクトは、帯水層の中で起きているCO<sub>2</sub>や塩水の挙動を解明することが目標となっているが、地中貯留の事業化のためには、モニタリング技術やリスク評価技術など解決すべき技術課題が残っている。貯留層内で起きている事象が解明できれば、それらの現象を最も効果的に検出する方法が検討でき、効果的なモニタリングを検討することができる。また、貯留層内の現象をシミュレーションにより数値的に再現することができれば、リスク評価などの評価手法の開発や法的整備、規制などへの基礎を作ることができることとなる。産総研にて指向している事業化に至る研究展開の試案を第3図に示す。

#### 4. 高精度地中挙動予測手法の研究

帯水層内でのCO<sub>2</sub>の地層水への溶解や岩石-水反応による鉱物としての沈殿をはじめとして、CO<sub>2</sub>を圧

## 予測手法の研究対象・概略



第4図 「高精度地中挙動予測手法の研究」でのサブテーマ。

入する地層周囲の岩盤の状態を把握することは、地層や帯水層内のCO<sub>2</sub>の挙動を予測評価するために重要な技術であり、今後事業化に当たって実施されるリスク評価やモニタリングにとって必要不可欠である。高精度地中挙動予測手法の目的は、この喫緊の課題を調査研究開発してCO<sub>2</sub>地中貯留の事業化に資する技術を開発することであり、「帯水層にCO<sub>2</sub>を圧入する地中貯留にて、帯水層で起こる諸現象を総合的、科学的に解明する」ことが目標となっている。なお、この研究開発は、(財)電力中央研究所(電中研)との共同受託となっている。電中研の研究は、主に地表近くの地層を対象として、地表近くへのCO<sub>2</sub>の漏洩があった場合の生活圏への影響の評価である。第4図には、産総研の実施する研究のイメージを示す。産総研での研究は、8つのサブテーマに分かれており、それぞれの内容や研究目標は以下の通りである。

### 1) CO<sub>2</sub>地中挙動解析モデル(素案)の作成

長岡やSleipnerなど我が国や欧米各国で実施されたCO<sub>2</sub>貯留研究の成果を検討し、帯水層にCO<sub>2</sub>を貯留することによって生じる様々な現象を整理する。この中で、CO<sub>2</sub>地中挙動を考える上で考慮すべきメカニズムを抽出し、今後研究や調査が必

要な内容・項目を明らかにする。

### 2) シミュレータの特性把握

CO<sub>2</sub>の貯留ポテンシャル評価や貯留計画の立案において、帯水層へ圧入されたCO<sub>2</sub>の挙動予測を行うことは不可避であり、このためには数値シミュレーションが重要な役割を担う。この数値シミュレーションを実行するために、いくつかのシミュレータが使用されているが、シミュレータの信頼性を確認する上で、独立に開発されたシミュレータの相互比較が有効と考えられており、米国ローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)のグループのイニシアチブのもとに複数のシミュレータの相互比較が行われた(Pruess *et al.*, 2002a, b)。本研究テーマでは、利用可能なシミュレータの特徴を把握するため、同じモデルを設定して比較計算を実施する。この比較計算では、帯水層で想定される温度・圧力範囲をカバーするよう例題を作成し、温度が一定の場合や不均一な温度分布が存在する場合でのシミュレーションを実施する。それぞれのシミュレータの特性を把握することにより、帯水層モデルにてシミュレーションを実施する場合の留意点を明らかにし、精緻なシミュレーションを実施することが可

能となる。平成18年度以降は、非構造的帯水層のモデルフィールドでの帯水層モデルを構築し、水理シミュレーションを行うことにより成果の発信を図っていく。

### 3) 断層モデリング手法の開発

我が国の地質構造を考慮するとき大きな特徴の一つである断層帯でのCO<sub>2</sub>の挙動予測を達成するため、必要な基礎的データの収集を実施する。断層には、地質的に大きなずれを伴って出現している断層と、面なし断層と呼ばれる微細な亀裂(微小断層)とがあるが、地震探査反射法などに現れない微小断層がCO<sub>2</sub>の漏洩源になるのであれば、主要な断層を伴う断層を評価とともに、貯留予定地点での微小断層の評価も必要となってくる。このため、この研究では、軟岩中の微小断層のCO<sub>2</sub>移行経路としての可能性について、人工的な断層の有無による浸透率を深度に相当した封圧の関数として測定することにより、微小断層の評価を行う。研究は、岩石試料に人工的な微小亀裂を発生させて間隙圧振動法(高橋・金子, 2003)による浸透率を測定して、微小亀裂の評価を行う。

