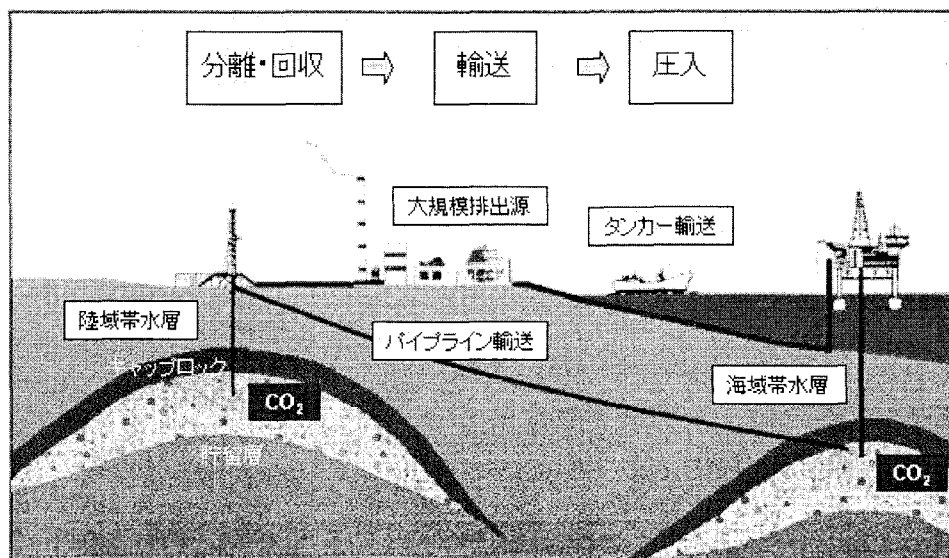


二酸化炭素地中貯留技術開発の現状について

地球環境産業技術研究機構 薛 自求・大隅 多加志

1. はじめに

地球温暖化は温室効果ガス、とりわけ大気中の二酸化炭素（CO₂）濃度の増加が主な要因と考えられている。日本では排出される温室効果ガスの約 95%が CO₂であり、それらの CO₂の約 30%は火力発電所などの大規模発生源から排出されている。大規模発生源の排ガスから CO₂を分離・回収し、地下深部の帯水層に貯留する技術開発が行われている。図－1 は CO₂地中貯留プロセスの概念図であり、技術の大半は天然ガスの地下貯蔵や原油増進回収などで蓄積した技術を応用できることから、最も実用化に近い技術として期待されている。



図－1 CO₂地中貯留プロセスの概念図

排ガスからの CO₂分離・回収技術は石油増進回収(EOR)事業により商業ベースとして確立されている。輸送技術は同じく EOR 事業でパイプライン方式が実用化されている。世界初の CO₂ 地中貯留はノルウェー沖合いの SASC(Saline Aquifer CO₂ Storage)プロジェクトである。Statoil 社の Sleipner ガス田で実現された SASC プロジェクトでは、天然ガスに随伴する CO₂を分離・回収してから再び地中に圧入している。1996 年以来年間約 100 万トンの CO₂地中貯留を商業ベースで行われている。また、EOR 事業ではカナダ西部サスカチュワン州の Weyburn Monitoring Project が注目を集めている。Weyburn 油田では 95%濃度の CO₂を日量 5000 トン油田に圧入し、プロジェクト終了までにおよそ 2000 万トンの CO₂が地中に圧入される。Weyburn は豊富な地質データや生産量記録を有するユニークな油田であり、CO₂圧入による石油増進回収技術の研究開発の格好のフィールドとなった。一方、日本国内では帝国石油岩野原坑井基地（新潟県長岡市）での CO₂圧入実証試験が実施されている。本報告では国内外の CO₂貯留プロジェクトの概要を紹介しながら、地中貯留技術開発の現状について述べる。

2. 地中貯留プロジェクトの現状と課題

現在進行中及び計画中の CO₂ 地中貯留プロジェクトは帯水層貯留と EOR 事業に大きく分けることができる。EOR 事業は圧入された CO₂ と原油との混和性置換プロセスを利用して石油の増進回収を図っている。例えば、カナダの Weyburn 油田はプロジェクト期間中少なくとも 1 億 3000 万バレルの石油が増進回収されると見込まれている。EOR 事業によって、油田の寿命が約 25 年延長されるとも指摘されている。これに対し、帯水層貯留では経済利益がほとんど伴わないため、EOR 事業よりは商業ベースへのハードルが高い。Sleipner がス田では環境問題に関する EU の法律も関連して、海底下帯水層へ天然ガス精製時の CO₂ を圧入している。CO₂ 圧入はガス田の操業期間中継続され、2022 年までに約 2000 万トンの CO₂ 圧入が見込まれている。これらのプロジェクトの研究成果が徐々に公開されており、地中貯留の経済性や安全性の検討に大きく寄与している。

