

研究課題名： 我が国における CCS 実現における課題の抽出・整理と岩盤工学の果たす役割に関する調査研究

研究代表者： 京谷孝史 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻

研究メンバー：

長田昌彦 埼玉大学 地圏科学研究センター
岸田 潔 京都大学 大学院工学研究科都市社会工学専攻
吉田秀典 香川大学 工学部安全システム建設工学科
清木隆文 宇都宮大学 大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻
澤田昌孝 電力中央研究所 地球工学研究所地圏科学領域
森岡宏之 東電設計株式会社 地下環境技術部岩盤グループ

(推薦：岩盤力学委員会)

1. 研究の背景

1980 年代後半から一般的に認識されるようになった地球温暖化問題は、「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」の設立 (1988 年)、「気候変動に関する国際連合枠組条約 (UNFCCC, FCCC)」の発効 (1994 年)、第三回締約国会議 (COP3) における「京都議定書」の採択 (1997 年)、発効 (2005 年) といった課程を経て、2008 年から京都議定書の対象期間に入り、温室効果ガス排出の実際的な削減が求められることとなった。削減目標値を遵守するため、各国で排出量削減のための対応策が取られているが、これと並行して京都議定書の第一約束期間が終了する 2013 年以降の国際的な約束、いわゆる「ポスト京都議定書」の枠組み作りに関心が集まっている。

地球温暖化は人類にとっての待ったなしの問題であり、各国とも CO₂ をはじめとする温室効果ガス削減の必要性は十分に認識している。しかしながら、いざ数値目標と年限を掲げることとなると、各国の利害が対立し、うまくまとまらないのが現状である。

CO₂ の回収・地下貯留固定 (Carbon dioxide Capture and Storage: CCS) は、CO₂ の効果的な削減策と考えられているが、実際にはあまり進んでいないのが現状である。北欧や北米など、石油・石油ガスの生産現場では、EOR (Enhanced Oil Recovery) の技術としてその場で回収された CO₂ が地下に貯留されている。CCS 技術は EOR の延長上に位置するものであり、実現性の高いものであるが、なぜ、日本国内で具体的に進行しないのか、本当に我が国で実際的な技術であるのかは、その背景や技術的動向を十分に調べる必要がある。CCS に関連する研究は、EOR を背景としていることから当初から主に石油を中心とした資源関係の技術者の手で進められており、岩盤工学系技術者は現在まで積極的な参画の機会を十分に見出せないでいるのが現状である。しかしながら、我が国の岩盤技術者は、地下石油備蓄など国内での実際的な地下貯留国家プロジェクトにかかわってきており、CCS に貢献する技術は十分に有しているものと考えられる。

本研究課題では、温暖効果ガスの削減の現状の把握、EOR の延長で実施できない我が国の CCS の実行の可能性、および岩盤工学の CCS への技術貢献の可能性を調査・検討を行った。

2. 温室効果ガス削減の現状

図-1 に化石燃料等からの CO₂ 排出量と大気中の CO₂ 濃度の変化を示す。この図からわかるように、CO₂ 排出量と大気中の CO₂ 濃度は、第二次世界大戦後に急激に増加している。その理由は、石油、天然ガスの消費の増大によるものである。第二次世界大戦後の世界経済の急速な進展を支えたのは、石油や天然ガスによるエネルギー生産である。2000 年代になり、石油や天然ガスによる CO₂ 排出量はほぼ一定となり、CO₂ 濃度は微増となっている。ただし、石炭による CO₂ 排出量は着実に増加している。

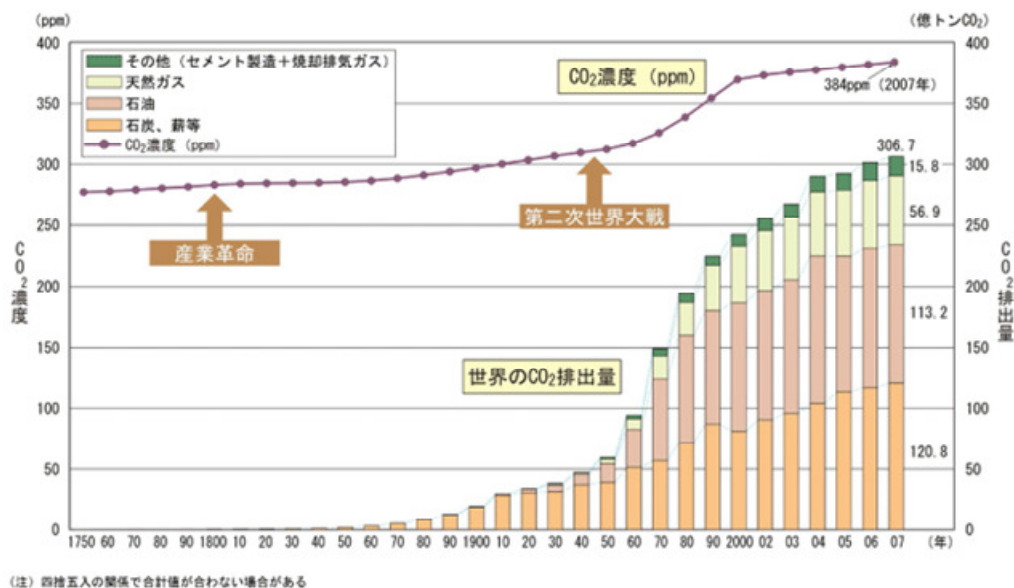


図-1 化石燃料等からの CO₂ 排出量と大気中の CO₂ 濃度の変化 (出典：CDIAC Global Fossil-Fuel Carbon Emission (原子力・エネルギー図面集 2011 より))

図-2 に、1990 年からの我が国の温室効果ガスの排出量の推移を示す。1990 年は、京都議定書に定められた基準年であり、京都議定書の我が国の数値目標は 1990 年比 6 %の削減である。2009 年度における我が国の排出量は基準年比 -4.1%である。2005 年の京都議定書発効から増減を示していた排出量は、2007 年をピークに急激に減少している。これは、リーマンショックによる経済規模の縮小に伴うものであると考えられる。2010 年以降、急激な経済規模の増大がなく安定的に経済動向が推移すれば、森林吸着で 3.8%、京都メカニズムで 1.6%の確保がなされており、ほぼ京都議定書の約束は果たせることになる。一方で、2000 年代初めには排出削減が有効に機能していないため、京都メカニズムで多数の排出権を国・企業が購入したことが想定される。京都メカニズムでの見積もりは 1.6 %であり、高価なうちに排出権を購入した各企業がそれを償却できない事態となれば、経済的な負担を及ぼすことも懸念される。ポスト京都議定書で排出権がキャリーオーバーされるかは、ひとつの注目すべき点である。また、原子力発電所の稼働状況によっては、約束年 (2012 年) までに CO₂ 排出量が急激に増加する懸念も生じる。

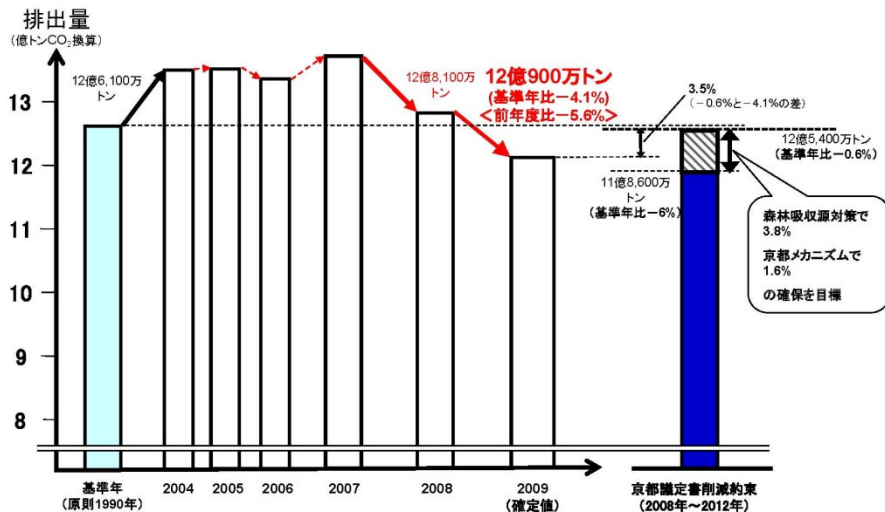


図-2 我が国における温室効果ガス排出量の推移 (国立環境研究所 Web : <http://www.nies.go.jp/whatsnew/2011/20110426/gaiyo.pdf>)