また、CO<sub>2</sub>地中貯留に対して、断層は地層の裂け目であり高い透水性を持つ通路として作用するという考え方と野外の露頭で見る断層は鉱物で充填されていることから断層は鉱物の沈殿が起こってCO<sub>2</sub>の漏洩を妨げるという考え方もある。様々な断層の情報・データを収集し断層の持つ力学的な性質について検討を行う。

### 4) 帯水層における地層水移動評価手法

帯水層貯留においては、CO<sub>2</sub>圧入に起因して局所的な地下水流動が発生すると考えられており、圧入直後の挙動予測を行うためには、地下水の微細な挙動を高精度に把握することが求められている。また、地中貯留において対象となっている沿岸域などの帯水層は、塩淡水境界面より下位に位置するため地形勾配による淡水地下水流動の影響が及ばないことから、停滞性が高いと考えられているものの、長期間の貯留においては、このような停滞性の高い地下水の低速の流れにより、貯留したCO<sub>2</sub>が遠方へ運ばれる可能性がある。このため、深部かつ広域での地下水流動の評価はCO<sub>2</sub>の挙

動予測に求められている研究項目である。しかし、従来の地下水資源開発では循環性の浅部地下水が研究対象であり、停滞性が高く、流速や地球化学的な特性が異なる地中貯留に及ぼす地下水流動の評価のためには新しい手法を開発する必要がある。

一方、地下温度の測定は高精度の原位置測定が可能であり3次元分布を局地から広域まで把握することができる。また、全国規模で沿岸部や都市部のデータも蓄積されていることから、本サブテーマではこの地下温度分布を元にした地下水流動評価手法の開発を行う。

### 5) CO<sub>2</sub>遅延メカニズムの研究

帯水層内でのCO<sub>2</sub>移動を遅延させる(すなわち貯留を促進する)トラッピングメカニズムとしては、構造的帯水層での地形学的なメカニズムのほか、CO<sub>2</sub>の塩水への溶解や鉱物としての沈殿などの地化学的メカニズムや気体が微細な割れ目の中に取り残される残留ガストラッピングなどが考えられている。このようなトラッピングメカニズムの中から地化学遅延反応の可能性についての検討から開始する。

CO<sub>2</sub>を注入する帯水層で地化学的变化は、貯留層を満たした地層間隙水の化学的变化および間隙水と堆積岩構成鉱物との相互作用である。この間隙水は、地域や地層によってその性質を変えている。このため研究では、①地化学変化に関する概念モデルの作成を行った後、どの地域での貯留に対しても答えられるように②地層間隙水組成のデータベース化を行って情報を整理する。その中で、③岩石化する続成変化と安定な自生鉱物の相平衡論的な検討を④予備的相平衡シミュレーションなどにより行う。実際の貯留では、相平衡から進んだ反応速度を考慮する必要があることから、⑤鉱物の溶解/沈殿反応速度データの文献と室内実験による収集、⑥反応速度を考慮した地化学的シミュレーションなどを実施してCO<sub>2</sub>貯留層に予想される種々の変化を総合化し、説明可能な形で提示する。