(1) SASC プロジェクト

図-2 は Sleipner がス田における CO₂ 圧入の概要を示している。圧入対象層は第三紀の固結度の低い Utsira 砂層 (porosity: 35~40%) である。海底下約 1000m に位置する Utsira 砂層の厚さは 150~250m となっており、その浸透率は 1~8 darcy と極めて高い。また、地層水の温度は約 37℃ であり、圧力は 8~11MPa となっている。

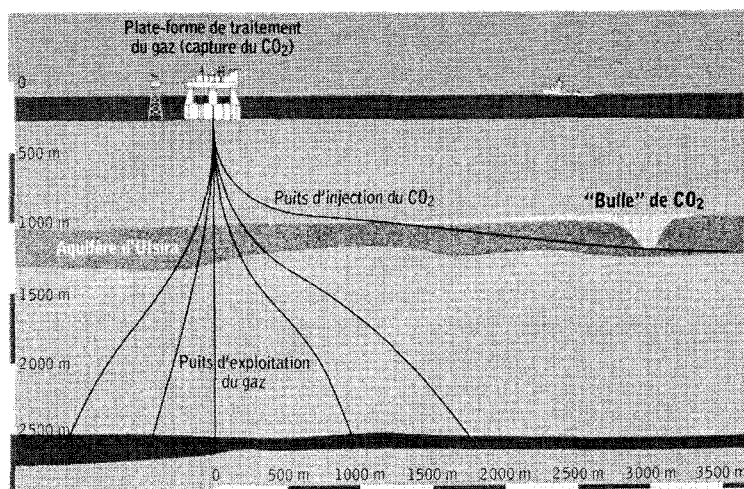
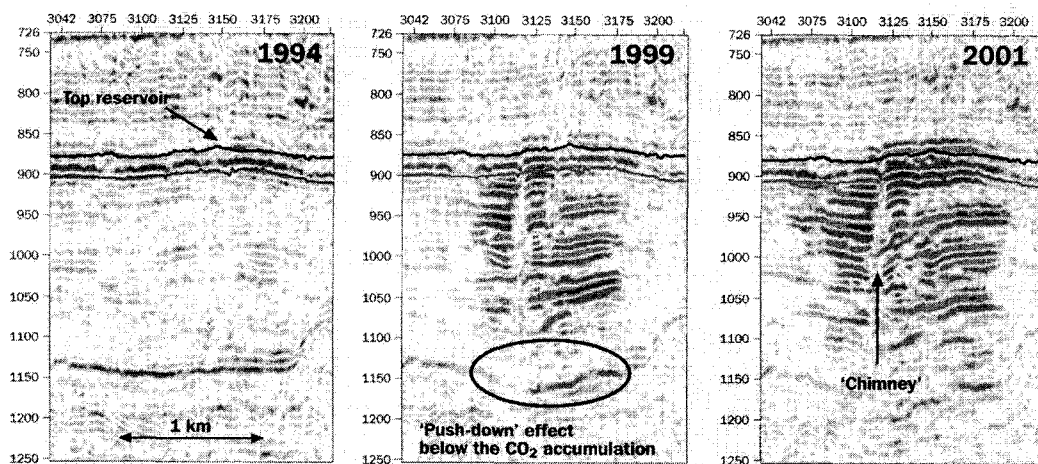