図-3 は、現状技術での CCS コストを示したものである。現状の分離回収・貯留のコストは、1 ton 貯留・固定するのに 5 千円~1 万数千円である。コストに占める分離回収費用の割合が大きい。EOR の場合は、石油や天然ガスを生産が増進され、収入が期待される。一方で、市場で取引されている排出権は 1 ton あたり 1000 円である。

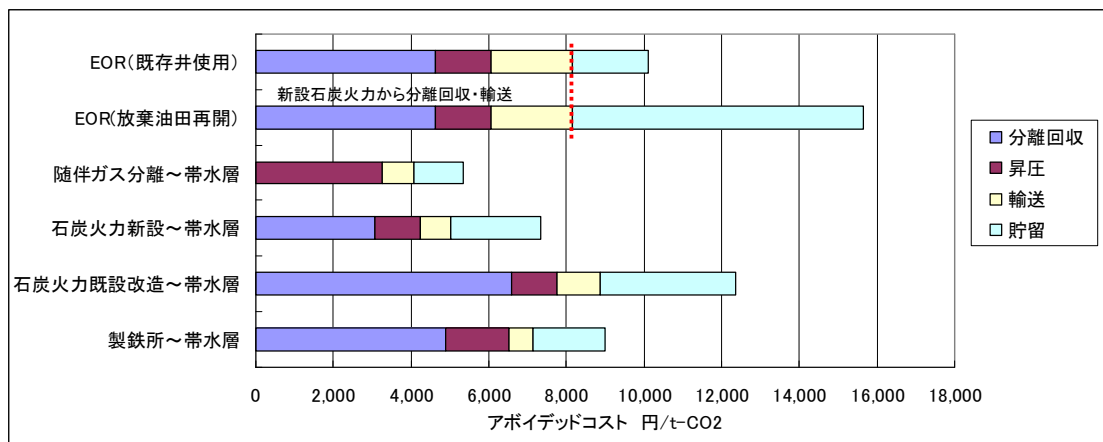


図-3 現状技術での CCS のコスト ((財)地球環境産業研究機構試算)

温室効果ガスがほぼ京都議定書通り削減できること、CCS による削減には非常に経済的負担を有すること等から、現状では各企業や国が実際上積極的に CCS を進める環境にないことが考えられる。

諸外国の温室効果ガスの排出量は図-4 に示すとおりである。図-4 には、コペンハーゲンでの COP15 (2009 年) でのコペンハーゲン合意に基づき、先進国が示した中期目標も記してある。この図から、中国、インドの排出量の増加が顕著であることが確認できる。これらの国が目標を示さないまま先進国だけが経済活動を制限される目標を設定するのは不十分であり、有効な地球温暖化対策とはなっていない。また、ロシアはソビエト崩壊に伴う経済規模の縮小で、1990 年以降排出量を急激に減らしており、基準年度を 1990 年と設定すれば、1990 年比 15%削減の目標は実際には現在から排出量の増加を許容する中

期目標となっている。我が国の1990年比25%削減は理念としては素晴らしいが、経済活動に影響を与えず実現可能か否かが十分に議論されているとは考えられない。さらに、諸外国の動向も見てみると、スタンドプレー的な行動ではと考えさせられる。

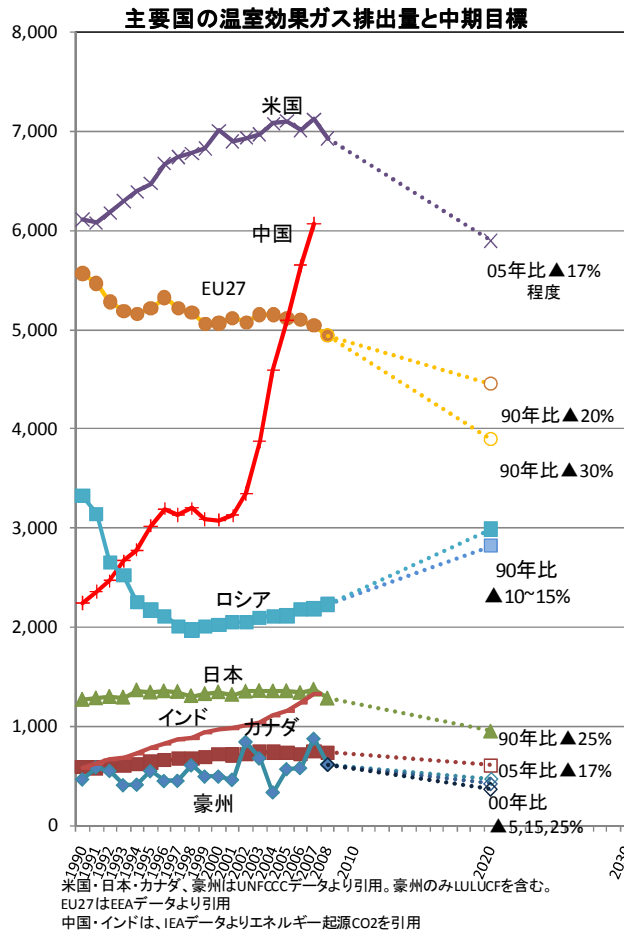


図-4 主要国の温室効果ガス排出量と中期目標

図-5 に日・米・中の3カ国の電力生産構成を示す。中・米ともに石炭への依存が高い状況が見取れる。世界のCO2の排出量の約3割が石炭火力発電と言われており、石炭火力発電所のクリーン化とあわせて、石炭火力発電所より排出されたCO2の回収・貯留は、世界規模での削減を検討するにあたって非常に重要な課題である。