### 6) キャップロックの健全性評価の研究

キャップロックは貯留層内からCO<sub>2</sub>が上方に漏

洩するのを阻止する地質構造であり、CO<sub>2</sub>の長期的な貯留を達成するために重要な地質構造である。このため、本研究テーマでは、基礎データの収集や岩盤力学的な計測を実施してデータの蓄積を図るとともに、貯留層内のCO<sub>2</sub>の動きからキャップロックからの漏洩を摘出するために弾性波トモグラフィなど現地計測に必要な計算手法の開発などを実施する。岩石力学的な計測では、軟岩のデータはほとんど皆無であることから、キャップロックとして認識される岩石の岩石力学的データの収集を図る。また、長岡の貯留実験では弾性波トモグラフィが実施され、CO<sub>2</sub>の移動の一翼を説明することに成功した(Saito *et al.*, 2006)。しかし、これは弾性波の速度変化が捕らえられたのみであり、この計測結果から、CO<sub>2</sub>の分布(飽和率)に換算するためには、実験室内での制御された実験や解析理論も必要となる。本研究では、実フィールドでの実験結果を解析、評価する手法の開発を行う。

## 7) 沿岸部一般帯水層モデルの構築

帯水層中に圧入したCO<sub>2</sub>の長期地中挙動予測を実行するため、挙動メカニズムの解明に必要な物性パラメータを既存データから収集するとともに、長期予測シミュレーションが可能な具体的地点の沿岸部帯水層の地質構造・水理地質構造モデルを作成し、一般帯水層での地中貯留の成立性を検討する。

本研究では、モデル地区を選定し、地質図幅等既存文献や研究論文を収集して、シミュレーションに供するための三次元メッシュデータを作成する。このような広範囲における深部地下構造を推定できれば、大規模帯水層の分布を把握できる。しかし、多くの地質データは測線方向の異なる1次元データあるいは面的に広がる2次元データであるため、地球統計学的な補間法を用いて3次元的な地下構造の推定を実施する。

## 8) 二酸化炭素挙動予測手法の開発

今後の地中貯留の事業化に向けて「CO<sub>2</sub>地中挙動予測手法の高度化」の各研究成果を総合的に取りまとめる。一般帯水層での貯留時にCO<sub>2</sub>がどのように挙動するのかについて既存の知見を集大成し、数値シミュレータによるCO<sub>2</sub>地中挙動をシミュ

レートすることにより、メカニズムに対する現在の理解の範囲と今後の課題を示す。また、CO<sub>2</sub>地中挙動予測をもとに、最適な挙動モニタリングの提案を行うとともに、実データに基づき、隔離性能・長期のCO<sub>2</sub>挙動を示すことを目標としている。

## 5. おわりに

地層中において、超臨界状態で圧入されたCO<sub>2</sub>がどのような状態で滞留しているのか、どのように移動するのか、どの程度帯水層に溶けるのか、どのような鉱物として固定されるのか、また、気体が微細な構造に取り残される残留ガストラッピングはどの程度気体を貯留層内にとどめるのかなど帯水層のCO<sub>2</sub>の挙動については不明な部分が多い。また、圧入されたCO<sub>2</sub>の移動をどのようにモニターをすればよいのか、CO<sub>2</sub>の漏洩はどの程度発生するのか、漏洩に対するリスク評価はどのような指針で行えばよいのか、事業化のためのビジネスモデルはどのように設定するかなど、地中貯留の事業化に対して開発すべき技術課題はまだまだ多い。産総研が実施する「高精度地中挙動予測手法」の研究目的は、この喫緊の課題に対して解法方法を探してCO<sub>2</sub>地中貯留の事業化に資する技術を開発することである。

この「高精度地中挙動予測手法」の研究テーマ以外にも地中貯留の事業化にとって重要なテーマがある。このため、産総研では第3図の中にある「ナチュラグ・アナログによるリスク評価」の研究などの研究開発を進めているほか、地中貯留にて断層帯を通じた漏洩以外の主な原因として考えられている既存坑井などの人工物からの漏洩についても研究開発を実施している。この既存坑井からの漏洩は、ケーシングと地層との間を充填するセメントなどがCO<sub>2</sub>酸性環境により劣化し、CO<sub>2</sub>の漏洩の原因になると考えられているものである。このような漏洩に対しては、CO<sub>2</sub>の環境に適したセメントの開発などの技術開発が行われている(山田ほか, 2005)ほか、米国のZERT (Zero Emission Research and Technology) 研究プログラムでは実際のCO<sub>2</sub>を圧入した坑井の周囲を再び掘削して影響の評価を行っている(たとえば, Stauffer *et al.*, 2005)ことから、産総研でも坑井周囲の環境を評価する手法の開発に着手している。