図-2 Sleipner サイトの地質及び CO₂ 圧入の概要図

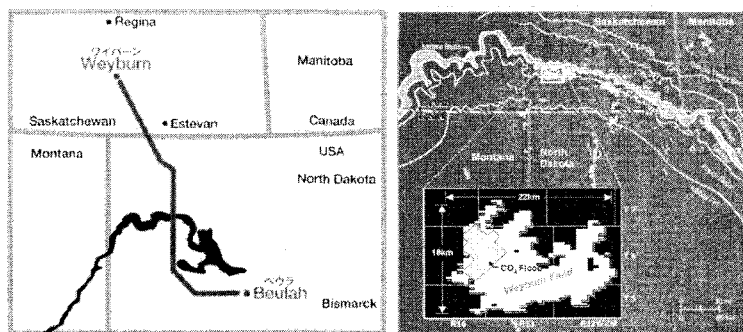
Utsira 砂層に圧入された CO₂ の約 18% は地層水に溶解し、残りの CO₂ が地層水との密度差によって貯留層上部へ移行すると考えられている。SASC プロジェクトでは繰返し反射地震探査法 (4D Seismic Survey) を用いて、細粒かつ等方的な砂層中を拡散する CO₂ 挙動をモニタリングしている。ベースライン測定は CO₂ 圧入前の 1994 年に実施された。このプロジェクトでは約 228 万トン CO₂ を圧入した 1999 年に 1 回目の測定を実施し、さらに 426 万トン を圧入した 2001 年に 2 回目の測定を実施した。これらの地震探査の結果を図-3 に示す。1994 年の探査結果より圧入ポイント上方にわずかなドーム状のクローチャーを確認することができる。CO₂ 圧入後の探査結果を基に、Utsira 砂層内に強い反射を伴う領域は CO₂ の存在と解釈されている。圧入された CO₂ は Utsira 砂層の下部より厚い頁岩層からなるシール層まで達しているが、頁岩層への CO₂ 浸透の徴候は認められない。また、頁岩層下部に達した CO₂ は側方 (図中右側) へ大きく広がっている。ここでは CO₂ 圧入による地層水圧の上昇がほとんどみられないことから、弾性波に生じた変化は貯留層内の CO₂ 飽和度の増加によるものと解釈できる。反射地震探査の結果は貯留層シミュレーションモデルの改善にも利用され、CO₂ 長期挙動予測や地中貯留安全性の検討に貴重な知見を与えている。



図－3 Sleipner サイトで実施された地震探査の解析結果

(2) Weyburn モニタリングプロジェクト

2000 年 7 月に「IEA Weyburn CO₂ Monitoring and Storage Research Project」がカナダ西部の Weyburn 油田で開始され、2003 年 11 月に Phase I が終了した。図－4 はプロジェクトの概要を示しており、圧入する CO₂ は米国ノースダコタ州のガス製造会社から購入され、約 320km のパイプラインを利用して Weyburn 油田まで運ばれている。CO₂ 圧入による石油増進回収は実用技術であり、アメリカではすでに商業ベースに乗っているが、Weyburn 油田では貯留層に圧入された CO₂ 挙動の把握や貯留層岩石と CO₂ との間の化学反応などに焦点をあてている。



図－4 Weyburn モニタリングプロジェクトの概要図

プロジェクトの第 1 の目的は CO₂ 地中貯留に関する知見の獲得にある。貯留層の上位地層は主に石灰岩より構成されるが、下位地層は主に苦灰質石灰岩より構成されている。これらの地層の厚さは大きくばらついており、上位層では 10 ～ 22m、また下位層では 1 ～ 11m となっている。さらに、開口ないし鉱物によって充填された亀裂系がよく発達しているため、Sleipner サイトより複雑な地質構造を有する。Weyburn 油田では弾性波速度ではなく、波動振幅の変化に基づいた波形解析が行われており、図－5 にその一例を示す。圧入された CO₂ の挙動は亀裂系より著しく影響されていることが明らかになった。地震探査法のほかに、トレーサーなどを用いた地球化学手法も同時に実施されている。第 2 の目的は CO₂ 地中貯留を商業ベースで実施する場合の経済性評価モデルの開発である。Phase I の終了に伴って、現在はキャップロックのシール性評価や弾性波探査結果に基づく CO₂ 貯留量評価などを中心とする Phase II が検討されている。

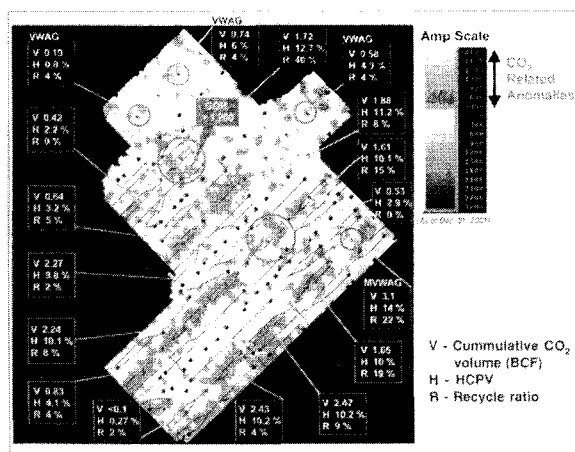


図-5 4D地震探査結果に基づいたCO₂挙動モニタリングの一例

(3) 国内のCO₂地中貯留プロジェクト

地球環境産業技術研究機構（RITE）では、国内初のCO₂地中貯留プロジェクトを進めている。経済産業省の指導の下、国の補助事業としての5ヵ年プロジェクトであり、今年度がプロジェクトの4年目にあたる。図-6はプロジェクトの主な研究項目とその工程表である。