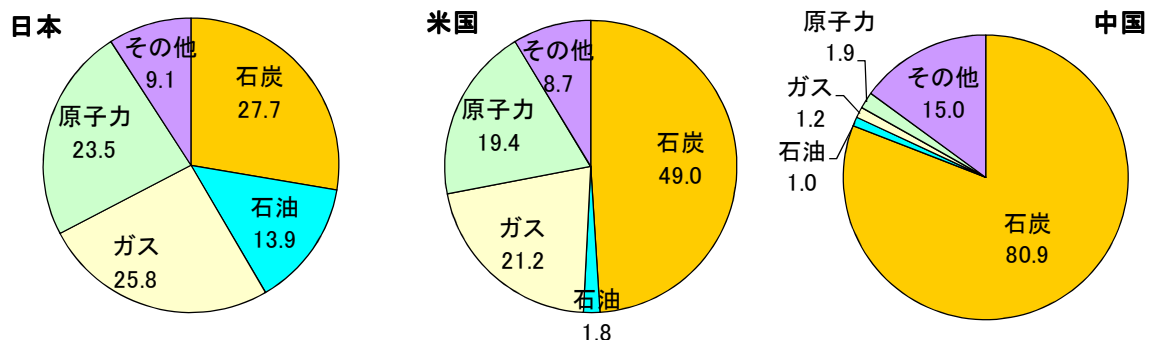


図-5 日本、米国、中国の電力生産構成率（出典：IEA Energy Balances (2009)）

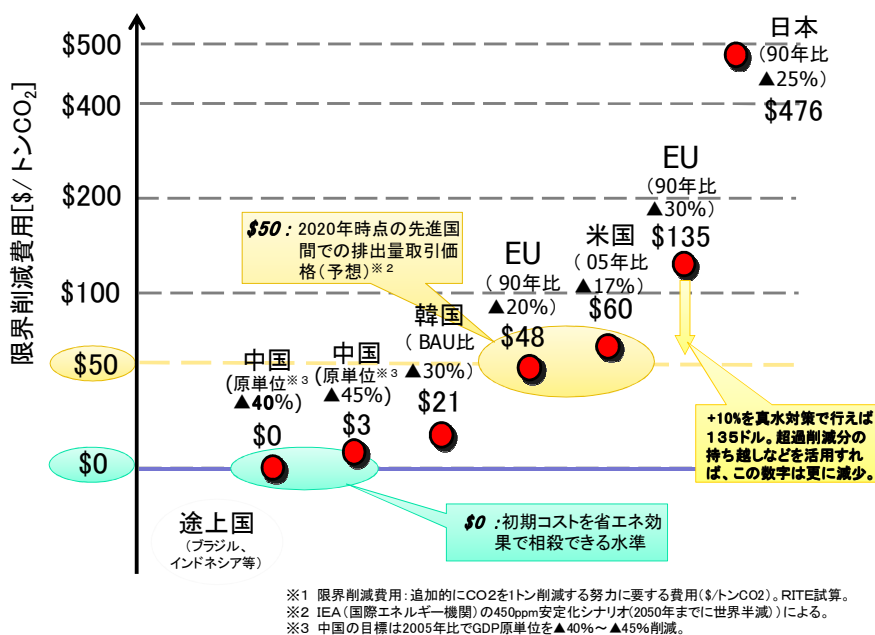


図-6 限界削減費用(※1)による各国の目標値比較 (出典：経済産業省)

一方、我が国で中期目標に向かって削減を実行して行くと、RITE の試算では他の先進国や市場経済移行国に比べて、かなりのコスト負担である (図-6)。

以上より、我が国ではコスト的負担を払ったものの、第1 約束期間において1990年比6%削減は、おおよそ達成されることが見込まれている。しかしながら、さらに2020年までに1990年比25%削減するには、CCSのような実地的な削減手法を導入する必要がある。しかしながら、コスト的な問題があり、経済活動を阻害せずには本手法を導入することは不可能である。このためには、EORの既往技術にとらわれず、CCSがコスト的に実行可能な手法とするための技術革新が必要である。

もう一方で、中国やインドが大量に排出することにより、より地球温暖化が懸念される。それらの国でCCSを実施すれば、効率的なより実的に地球温暖化が防止できる。石油や天然ガスでのEORの延長線上でのCCSは、オイルメジャーが絡むため日本の出番が少ないと考える。京都メカニズムのCDM (Clean Development Mechanism) にCCSを適用することが可能になれば、発展途上国での日本のCO₂削減活動が地球温暖化を防止し、さらに、排出権を我が国にチャージすることが可能となる。

以下に、我が国のCCSの実行可能性では、CCSのCDM化の可能性に関して調査検討した結果を述べる、また、岩盤工学の果たす役割では、貯留技術研究に関する現状と課題を示す。

3. 我が国のCCSの実行の可能性

ここでは、CCSのCDM化に関する検討の取りまとめを示す。

CCSは、現状CDMの対象外となっている。しかし今後温暖化ガス削減を考える上でCCSは重要な役割を果たす可能性を持つ。そこでCCSについて各国の現状を把握し、CDM化に対してどういった議論がなされているかを整理する。

3.1 CCS の課題と現状

CCS 関連技術の開発、プロジェクト促進のための課題は以下の3つに大別できる。

- ・ 経済性：現状の CCS の分離回収～貯留コストが 5 千円～1 万数千円／トンであるのに対し、経済性が見出せるレベルは 2 千円／トン以下であり、大幅なコストダウンが必要不可欠。
- ・ 住民の反対：貯留される CO₂ の漏洩という懸念から、住民の合意を得られず実証プロジェクトの見直しや断念につながっている。
- ・ 環境問題：環境問題を誘発しない適切な貯留層の確保が課題である。例えば、耐水層貯留では、水と混ざった CO₂ が炭酸となり地中の鉱物を溶かす危険性や、海中での CO₂ 増加による海中生物への影響が懸念される。

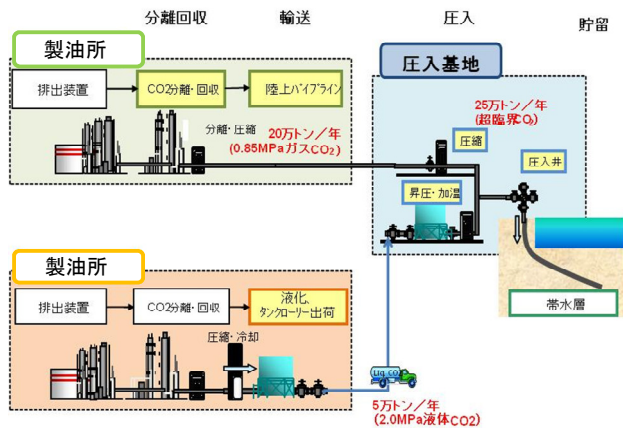
CCS に対する各国の取り組みは、概ね以下の通りである。

- 1) 日本 日本における CO₂ の分離・回収・輸送及び地中貯留に関する研究開発や事業化にかかる調査を行うことを目的として電力、鉄鋼、石油販売、石油開発、化学等の出費により日本 CCS 調査株式会社を設立した。さらに、北海道苫小牧（図-7）、福島県（図-8）、福岡県において 2020 年の CCS の実用化へ向けて、大規模実証事業を推進中である。

○現在、2020年のCCSの実用化へ向けて、大規模実証事業を推進中。
 ○北海道苫小牧沖は、実際の貯留地点の候補の1つとして、現地調査などを実施中。

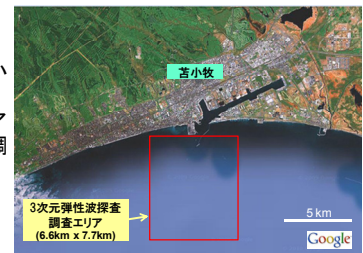
I. 事業概要

北海道の製油所から二酸化炭素を分離回収。パイプラインやタンクローリーにより圧入基地まで輸送し、海底下に存在する帯水層に、年間約5～25万トン（目標）を貯留予定。

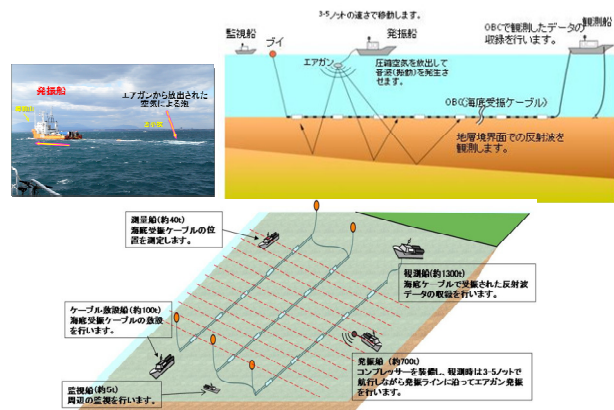


II. 現地調査

2009年10～11月に、苫小牧港約2km沖合の東西約2.7km、南北約3kmのエリアにて、地下の地質構造を調べるための3次元弾性波探査を実施。



(3次元弾性波探査のイメージ)



