

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—

薛　　自　求^{**} 中　尾　信　典^{**}

**CO₂ Geological Storage: International Technology and Policy Trends,
and Research and Development Challenges in Japan**

Ziqiu XUE^{**} and Shinsuke NAKAO^{**}

Abstract

The IPCC published a special report on Carbon dioxide Capture and Storage (CCS) in 2005, stating that CCS is one of the promising options for mitigating carbon dioxide emissions into the atmosphere. Among several CO₂ storage options, storing CO₂ in saline aquifers is the most promising because of the large storage potential, estimated at from about 2,000 Gt CO₂ to more than 10,000 Gt CO₂. In this article, we first describe current global trends of CCS technology development and national policies. Some CCS technologies are already in practical use in several countries and are economically viable. Close attention has been paid recently to deep saline aquifer storage, which is expected to have a large storage potential of about 2,000 Gt CO₂ throughout the world. We then focus on the mechanisms of deep saline aquifer CO₂ storage. In deep saline aquifer storage, chemical reactions in the water-rock-CO₂ system play important roles for trapping CO₂ in the aquifer formation, as well as physical trapping by overburden impermeable cap rocks and residual gas trapping mechanisms. We also stress the importance of the long-term monitoring of the storage aquifer because CO₂ would be trapped stably in the formation for a long time. It is thus important to develop effective monitoring techniques for the behavior of CO₂ in the aquifer. Physical as well as chemical monitoring techniques should be used for storage aquifer monitoring. We conclude this article with discussions about storage potential in Japan and some important issues related to deep saline aquifers. Deep saline formations are distributed widely in Japan, and have the potential for the geological storage of 146 Gt of CO₂. It is therefore economically feasible to use deep saline formations near large emission sources such as coal-fired power plants and integrated steel works. To realize CCS in Japan, it is important to make further advances in studies on the basic physical and chemical trapping mechanisms of water-rock-CO₂ system, and in studies on the geological characteristics of aquifer formations.

Key words : global trends, national policy, saline aquifer storage, CO₂ storage potential, trapping mechanisms

キーワード : 国際動向, 国内政策, 塩水性帯水層貯留, CO₂ 貯留ポテンシャル, トランピングメカニズム

* 財団法人地球環境産業技術研究機構 CO₂ 貯留研究グループ

** 産業技術総合研究所地圈資源環境研究部門（現企画本部所属）

+ 現所属：京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

* CO₂ Sequestration Research Group, Research Institute of Innovative Technology for the Earth

** Institute for Geo-Resources and Environment, Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Planning Office)

+ Present address: Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University

I. はじめに

二酸化炭素 (CO_2)、メタン (CH_4) および一酸化窒素 (N_2O) は、熱を地球大気に封じ込める働きがあることから、温室効果ガス(Greenhouse Gas : GHG) と呼ばれている。このような温室効果ガスは大気中に微量存在し、地球全体の平均気温は約 15°C に保たれている。しかし、18世紀に始まった産業革命以降、大気中の CO_2 濃度が急激に増加しており、地球の気候に温暖化現象(地球温暖化)が現れている(IPCC, 2007)。地球温暖化に伴って地球規模で気温が上昇し、氷河の融解による海面の上昇や異常気象の頻発が懸念されている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第4次評価報告書(AR4)では、100年後に気温が最悪で 6.4°C も上昇すると警告している(図1)。2008年7月の洞爺湖サミットに向けたマスコミの報道効果もあって、日本国内でも

地球温暖化に対する関心がこれまでになく高まっている。

地球温暖化の原因は石炭や石油のような化石燃料の大量消費によって排出される温室効果ガス、とくに CO_2 の増加によるものと考えられている。1997年の国連気候変動枠組条約(UNFCCC)第3回締約国会議(COP3)で、温室効果ガスの排出削減目標とスケジュールを定めた京都議定書(環境省, 2008)が採択された。京都議定書では、2008年から2012年の間に温室効果ガスの排出量を先進国全体で1990年比5.2%削減すること、またその中で日本は同年比6%の削減が義務付けられている。しかし、政府や産業界などの努力にもかかわらず、2005年の日本の温室効果ガスの排出量は京都議定書の基準年比で8.1%も増加しており、このうち、エネルギー起源の CO_2 排出量は13.9%の増加となった。 CO_2 を大量に排出するのは、火力発電所、製鉄所、セメント工