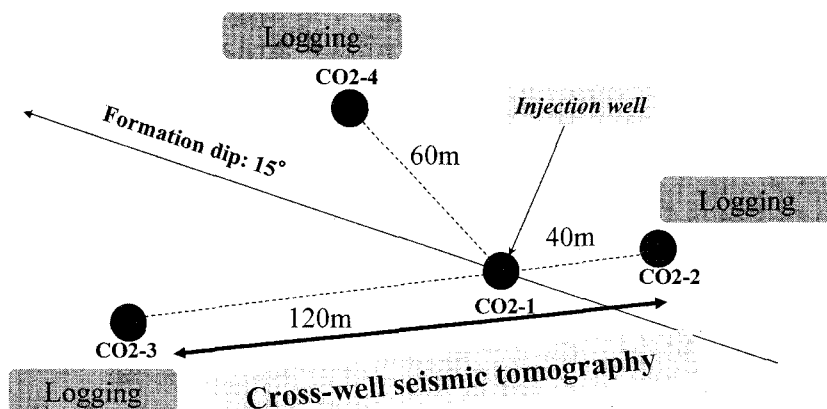
項目	年度	平成12	平成13	平成14	平成15	平成16
1)基礎研究等						
①基礎実験		基礎調査調査	CO ₂ 溶解度、貯留層とCO ₂ の反応測定			貯留層調査
②モニタリング手法検討			環境影響および安全性の検討			貯留層調査
③システム研究		CO ₂ 回収・注入のエネルギー収支・経済性検討	社会影響調査			貯留層調査
④シミュレーション技術開発(CO ₂ 挙動の長期予測技術)		概念設計・数値モデル設計	シミュレーション改善	モデルの最適化		貯留層調査
2)CO ₂ 圧入実証試験(地下1200mの帯水層)		圧入井掘削	観測井掘削	小規模CO ₂ 圧入試験(第2期)		貯留層調査
3)地質調査		既存資料収集	帯水層データベース作成	地質調査		貯留層調査

図-6 地中貯留プロジェクトの主な研究項目及びその工程

基礎研究等では地層水-CO₂系における岩石鉱物の溶解速度データの取得や多孔質砂岩へのCO₂注入に伴う弾性波速度変化の測定が行われている。これらの測定結果は帯水層に圧入されたCO₂の長期挙動を予測するためのシミュレータ開発にフィードバックされる。また、システム研究では国内の大規模発生源の位置、分離・回収、輸送手段及び貯留地点を総合的に評価し、CO₂地中貯留のコスト、安全性及び社会的受容性等についても検討を加えることになっている。

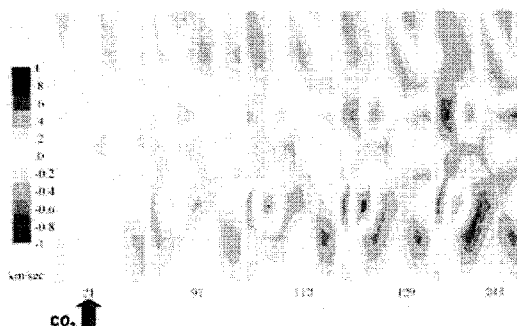
一方、圧入実証試験についてはエンジニアリング振興協会が中心となって、帝国石油の南長岡がス田の岩野原坑井基地（新潟県長岡市）で実施されている。ここでは1本のCO₂圧入井と3本の観測井が掘削されており、CO₂圧入対象層は深度約1000mにある砂岩層である。

図－7 は圧入井と観測井の配置を示しており、CO₂挙動のモニタリングには観測井での物理検層及び坑井間弾性波トモグラフィ測定が行われている。平成 15 年 7 月より CO₂圧入が開始され、12 月 14 日までの累積圧入量は約 2400 トンである (20ton/day)。CO₂ 圧入前に坑井間弾性波トモグラフィのベースライン測定が実施され、圧入後の 1 回目の測定が平成 15 年度内に予定されている。陸域帯水層へ圧入された CO₂挙動のモニタリングに坑井間弾性波トモグラフィ測定を実施するのは、岩野原実証試験サイトが国内外において初めての試みであり、地中貯留関係者の注目を集めている。