III. 今後の予定

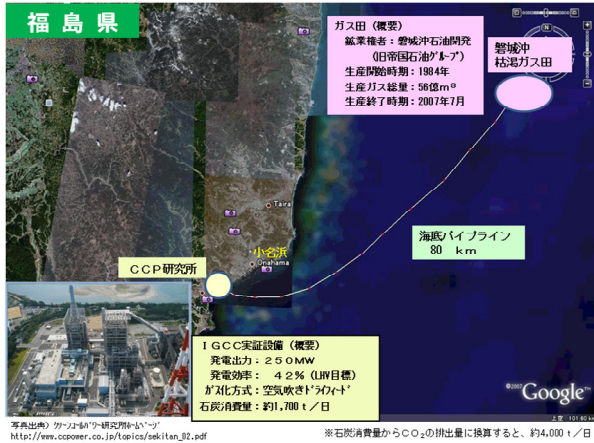
2009年10～11月に3次元弾性波探査を実施。
 更に広い地域のデータを取得するため、2010年7月～9月に追加弾性波探査を実施。
 今後、調査井の掘削を実施する予定。（11月開始予定）

図-7 北海道苫小牧沖 CCS プロジェクトの概要（出典：経済産業省）

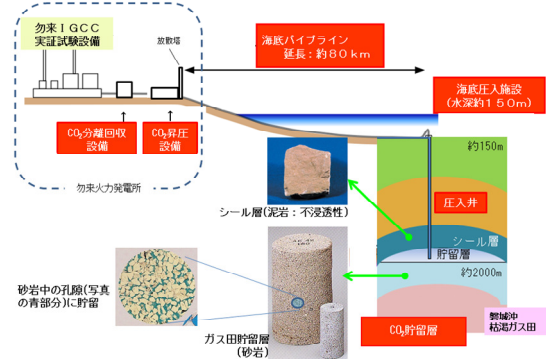
○現在、2020年のCCSの実用化へ向けて、大規模実証事業を推進中。
 ○勿来・磐城沖は、実際の貯留地点の候補の1つとして、現地調査などを実施中。

I. 事業概要

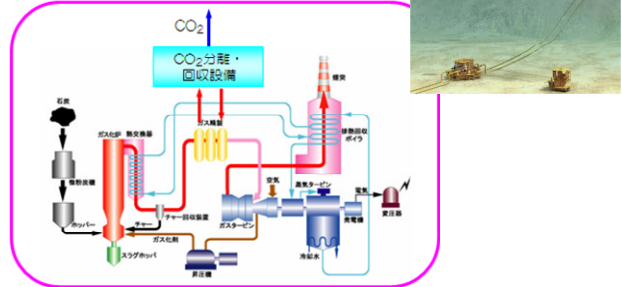
福島県いわき市の石炭ガス化複合発電(勿来 I G C C)実証機から二酸化炭素を分離回収。楢葉町沖合約40kmの枯渇ガス田に海底パイプラインで輸送し、海底下2,000mの生産終了ガス層に年間約10万トン(目標)を貯留する予定。



III. 実証試験設備や貯留地点などのイメージ



IGCC実証プラントからのCO₂分離回収概念図



II. 現状と今後の予定

これまでにパイプラインルート調査を実施 (昨年7~8月)。今後、現地にて調査井の掘削による地質調査を実施予定。

図-8 勿来・磐城沖 CCS プロジェクトの概要 (出典：経済産業省)

- 2) アメリカ 2010年2月、CCSの実用化と普及を加速する戦略を検討するため、CCS タスクフォースを設立した。2016年までに5~10件の商業的実証プロジェクトを立ち上げることを目指し、当年8月にCCSの商業化に向けた財政面、技術面、法制度面などの障害を克服するためのレポートを取りまとめた。また、2009年6月に下院を通過したワックスマン・マーキー法案では、原則2025年以降には新設石炭・石油火力についてCCSの設置を義務付ける条項が盛り込まれている。
- 3) EU 研究開発総合計画である欧州研究開発フレームワークにCCSを位置づけて推進している。2009年度は2300万ユーロを借置した。また、CCSの実証を促進するため、現行予算の未執行分の一部を表-1のようにCCSの実証に割り当てることとした。更に、2009年6月、新設の火力発電について、一定の条件を前提に、CCSの設置に必要なスペースを要求するEU指令(CCS-ready)が出された。

表-1 EU 内での CCS 実証での各国割当

ドイツ	Janschwaldeプロジェクト	1.8億ユーロ	500MWの石炭火力から酸素燃焼でCO2を回収、油・ガス田に貯留予定
オランダ	Rotterdamプロジェクト	1.8億ユーロ	燃焼後回収で1080MWの石炭火力からCO2を回収、油・ガス田に貯留予定
ポーランド	Belchatowプロジェクト	1.8億ユーロ	燃焼後回収で858MWの石炭火力からCO2を回収、塩水帯水層に貯留予定
スペイン	Compostellaプロジェクト	1.8億ユーロ	500MWの石炭火力から酸素燃焼でCO2を回収、油・ガス田に貯留予定
英国	Hatfieldプロジェクト	1.8億ユーロ	500MWのIGCCのプロジェクトで、油・ガス田に貯留予定
イタリア	Port Tolleプロジェクト	1.0億ユーロ	660MWの石炭火力からの燃焼後回収を予定、貯留地点は未定
フランス	Florangeプロジェクト	0.5億ユーロ	鉄鋼プラントからのCO2を塩水帯水層へ貯留予定

- 4) オーストラリア 産炭国として、石炭の活用と温暖化対策を両立できる CCS を強力に推進している。大規模実証事業の実施へ向けて、CEI(Clean Energy Initiative) の中で2~4基の大規模実証を行う事を定めており、2009年から9年間で20億豪ドルの支出が見込まれている。また、世界の実証事業を支援する機関として、GCCSI(Global CCS Institute)を主導して立ち上げた。
- 5) ノルウェー CCS の実証プロジェクトを先行して行っている。Sleipner(約100万トン/年)、Snovit(約70万トン/年)の2地点でCCSが実施されている。
- 6) アルジェリア In Salah 地区で、2004年よりBP等が所有するガス田において、随伴して発生するCO2を回収し、地中へ圧入するプロジェクトを実施している。

3.2 CCS の CDM 化に関する議論

CCS の CDM 化については COP/MOP(京都議定書締約国会合)、SB(補助機関会合) 及び AWG 会合(特別作業グループ) において議論が行われている。この議題では「先進国 vs 途上国」という単純な構図にはならず、自国の利益に合致するか否か、つまり「CCS を CDM の対象とすることが利益に繋がるか」という対立の構図になった。このように、いずれの場合においても、技術的な議論までに至っておらず、CDM の対象とすることの是非について関係国間で鋭く対立している状況である。

主要国の主な立場は下記の通りです。

- ・ 賛成派： 日本、EU、ノルウェー、カナダ、オーストラリア等の先進国及びサウジアラビア、クウェート、カタール等産油国の途上国の一部である。主な意見を以下に挙げる。
 - CDM は技術的に中立であるべき(削減技術を差別すべきではない)。
 - 中長期的に地球上での大規模な削減を実現するためにも不可欠な技術である。
 - 途上国への技術移転、クレジットによる資金供給を通じた貢献が可能である。
- ・ 反対派： ブラジル等中南米諸国及びである。主な意見を以下に挙げる。
 - CCS は技術的安全性が確立しておらず、持続的な削減技術ではない。
 - 本来省エネ・再生可能エネルギー等に投資されるべき資金が流れる。

賛否両論分かれるところであり、COP の原則である参加国の全会一致が原則であり、CCS の CDM 化される見通しは、厳しいものである。さらに、審査の長期化等 CDM 固有の問題もあり、サマザナ障壁が存在する状況である。