このような地中貯留に係る研究は昨年度から開始

されているものの、3年間という短い研究期間の中でCO<sub>2</sub>の帯水層内での挙動の全貌を明らかにしなければならぬため、地圏資源環境研究部門ならびに多くの機関の支援を受けて研究の推進を図っている。

- 1 京都議定書では地球温暖化ガスとして、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、ハイドロフルオロカーボン酸、パーフルオロカーボン酸、六フッ化硫黄の6種類を挙げているが、二酸化炭素が最も排出量が多い。

#### 参 考 文 献

- 小出 仁 (1993) : CO<sub>2</sub>地中貯留のための地質工学的課題, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 157-160.
- 西岡秀三・原沢英夫 (編) (2003) : 地球温暖化と日本～自然・人への影響予測～, 古今書院, 256p.
- Pruess, K., Bielski, A., Ennis-King, J., Fabriol, R., Le Gallo, Y., Garcia, J., Jessen, K., Kavscek, T., H.-S. Law, D., Lichtner, P., Oldenburg, C., Pawar, R., Rutqvist, J., Steefel, C., Travis, B., Tsang, C.-F., White, S. and Xu, T. (2002a) : Code intercomparison builds confidence in numerical models for geologic disposal of CO<sub>2</sub>, Proc. GHGT-6, F1-4.
- Pruess, K., Garcia, J., Kavscek, T., Oldenburg, C., Rutqvist, J., Steefel, C. and Xu, T. (2002b) : Intercomparison of numerical simulation codes for geologic disposal of CO<sub>2</sub>, LBNL-51813, 86p.
- Saito, H., Azuma, H., Nobuoka, D., Tanase, D. and Xue, Z. (2006) : Time-lapse crosswell seismic tomography for monitoring the pilot CO<sub>2</sub> injection into an onshore aquifer, Nagaoka, Japan. Proc. GHGT-8, Poster, 309-310.
- Stauffer, P., Viswanathan, H., Guthrie, G., Pawar, R., Kaszuba, J., Carey, J., Lichtner, P., Ziock, H., Dubey, M., Olsen, S., Chipera, S. and Fessenden, J. (2005) : A CO<sub>2</sub> Sequestration Systems Model Supporting Risk-Based Decisions, GC13A-1206, AGU fall meeting.
- 高橋美紀・金子貴信 (2003) : 間隙圧オシレーション法による浸透率・比貯留率測定方法と岩石の変形試料に対する適用例, 資源と素材, 119, 501-507.
- Tanase, D., Ohkuma, H., Inoue, N., Kawata, Y. and Ohsumi, T. (2006) : Pilot CO<sub>2</sub> injection into an onshore aquifer in Nagaoka, Japan and its simulation study. Proc. GHGT-8, G1-2.
- Xue Z., Watanabe, J., Inoue N. and Tanase, D. (2006) : Time-lapse well logging to monitor the injected CO<sub>2</sub> in an onshore aquifer, Nagaoka, Japan, Proc. GHGT-8, D1-2.
- 山田泰広・川崎彰和・杉山直豊・田中大介・村田澄彦 (2005) : 超臨界二酸化炭素による地層バリアの劣化実験 (その1), 地球惑星科学連合学会2005合同大会, L093-007.
- Zweigel, P., Arts, R., Lothe, A. and Lindeberg, E. (2004) : Reservoir geology of the Utsira formation at the first industrial-scale underground CO<sub>2</sub> storage site (Sleipner area, North Sea), In Geological Storage of Carbon Dioxide, Baines, S. and Worden, R. (eds), Geol. Soc. London, Spec. Pub., 233, 165-180.
- TOSHA Toshiyuki (2006) : Study on the CO<sub>2</sub> geological sequestration in a saline aquifer.

<受付: 2006年4月3日>