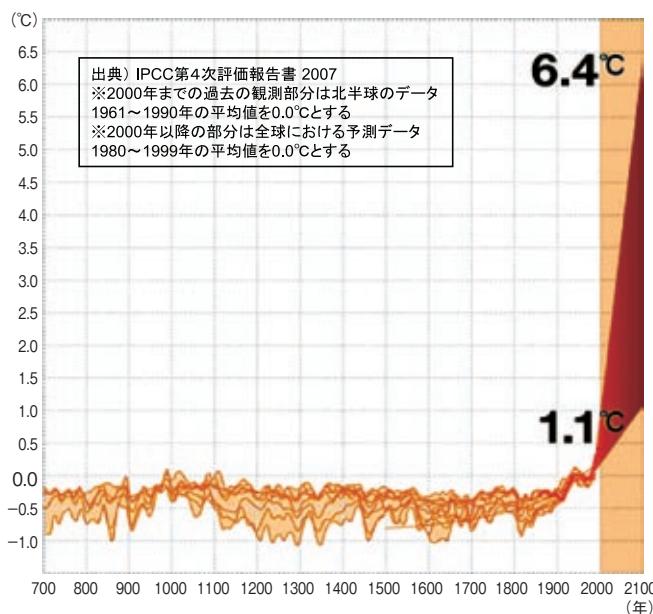


図1 700年～2000年までに北半球で観測された気温変化の観測結果と2000年～2100年までの地球全体の気温変化の予測結果(全国地球温暖化防止推進センター, 2008), 太線は計測機器によるデータを示し、細線は複数の気候代替データをもとに復元した12の研究データを示す。

Fig. 1 Temperature changes in the Northern Hemisphere over the period from 700 to 2000 and predicted global temperature change over the period from 2000 to 2100 (JCCA, 2008). Thick and thin lines indicate instrumental record and twelve reconstructed data sets, respectively.

場および化学プラントなどである。このような「大規模発生源」から分離回収した CO₂を地中に貯留する (CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage) 技術が、大気中の温室効果ガス濃度の増加を緩和する有効な方策として期待されている。IPCC は 2005 年にまとめた報告書の中で、2030 年までの中長期的温室効果ガス排出緩和策として CCS の実施を各国に推奨している (IPCC, 2005)。

以下では、(1) CCS および CO₂ 地中貯留に関する世界各国の取り組みを政府の政策と実証プロジェクトや事業化計画などとあわせて紹介し、(2) CCS の技術背景として CO₂ の分離回収技術と CO₂ 地中貯留と関連の深い石油の増進回収技術 (EOR: Enhanced Oil Recovery) およびそのほかの貯留方法を紹介した後、(3) CCS としてもっとも大きな貯留ポテンシャルをもつ帯水層貯留の貯留メカニズムに焦点をあて、(4) 貯留層内の CO₂ 挙動のモニタリング手法と長期安全性評価、および (5) 日本国内での CCS 事業化の問題点などを議論する。

II. CCS に対する海外諸国の取り組み

1) 欧州諸国

京都議定書の枠組の中で積極的に温室効果ガス対策を講じている欧州では、CO₂ 地中貯留に関する動きが活発である。欧州連合 (EU) では欧州委員会が 2007 年 1 月に EU のエネルギー分野における包括的な政策 “Energy Policy for Europe” を発表した。この新政策パッケージは、気候変動、雇用と成長、天然ガス・石油輸入の脆弱性という 3 つの課題に対応し、2020 年までに 1990 年比 20% の温室効果ガス排出量の削減という目標の達成を前提に策定されたものである。CCS については「2030 年までに、より多くの電力と熱が CO₂ 回収・貯留を備えた、ニア・ゼロエミッション化石燃料発電所から作り出されることが必要である」とし、「EU の商業発電所において、2015 年までに最多で 12 の持続可能な化石燃料技術に関する大規模実証プラント建設をデザインする」としている。さらに 2008 年 1 月に

は、欧州委員会が「CCS 指令案」を発表し、欧州議会および理事会における審議が開始された。本指令案は、CCS の実施にかかる規制面の法的枠組を提示するものであり、議会および理事会における採択を得た後、一定期間内に EU 加盟国は国内法制度を整備することとなる。これにより、EU における CCS の制度整備の加速が想定される。

CCS 推進に関連した欧州主要国の動向をいくつか紹介する (例えは、経済産業省, 2007)。英国では、京都議定書の数値目標は 1990 年比 12.5% の削減である。2003 年に発表されたエネルギー白書において、2050 年を目指して CO₂ 排出量を現在より約 60 % 削減することを目指し、それに伴う実質的進歩を 2020 年までに達成することを掲げている。2006 年 7 月に発表されたエネルギー・レビューでは、CCS に対する規制障壁を廃止してノルウェー等のパートナー国との国際協力を強化するとしている。一方、2005 年 9 月の EU・中国首脳会議で署名された両国・地域パートナーシップに基づき、中国と CO₂ 固定化・貯留技術の開発事業に合意した。このプロジェクトの目的は、中国において CCS 技術を伴う石炭火力発電所の新設を促進することである。