このような中、日本は、東南アジアを中心に、二国間約束に向けた政府間協議を開始している。その中の一つとして、インドネシアでの CCS がある。インドネシアにおいては、研究途上であるものの、CCS 技術に適したサイトが多数あることが世界エネルギー会議 (WEC) のレポートで指摘されている

(World Energy Council, 2009). インドネシアにおける多数の石炭火力発電や、石油、天然ガス等の精製プラントから排出される二酸化炭素を回収し、主に廃鉱油田や廃鉱天然ガス田へパイプ輸送し、貯留することが検討されている。二国間の動きは、CCSを海外に技術の一つとし、併せてCDM化を可能とする。CDM化するための技術的な支援は必要であるが、実際化すれば、我が国にとってCCSは有効な温室効果ガス削減技術となる。

4. 岩盤工学の果たす役割

4-1. モニタリング技術

CO₂の圧入試験に対するモニタリング技術の課題および岩盤工学の果たす役割について、我が国で初めて実施された新潟県南長岡ガス田、帝国石油株式会社の岩野原基地で行われたプロジェクト(長岡プロジェクト)^{1),2)}をもとに検討する。

1) 長岡プロジェクトの概要

長岡プロジェクトは、平成12(2000)年度より新潟県南長岡ガス田の帝国石油株式会社の岩野原基地で行われた。岩野原基地は長岡市中心から約9 kmの信濃川支流となる渋海川左岸に位置する(図-9)。ここでは地層が北北東-南南西方向を軸とする顕著な褶曲構造を形成し、背斜構造部分は石油や天然ガスの重要なトラップ(集積構造)となっている。

このプロジェクトは、経済産業省の補助金を受けて、地球環境産業技術研究機構(RITE)がエンジニアリング振興協会(ENAA)と協力して、平成15(2003)年7月7日から平成17(2005)年1月11日までに、計10,400 tのCO₂を地下約1,100 mの帯水層に圧入し、地質条件が複雑な日本でもCO₂地中貯留が可能であることを示した。長岡プロジェクトでは陸域帯水層貯留の利点を生かした綿密なCO₂挙動モニタリングが行われた。

2) CO₂ モニタリング²⁾

帯水層に圧入されたCO₂は、貯留層孔隙内の地層水を幾分押しよせながら、圧入井から周辺へ広がる。この際、貯留層中の地層水飽和率は減少し、CO₂飽和率は増大する。このようなCO₂と地層水との置換プロセスによって、貯留層を伝播する弾性波速度は低下し、比抵抗は増大する。長岡プロジェクトでは、このような物性変化を検出するための物理検層(音波検層、比抵抗検層および中性子検層)、坑井間弾性波トモグラフィが定期的実施されたほか、圧入サイト周辺地域(2 km×2 km)を対象とする反射法地震波探査も実施され、貯留層に圧入されたCO₂の挙動がモニタリングされた。ここでは、CO₂圧入による貯留層の圧力・温度の変化や微小地震の常時観測に加え、観測井を利用した物理検層と坑井間弾性波トモグラフィが定期的実施された。とくに物理検層では圧入されたCO₂が観測井に到達した時期を捉えることにより、CO₂長期挙動予測に欠かせない地質モデルのキャリブレーションに反映できる高精度のデータが得られた。また、地下深部の帯水層に圧入されたCO₂の分布について、物理検層で得られた坑井近傍の情報のほかに、坑井間弾性波トモグラフィによる面(2次元)的情報、反射法地震波探査による空間(3次元)的情報も取得された。また、物理検層と坑井間弾性波トモグラフィは、世界ではじめてCO₂圧入中だけでなく圧入後も実施されており、地中貯留の安全性評価に関する貴重な現場

データが得られた。

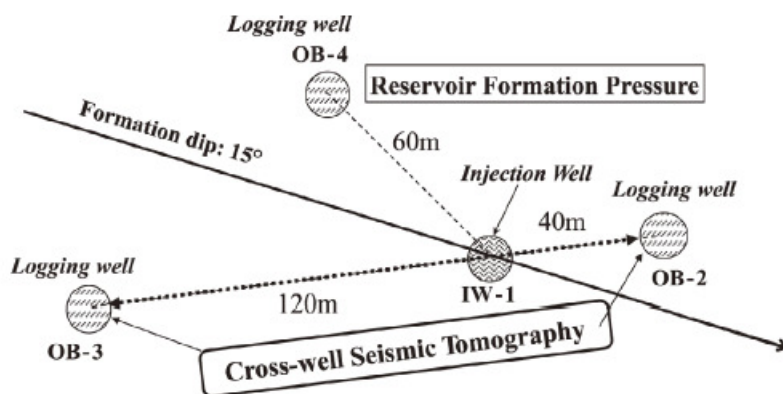
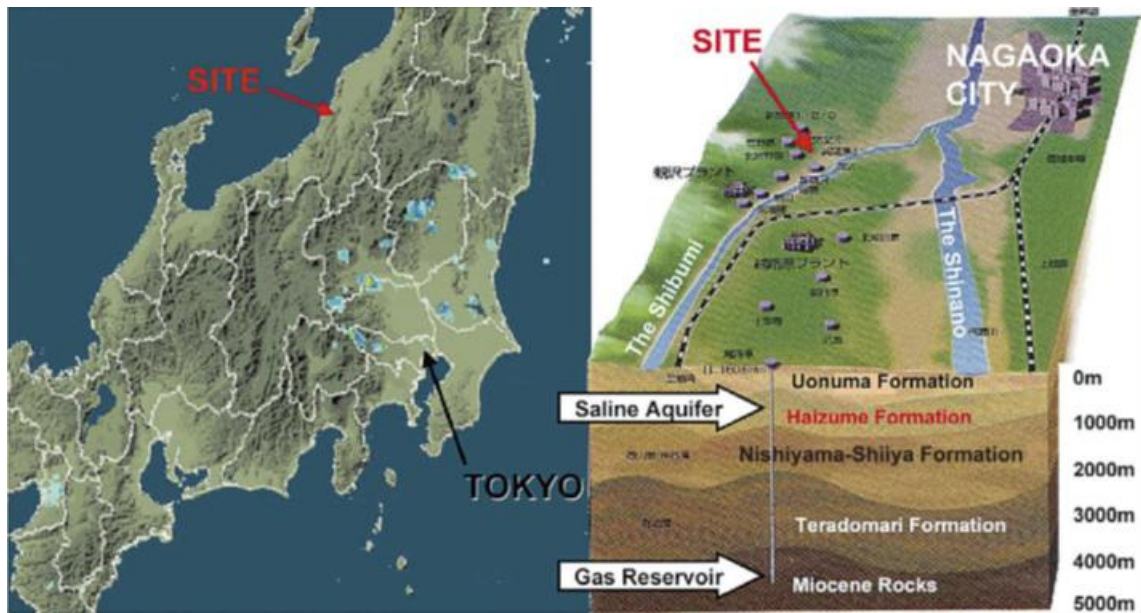


図-9 長岡 CO2 圧入実証試験サイトおよび地質構造の概念図 (参考文献 2))

3) 物理検層によるCO₂ 挙動モニタリング

物理検層によって検出される比抵抗, 音波 (P波) 速度, 中性子孔隙率の変化によって, 圧入されたCO₂ が観測井に到達したことを示すbreakthrough現象 (以降CO₂ 到達と呼ぶ) が確認され, 到達後のCO₂ 挙動もモニタリングされた. 試験サイトでは, CO₂ 圧入開始後約247 日経過した2004 年3 月10 日の検層では, 圧入井に最も近い観測井OB-2 にCO₂ 到達を示す物性変化が確認された. また, 観測井OB-4 (図-2参照). では2004 年6 月14 日の物理検層時にCO₂ 到達による同様な物性変化が観測されたが, 観測井OB-3 では現在もCO₂ 到達を示唆する検層結果は得られていない³⁾.