図－7 岩野原実証試験サイトの構成配置及び CO₂モニタリング手法

Sleipner や Weyburn プロジェクトで実施された弾性波探査結果より、その有効性は認められているが、解決すべき課題も多く残されている。まず、CO₂は地層水圧よりも高い圧力で帯水層に圧入されるため、CO₂圧入によって地層水圧が増加する現象が報告されている。このため、弾性波探査の結果が貯留層内の CO₂飽和度の増加と地層水圧増加の複合効果として観測される可能性が高い。次に、貯留層に圧入された CO₂は圧入井から遠方へ均一に広がるのではなく、地層の不均質性や地質構造の弱線に左右されながら選択的に広がっていく。地質構造が複雑な日本では特に注意を払う必要があると考えられる。帯水層に圧入された CO₂挙動のモニタリングだけでなく、地中貯留の長期安全性の検討にも役立つ。図－8 は弾性波トモグラフィを用いて、多孔質砂岩試料に注入した CO₂挙動をモニタリングした結果の一例を示している。試料下端より注入された CO₂が選択的に上端へ浸透している様子が確認できる。



図－8 多孔質砂岩試料に注入した超臨界 CO₂観測の一例

3. CO₂ 地中貯留の課題と岩盤力学の役割

火力発電所などの大規模発生源の排ガスから CO₂ を分離・回収して、地下深部の帯水層に貯留する技術開発は経済性と安全性の両面から検討する必要がある。RITE では地中貯留に関するシステム研究も行われている。これまでの試算結果によると、地中貯留にかかるコストの大半は CO₂ の分離・回収が占めている。排ガスからの CO₂ を効率的かつ経済的に分離・回収する技術の革新によるコスト削減が強く求められている。

一方、帯水層への圧入については、CO₂ 圧入技術そのものはほぼ EOR 事業で確立されているが、圧入された CO₂ 挙動の把握や長期挙動予測技術の確立が望まれている。地中貯留安全性の検討には岩盤力学や物理探査の知見が必要とされている。例えば、圧入サイトをどのような基準で選定するかについては、地質情報や貯留層岩盤の力学特性が重要な判断材料となる。CO₂ 圧入に伴う地層水圧の増加によるキャップロックの力学安定性やシール性への影響評価はまだはじめたばかりである。

参考文献

- 1) R. Arts; Estimation of the mass of injected CO₂ at Sleipner using time-lapse seismic data, TNO-NITG INFORMATION, May, 4-5, (2002).
- 2) R. Arts, O. Eiken, A. Chadwick, P. Zweigel, L. Van der Meer, B. Zinszner; Monitoring of CO₂ injected at Sleipner using time-lapse seismic data, Proc. GHGT6, 347-352, (2002).
- 3) A. Baklid, R. Korbol and G. Owren; Sleipner vest CO₂ disposal, CO₂ injection into shallow underground, SPE 36600, 269-277, (1996).
- 4) T. Davis, M. Terrell, R. Benson, R. Cardona, R. Kendall and R. Winarsky; Multicomponent seismic characterization and monitoring of the CO₂ flood at Weyburn field, Saskatchewan, The Leading Edge, July, 696-697, (2003)
- 5) G. Hoversten, R. Gritto and E. Gasperikowa; Crosswell seismic and electromagnetic monitoring of CO₂ sequestration, Proc. GHGT7, 371-376, (2002).
- 6) G. Li; 4D seismic monitoring of CO₂ flood in a thin fractured carbonate reservoir, The Leading Edge, July, 690-695, (2003)
- 7) O. Nes, R. Holt and E. Fjaer; The reliability of core data as input to seismic reservoir monitoring studies, SPE 65180, 577-586, (2000)
- 8) Z. Wang and A. Nur; Effects of CO₂ flooding on wave velocities in rocks with hydrocarbons, SPE Reservoir Engineering, 429-436, (1989)
- 9) Z. Wang, M. Cates and R. Langan; Seismic monitoring of a CO₂ flooding in a carbonate reservoir: A rock physics study, Geophysics, 63, 1604-1617, (1998).
- 10) Z. Xue, T. Ohsumi and H. Koide; Laboratory measurements of seismic wave velocity by CO₂ injection in two porous sandstones, Proc. GHGT6, 359-364, (2002)
- 11) Z. Xue and T. Ohsumi; Seismic wave monitoring of CO₂ migration in water-saturated porous sandstone. Accepted to J. Soc. Exp. Geophys., (2003)
- 12) 薛 自求・大隅 多加志; 弾性波による多孔質砂岩に圧入した CO₂ のモニタリングについて, 平成 15 年度物理探査学会秋季大会講演論文集, 199-201, (2003)