オランダでは、京都議定書の数値目標は 1990 年比 6% の削減である。このうち目標の半分を国内措置で、残り半分を排出量取引 (Emission Trading), クリーン開発メカニズム (CDM: Clean Development Mechanism), 共同実施 (JI: Joint Implementation) などの京都メカニズムと呼ばれる削減目標実現のための柔軟性措置で達成することとしている。2003 年には鉱業法とその関連法規制が 200 年ぶりに改正された。本法によると、地下 100 m 以深での CO₂ 貯留には経済省の許可が必要となり、CCS 事業の許可後は、経済省および適切な機関が許可要件の遵守状況を確認することとなっている。なお、オランダには小規模な枯渇ガス田が多く存在するため、CCS のポテンシャルは非常に大きいといわれている。

ドイツでは、京都議定書における数値目標が 1990 年比 21% の削減となっている。2006 年 10 月に環境省が CCS を許容するという政策スタン

スを明らかにした。CO₂圧入による天然ガスの増進回収（EGR: Enhanced Gas Recovery）で経済的見返りが望める枯渇ガス田への貯留の調査が最優先事項となっている。貯留容量からみた潜在的可能性が高いのは、塩水性帶水層への貯留である。

ノルウェーでは、京都議定書における数値目標が1990年比1%の増加となっている。エネルギー供給の安定性を損なうことなく京都議定書の目標を達成することがエネルギー政策の最大の課題となっており、再生可能エネルギーとあわせてCCSの推進等を将来的なエネルギー政策の重点項目としている。後で詳しく述べるように、1996年からSleipnerにおいて年間100万トンのCO₂を貯留している。また、2008年4月からはSnøhvitでも天然ガスから分離したCO₂を帶水層に貯留しており、その規模は年間約70万トンとなっている。これらのプロジェクトのほかに、最近ではMongstadにおいてCO₂回収・貯留設備を有したコジェネレーション施設建設のプロジェクトが計画されている。

さらに欧州では発電施設からCO₂を回収・貯留する大規模なプロジェクトや事業が計画されている。例えば、石油メジャーのShellはノルウェーのStatoil社と共に、世界最大規模のCO₂-EORプロジェクトを計画している。SleipnerやSnøhvitにおける地中貯留に関するStatoil社の実績とEORに関するShellの経験を組み合わせたもので、商業規模の火力発電所からCO₂を回収・貯留する大規模プロジェクトである。

2) 米国およびカナダ

米国は、京都議定書に批准しない旨を表明する一方、これに変わる自国政策として2002年から2012年の10年間でGDPあたりの温室効果ガス排出量を18%削減することを目標とする気候変動イニシアティブを発表している。CCSは2005年9月にエネルギー省が発表した気候変動技術に関する戦略プランの目標の一つに挙げられている。国産化石燃料資源の管理等を行っている州政府間オイルガス委員会が2002年に設定したタスクフォースは、2007年にCO₂地中貯留に関する州法・規制ガイダンスを発表した。これは地中貯

留を利用する地下スペースの所有権や総則・規制モデルの概要をまとめたもので、州レベルにおいてCCSの規制枠組を適用し、連邦法、国際法および国際協定に合致した州法の確立に寄与することを目的としている。

また、米国は2003年2月に地球温暖化政策およびエネルギー安全保障政策における大きな柱となる新たな施策として、世界初のゼロエミッション大規模石炭火力発電の研究開発に10年間で10億ドルを投じる「FutureGen計画（FutureGen Project）」を打ち出した。同計画で建造が予定されている次世代型石炭発電プラント（IGCC: Integrated Coal Gasification Combined Cycle）では、石炭ガス化技術を用いて石炭から水素を取り出し、この水素を反応させることで、年間275MWの電力を効率的に発電することができる。同時に、発電工程で排出されるCO₂を地中に貯留することで地球温暖化抑制に寄与することが可能になる。ただし、2008年1月にエネルギー省はプロジェクトの見直し計画を発表し、CCSの商用化を加速させるために商用IGCC-CCSなど石炭発電技術の実証設備に資金助成をすることとしている。