3-1) 比抵抗検層とその結果

CO₂ 圧入に伴って, 貯留層では高導電性の地層水が不導体のCO₂ によって置換され, 地層の比抵抗

が高くなることから、CO₂ 挙動をモニタリングできる。各観測井の貯留層区間にはFRPケーシングが設置されており、電磁誘導によってケーシング奥にある貯留層に誘導電流を流すインダクション検層で比抵抗を測定することが可能である。

3-2) 音波検層

音波検層では地層の弾性波速度 (P 波とS 波) が得られる。長岡実証試験サイトではFRP ケーシング設置後に音波検層が繰り返し実施された。CO₂ が圧入されると、貯留層を伝播する弾性波速度は、孔隙中の地層水とCO₂ の割合 (二相流状態) や混合流体の特性 (体積弾性率, 密度) に影響されて変化するので、音波速度の変化によってCO₂ 挙動をモニタリングできる。

3-3) 中性子検層

中性子検層は、中性子放射線源から地層へ高速中性子 (first neutron) を放射し、高速中性子と地層構成物質の原子核との反応過程で生じる熱中性子 (thermal neutron) 強度を測定することにより、地層の孔隙率を推定する手法である。放射線源から放出された高速中性子は、地層中の水素原子と衝突したときのエネルギー損失が最も大きく、衝突で生じた熱中性子の量は水素濃度に比例すると考えられている。一般に、地層中の水素原子の大部分は孔隙を充填する間隙水の水分子に含まれるので、熱中性子の強度を測定すれば間隙水の量がわかり、地層の孔隙率を推定することができる。貯留層に圧入されたCO₂ は水素原子を含む地層水を孔隙から追い出し、代わりに水素を含まないCO₂ が入るため、熱中性子の放射強度が弱くなり、見かけ上の孔隙率が低下するため、CO₂ 挙動をモニタリングできる。

4) 坑井間弾性波トモグラフィによる速度異常域の検出

音波検層が観測井近傍の微小区間の速度を検出するのに対し、坑井間弾性波トモグラフィは複数の観測井の間の弾性波速度分布を2次元で推定する。長岡実証試験サイトでは、観測井OB-2, OB-3 にそれぞれ発信機と受信機を設置し、圧入井を挟むこれらの坑井間の速度異常域 (CO₂ 浸透によって生じた速度低下域) を検出した。速度異常域はCO₂ の分布域を示し、2次元断面における異常域をもとに圧入されたCO₂ の広がりを知ることができる。弾性波トモグラフィにはさまざまな手法があるが、長岡実証試験サイトでは同一データセットに対し、波線理論と波動理論に基づく解析手法をそれぞれ適用し、CO₂ 挙動モニタリング手法としての有効性を確認した^{4), 5), 6)}。

5) 反射法地震波探査によるCO₂ 挙動モニタリング

地下深部の帯水層に圧入されたCO₂ 挙動モニタリングの手法として、繰り返し地震波探査 (4D seismic survey) は、ノルウェー沖合のSleipnerやカナダのWeyburn プロジェクトでも実施されている^{7), 8)}。これまでの石油や天然ガスの探査実績も考慮に入れると、モニタリング手法としての地震波探査の優位性はかなり高いが、複雑な地質構造を対象とする場合は探査結果の解釈に困難が伴うことも予想される。

Sleipner やWeyburn に比べて長岡サイトの貯留層の規模 (特に厚み) は小さく、砂岩と泥岩が互層になっている場所も多い。長岡サイトでは物理検層や坑井間弾性波トモグラフィと並行して繰り返し地震波探査が実施され、日本の地中貯留サイトでのCO₂ 挙動モニタリングへの適用可能性が調べられた。

6) 岩盤工学のモニタリングへの貢献

長岡サイト貯留層で物理検層によって検出される比抵抗, 音波 (P 波) 速度, 中性子孔隙率の変化によって, 圧入された CO₂ が観測井に到達したことを示す CO₂ 到達が確認され, また, CO₂ 到達後の挙動もモニタリングされた. 今後は, CO₂ の貯留層内における長期挙動を明確にするために, 溶出, 固定化など室内試験で得られた物理化学的な知見を生かして, 各種モニタリングでサイトの貯留層の CO₂ 状況を確認するとともに, 数値解析による貯留層内の CO₂ の挙動予測を行った結果と比較し, 貯留層に CO₂ が貯留されている状況を明らかにすることが今後の課題であり, CCS 実現のために岩盤工学が貢献すべき点である.

- 1) 薛自求, 中尾信典, CO₂ 地中貯留 — 世界各国の技術動向と政策動向および日本の課題—, 地学雑誌, 117 (4), pp.722-733, 2008.
- 2) 薛自求, 松岡俊文, 長岡プロジェクトからみた二酸化炭素 地中貯留技術の現状と課題, 地学雑誌, 117 (4), pp.734-752, 2008.
- 3) 薛自求, 渡辺 二郎長岡実証試験サイトにおける二酸化炭素挙動モニタリングへの物理検層の適用, Journal of MMIJ, Vol. 124, 68-77, 2008.
- 4) Saito, H., Nobuoka, D., Azuma, H., Xue, Z. and Tanase D, Time-lapse cross well seismic tomography for monitoring injected CO₂ in an onshore aquifer, Nagaoka, Japan. *Butsuri-Tansa (, Geophysical Exploration) , 59, 30-3, 2006.*
- 5) 斎藤秀樹, 信岡 大, 東 宏幸, 棚瀬大爾, 薛自求, 長岡実証試験サイトにおける二酸化炭素圧入実験の坑井間弾性波トモグラフィによるモニタリング, Journal of the Mining and Material Processing Institute of Japan, 124, 78-86, 2008.
- 6) Spetzler, J., Xue, Z., Saito, H. and Nishizawa, O., Case story: time-lapse seismic cross well monitoring of CO₂ injected in an on shore sandstone aquifer. *Geophysical Journal International*, 172, 214-225, 2008.
- 7) Li, G. , 4D seismic monitoring of CO₂ flood in thin fractured carbonate reservoir, *The Leading Edge*, 22, 690-695, 2003.
- 8) Arts, R., Eiken, O., Chadwick, A., Zweigel, P., Van del Meer, B. and Kirby, G., Seismic monitoring at the Sleipner underground CO₂ storage site (North Sea) in *Geological Storage of Carbon Dioxide* edited by Baines, S.J. and Worden, R.H., Geological Society, London, Special Publications, 233, 181-191, 2004.

4-2 解析技術

CCS の実用化にあたり, 圧入後の CO₂ の挙動を正確に把握し, 生活圏への漏洩リスク等を予測する技術の確立は重要な課題である. 非常に長い期間を対象とした評価を実施するための手段は CO₂ の物理化学特性や貯留サイトの地質特性を考慮した数値シミュレーションしか存在しない. CO₂ の地下挙動シミュレーションでは, 地下構造に起因する物理トラップや地化学トラップの機構を考慮するために, CO₂ の流体物性 (密度, 粘性, 地下水への溶解度) や地下水 (塩水) との二相流特性 (相対浸透率, 毛管圧力等) をモデル化したシミュレータの使用や地球化学計算との連成解析が必要となる.