カナダでは、京都議定書の数値目標は1990年比6%の削減である。CO₂排出量は、石油・天然ガス・石炭産業においてカナダ全体の排出量の20%を占めており、化石燃料生産と燃焼の両方から排出される。これらの発生源の近傍には、長期のCO₂隔離を可能とする化石燃料の生産井や帶水層も多く存在し、CCSの実施に必要な立地条件等が整っている。「行動計画2000」では、毎年150万トンのCO₂貯留が可能であるとしている。また、中国との間で、CCCDP(CBM Technology/CO₂Sequestration Project)を進めている。2000年には後述のように、Weyburn油田において年間100万トンのCO₂を圧入するEORが開始されている。

3) オーストラリア

オーストラリアは、2007年の政権交代によって、京都議定書を批准し、第1約束期間（2008年～2012年）については目標達成に努力すると

している。オーストラリアでは、エネルギーの安定供給と環境問題にリンクした包括的対策を進めしており、CO₂地中貯留が化石燃料からの温室効果ガス排出量低減のための重要な技術として位置づけられている。2005年にCCSを促進するため「CCSに関する規制ガイド原則」が制定された。これは、連邦国家であるオーストラリアにおいて各州・準州政府を超えてオール豪州として、影響評価、許認可、所有権、輸送、モニタリング、責任、および財政等の法的枠組を定めたものである。2008年、オーストラリアはCCS事業のためのアクセス権および所有権を認める必要があるとし、OPA法(Offshore Petroleum Act)の改正手続きを行っている。沖合で実施されるCCSについてはこの改正OPA法が適用されるが、陸域で実施されるCCSについては今後国家で一貫性のあるCCS制度を設ける必要がある。最近もっとも注目されているのはWestern Australia州のGorgon地域における沖合ガス田開発である。天然ガスから分離されたCO₂は、地下の帶水層に貯留され、その規模は年間330万トンと推計される。一方、地中貯留を実施しない前提での二酸化炭素排出量は、年間810万トンと推計され、約40%の削減となる。オーストラリア初のCO₂地貯留実証試験(Otway Project)は、Victoria州の南西部にある枯渇ガス田で行われている。ここでは天然ガスから分離されたCO₂を圧入しており、2008年4月から1~2年間かけて計10万トンのCO₂圧入が計画されている。

4) アジア諸国

近い将来アメリカを抜いて世界最大のCO₂排出国となる中国では、GreenGenプロジェクトが計画されている。このプロジェクトでは、石炭ガス化、水素製造およびCO₂貯留システムの実証を行い、石炭火力の発電効率を飛躍的に増加させるとともに、CO₂を含むニア・ゼロエミッションを達成することを目指している。この計画が順調に進めば、2020年までに発電効率が55~60%に達する400MWの大型実証プラントが完成することになっている。また、2008年5月には、発電所などで分離回収したCO₂を大慶油田

(中国・黒龍江省)に圧入する事業への技術協力が日中両国政府間で合意された。この事業には、日本からは財団法人地球環境産業技術研究機構や財団法人石炭エネルギーセンター、日揮、トヨタ自動車などが官民一体で参加することが決まっている。中国からは中国石油天然ガス集団(ペトロチャイナ)などが参加する。現在、両国政府と関係企業は事業化調査の手法について協議を続けている。

インドでは、玄武岩で覆われた非常に広大なエリアがあり、玄武岩トラップの被覆層の厚さは数百mから数千mまで多岐にわたっている。このトラップの下には厚い堆積岩(100m~4,000m)がある。CSLF(Carbon Sequestration Leadership Forum)の認定プロジェクトとしてインドの国立地球物理学研究所(National Geophysical Research Institute: NGRI)は米国のパシフィック・ノースウエスト国立研究所と共同し、“玄武岩層におけるCO₂回収・圧入・地中隔離実証プロジェクト”を実施している。本プロジェクトは、インドの玄武岩層(デカン・トラップ)について、CO₂貯留の環境上の安全性および不可逆性を評価することを目的とし、玄武岩層の下にある堆積岩においてCO₂を深層に圧入し、CO₂挙動のモニタリングを行うために必要な技術設計および実証を行うことである。本実験では、トラップの最小層厚が600mでその下層に堆積岩がある玄武岩エリアの選定、約2,000トンのCO₂の圧入、その後のモニタリングおよびモデル化を行うことが予定されている。

韓国では、気候変動問題に関連した国際協力および技術開発を積極的に推進しており、CCSも緩和対策の重要なオプションの一つに位置づけられている。CO₂回収の技術開発が積極的に推進されており、そのコストを2020年に半減する目標を掲げている。また、貯留ポテンシャルの評価を確実に実施し、貯留サイトの不足を克服することが課題としている(Yi, 2007)。