これまで気液二相流（ダルシー流体）を考慮し、CO₂流体の貯留に起因する岩石構成鉱物の溶解・沈殿等の地球化学的キネティクスを導入している熱・水・化学連成（THC）シミュレータもいくつか存在する（例えばFEFLOW¹⁾、MT3DMS²⁾、PHAST^{3),4)}、TOUGHREACT⁵⁾）。

CO₂地中貯留において貯留量評価および安全性評価を実施するためには、圧入されたCO₂の長期挙動予測シミュレータが不可欠である。精度の高いシミュレーションを実施するために、貯留層砂岩内部での水-CO₂二相流に関する残留ガス飽和率、不動水飽和率などの基礎データをシミュレータに入力する必要がある。しかしながら、従来の数値解析法では、複雑な空隙構造を定義することは困難であることから、新しい流体の数値解析法である格子ボルツマン法（Lattice Boltzmann Method、LBM）の適用事例もある⁶⁾。

新潟県長岡市岩野原における地下深部塩水層へのCO₂圧入実証試験では、油ガス層シミュレータにCCSに特有な現象を表現するモジュールを追加することにより開発されたGEM-UGSが実証試験の各段階での意思決定あるいは挙動解釈などを目的としたシミュレーション・スタディに利用された（計画段階での実証試験計画の妥当性確認、圧入開始後のヒストリーマッチング、圧入終了後の長期挙動予測など）⁷⁾。

国外では、TOUGHREACTを含むTOUGH2⁸⁾系の解析コードはCCSの分野で数多く利用されてきた。米国テキサス州の地下深部2000mの砂岩帯水層（厚さ10m）へのCO₂圧入を対象としたTOUGHREACTによる炭酸塩鉱物化の数値シミュレーション（多相流体-地球化学連成解析、図-10）⁹⁾、アルジェリアのIn Salah GasプロジェクトにおけるCO₂圧入に伴う地表面隆起のTOUGH-FLACによる再現解析（多相流体-応力連成解析、図-11）¹⁰⁾などが報告されている。

また、CO₂挙動やトラップメカニズムの解明を目指して、水理地質構造の数理モデル構築手法の開発、地化学的閉じ込め率の算出・評価、シール層の微小亀裂の影響評価を通して、地中挙動予測手法の高精度化なども実施されている。さらに、地中に貯留したCO₂が万が一に漏洩した場合の地下浅部でのCO₂挙動予測として、地表漏洩の天然類似事例調査と上方移行プロセスの予測、貯留層から地下浅部へ上昇するCO₂の地下水・地盤に及ぼす化学的影響の推定、湧出CO₂の大気拡散状況の推定が実施されている¹¹⁾。

高効率なCO₂固定化技術を設計するためには、原位置試験や室内実験から得られた基礎データを基にCO₂の反応と物質移行を評価することから、反応・物質移行に関するモデルを開発し、反応場の空間的な構造とCO₂固定量を算定するというような事例もある。具体的には、地化学コードのPHREEQCを用いた熱力学平衡計算によって鉱物溶解・沈殿条件を取得し、溶解および沈殿し得る鉱物を予測し、その妥当性を評価している¹²⁾。

地球化学計算との連成解析においては、対象となる岩石鉱物が多岐にわたり、数十種類程度の鉱物に対して反応速度を考慮する必要がある。問題を複雑化させる要因となっている。自然界での水-鉱物の反応現象は室内実験よりも複雑であり、フィールドにおけるシミュレーションの検証が十分にはなされていない。また、地中貯留中のCO₂流体は、非ダルシー流体であることも想定されるが、既往のシミュレーションは基本的にダルシー流体解析でなされており、不十分であることも考えられる。

既存の解析シミュレータに対して、等しい初期・境界条件でCCSベンチマーク解析を行い、解析結果を比較している研究成果¹³⁾があるが、解析コード、実施機関の間で得られた結果にかなり差異が生じており、現状ではシミュレーション技術が確立しているとは言いがたい。

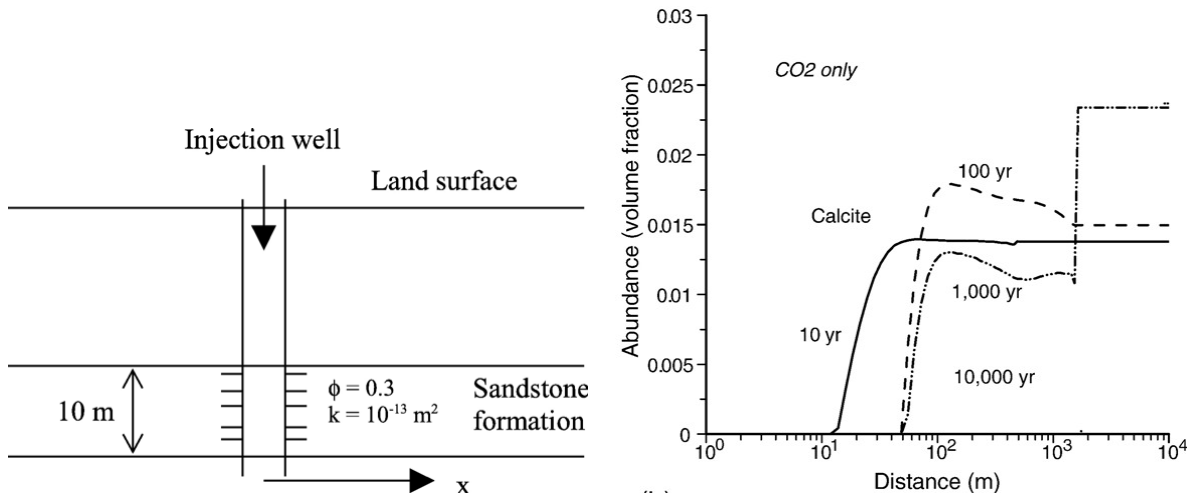


図-10 TOUGHREACT による解析モデルの概念図 (左) と方解石の存在量の変化 (右) ⁹⁾

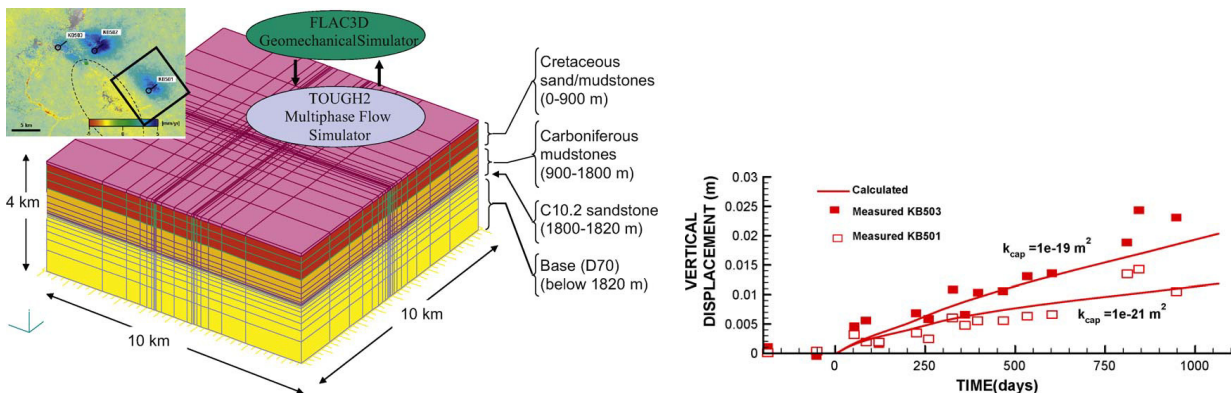


図-11 TOUGH-FLAC による解析モデル (左) と地表隆起量の比較 (右) ¹⁰⁾

- 1) Trefry MG, Muffels C. FEFLOW: a finite-element ground water flow and transport modeling tool. Ground Water 2007;45(5):525;8.
- 2) Zheng C, Weaver J, Tonkin M. MT3DMS, A modular three-dimensional multispecies transport model; user guide to the hydrocarbon spill source (HSS) Package, US Environmental Protection Agency, Athens, Georgia; 2010.
- 3) Kipp KL. Guide to the revised heat and solute transport simulator HST3D Version 2, US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 97-;4157; 1997.
- 4) Parkhurst DL, Kipp KL, Charlton SR. PHAST Version 2; a program for simulating groundwater flow, solute transport, and multicomponent geochemical reactions, US Geological Survey Techniques and Methods 6-A35; 2010.
- 5) Xu T, Sonnenthal E, Spycher N, Pruess K. TOUGHREACT; a simulation program geological sequestration for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media: applications to geothermal injectivity and CO₂. Comput Geosci 2006;32(2):145;65.
- 6) 財団法人地球環境産業技術研究機構, 平成 17 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二

酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書, 579-614, 2006.

7) 大熊宏. 地下深部塩水層における二酸化炭素地中貯留のシミュレーション技術および長岡圧入実証試験への適用, Journal of MMIJ, 124, 87-94, 2008.

8) Pruess K. TOUGH2 – A General Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow, Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-29400, 1991.

9) Xu T, Apps JA, Pruess K, Yamamoto H. Numerical modeling of injection and mineral trapping of CO₂ with H₂S and SO₂ in a Sandstone Formation, Chemical Geology, 242, 319-346, 2007.

10) Rutqvist J, Vasco DW, Myer L. Coupled reservoir-geomechanical analysis of CO₂ injection and ground deformations at In Salah Algeria, Int J Greenhouse Gas Control, 4, 225-230, 2010.

11) CO₂ 地中貯留プロジェクト：地中挙動予測手法の高精度化,

<http://www.rite.or.jp/Japanese/project/tityu/kyodou.html>

12) 財団法人地球環境産業技術研究機構, 平成 18 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 プログラム方式二酸化炭素固定化・有効利用技術開発（蛇紋岩体の地化学環境を利用した原位置試験による CO₂ 地中鉱物固定のための基盤技術の開発）成果報告書, 144-164, 2007.

13) Class H, Ebigbo A, Helmig R, Dahle HK, Nordbotten JM, Celia MA, et al. A benchmark study on problems related to CO₂ storage in geologic formations. Comput Geosci 2009;13(4):409;34.

4-3. マイクロバブル CO₂ 注入による非構造的帯水層隔離法(CMS: Carbon Microbubble Sequestration)

小出らによって、マイクロバブル化した CO₂ を用いて地中貯留を実施する方法が提案されている（例えば、Koide and Xue, 2009）。その概念図を図-x に示す。分離回収された CO₂ をマイクロバブル化し、地下からくみ上げた地下水と一緒に再度同じ帯水層に注入することにより、全体としての体積増を極力控えるようなシステムである。マイクロバブルを利用するメリットがいくつかある。一つは、通常の気泡（バブル）は水面まで上昇して破裂して消えるが、ある大きさよりも小さいバブルは縮小して消滅する。この境界は大体直径で 50 μm 程度なので、その大きさ以下の“マイクロバブル”を作って地中に戻せば、縮小して消滅し、CO₂ を効率的に溶解させることが可能であると考えられる。もう一つはマイクロバブルの表面は負に帯電しており、通常外力が加わらなければ、互いに合体することはないとされており、大きなバブルの形成を抑制できれば、流体としての流動性を阻害することなく圧入することが期待されることである。

通常、CO₂ は圧力 7.39MPa 以上、温度 31.2℃以上で超臨界状態となる。超臨界状態は気体と液体の中間的な状態であり、水に対する比重は 0.5、粘度は 1/100 から 1/10 という、軽くて、さらさらした状態である。したがって、このまま地中にいれると、軽いので上昇する、あるいは浮力が働くことになる。また温度一定と仮定して圧力を 7.39MPa 以上にもっていくためには、大体 800m 以深に注入しなければならない。さらに安定して封じ込めるためには、ドーム状のキャップロックのような特殊な地質構造が必要となり、実現できる箇所が限られる。

一方、マイクロバブル化した CO₂ の地中貯留では、超臨界状態にもっていく必要がないので、浅い領域での実施が可能になるというメリットがある。すなわち大幅にコストダウンできる可能性を秘めている。また粘土層などの不透水層とその下位にある程度大きな間隙を有する帯水層があれば実施できる可

能性があり，適用範囲が大幅に広がる可能性を秘めている（参考文献2）．2011年2月には，ゼネコン大手5社が本手法の次世代技術開発で連携することが新聞等で報道されており，2016年を目処に，地下300メートル程度の比較的浅い地中に注入する技術の実用化を目指すとしている．この報道によれば，さらに一歩進んで，CO₂以外の成分も含んだ排ガスをそのまま注入することも視野に入れている．このようにすることで，CO₂を分離回収する手間とコストが省けるので，大幅なコストダウンに繋がるが，地下水の酸性化や窒素化合物などによる地下水汚染も懸念されており，環境アセスメントを含めて，多角的な検討が必要であろう．

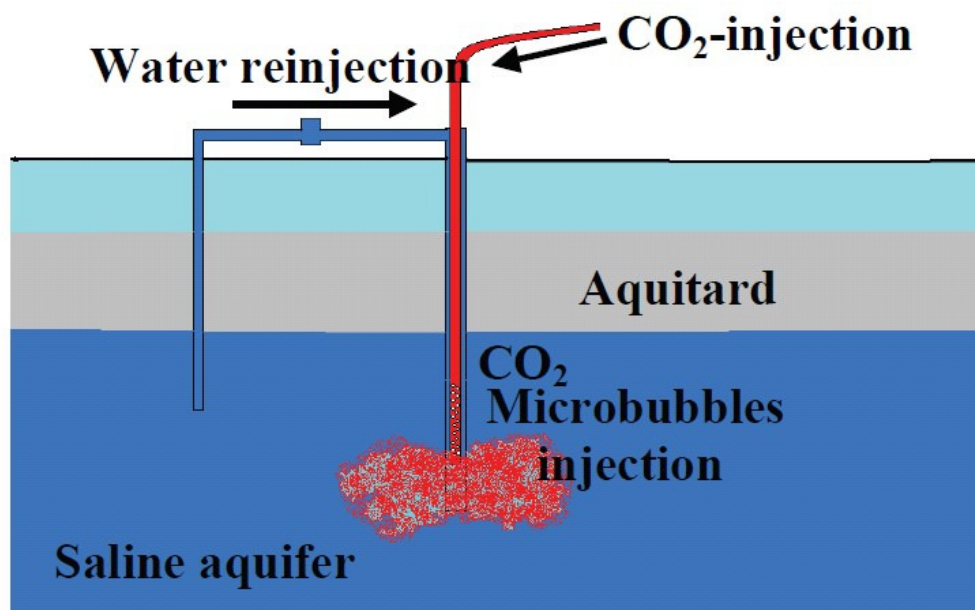


図-12 マイクロバブルを用いた CCS の概念図 (Koide and Xue, 2009)

気液混合流体をつくり，それを多孔質媒体あるいは割れ目中に流すという実験的な技術はこれまで多くの実績のある飽和流体の浸透実験とは，技術的には一線を画するものと考えられる．このような実験技術の開発を含めて気液混合流体の移動現象を把握し，化学的な相互作用も踏まえた解析技術を準備しておくことも，岩盤工学が果たすべき役割であると考えられる．

引用文献

- 1) Hitoshi Koide and Ziqiu Xue: Carbon microbubbles sequestration: A novel technology for stable underground emplacement of greenhouse gases into wide variety of saline aquifers, fractured rocks and tight reservoirs. Energy Procedia, Vol. 1, Issue 1, pp. 3655-3662, 2009(Proceedings of the 9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-9), 16-20 November 2008, Washington DC, USA).
- 2)平成 22 年度 CO₂ マイクロバブル地中貯留の成立性に関する調査研究報告書，(財) エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター，122p, 2011.3.