5) 日本国内の動き

日本国内では新潟県長岡市で帶水層貯留、北海道夕張市で炭層固定の実証試験が行われた。長岡

市の実証試験では 地下 1,100 m の帶水層に 10,400 トンの CO₂が圧入され、周囲に掘られた観測井を用い、圧入前後だけでなく圧入中にも各種の検層が行われ、CO₂の広がりがモニターされた。ここでは地下の温度圧力条件から CO₂は超臨界状態になっていると考えられるため、貯留層の岩石あるいは砂岩などを用いて岩石中の超臨界 CO₂の挙動を調べる室内実験も同時に行われた。長岡のプロジェクトは CO₂圧入量としては小規模であるが、多方面にわたる貴重な科学的データが取得された点で世界的にもユニークなプロジェクトである（薛・松岡, 2008）。

一方、炭層固定プロジェクトでは深度約 900 m に賦存する未採掘の夕張夾炭層に約 900 トンの CO₂を圧入し、炭層からのメタンガスを回収した。

2008 年に日本で開かれた洞爺湖サミットでの合意を受け、国内でも大規模な CCS 実証プラントの設置に向けた動きが加速しつつある。日本国内で CCS を実施する場合の問題点や課題については後で詳しく触れる。また、本特集の中のいくつかの論説でも深部帶水層貯留に関する調査や研究が紹介されている。

III. CO₂ 分離回収と地中貯留

1) 分離回収技術

火力発電所、製鉄所、セメント工場および化学プラントからの排ガス中の CO₂濃度は数%から数 10% である。排ガスから低濃度の CO₂を分離回収する技術として、化学吸収法、物理吸収法および吸着分離法がすでに実用化されている (IPCC, 2005)。化学吸収法は特殊な吸収液に低い圧力で低濃度の CO₂を化学反応で吸着させる手法である。この手法では CO₂吸着後の吸収液を加熱することにより、高濃度の CO₂を回収することができる。これに対し、高圧下で吸収液に比較的高濃度の CO₂を吸収させ、その後減圧することによって CO₂を分離回収するのが物理吸着法である。一方、ゼオライトなどの固体吸着材の細孔に CO₂を物理的に吸着させた後、減圧することによって CO₂を分離回収するのが吸着分

離法である。このように CO₂分離回収法では、加圧・減圧や加熱のプロセスを伴うため、エネルギーのほかにさまざまなコストも加わる。現状では CO₂分離回収のコストが地中貯留全体の約 70% を占めると試算されている。このため、地中貯留のコスト削減には革新的回収技術の開発が必要である。

2) 輸送と EOR

大規模排出源から分離回収された CO₂をパイプラインで輸送する技術はすでに確立されている。アメリカでは Texas, New Mexico, Colorado など複数の州をまたぐ CO₂輸送用パイプラインが整備されている。天然 CO₂ドームとしてよく知られている McElmo や Sheep Mountain からパイプラインを利用して、Texas 州の Permian Basin まで CO₂を輸送し、生産性が低下した油田へ圧入し、石油の増進回収 (CO₂-EOR) が盛んに行われている。CO₂-EOR では原油に CO₂を溶解させることによって、原油の粘性が低下し回収しやすくなる。この過程では一部の CO₂が油層に留まることから、原油回収率の向上とともに CO₂削減にもつながる。カナダ西部 Saskatchewan 州にある Weyburn 油田では、2000 年より大規模な CO₂-EOR プロジェクトが進められている。このプロジェクトは IEA Weyburn CO₂ Monitoring and Storage Project の現地実証試験として注目されている。Weyburn 油田では 1964 年から水攻法（注水による回収）による EOR が行われてきたが、2000 年よりアメリカのノースダコタ州にある石炭ガス化プラントで分離回収された CO₂を 320 km に及ぶパイプラインで輸送し、CO₂-EOR が実施されるようになった。近年、アメリカ政府は原油回収率の向上と同時に、CO₂貯留率も増大できる新しい CO₂-EOR 技術 (Integrating CO₂-EOR and CO₂ Storage) の開発に取り組んでいる。

3) 枯渇油ガス田および石炭層への貯留

CO₂地中貯留の対象層として、枯渇油ガス田 (depleted oil and gas fields), 地下深部の石炭層 (unminable coal seam) および塩水性帶水層 (saline aquifer) が挙げられている (図 2)。北

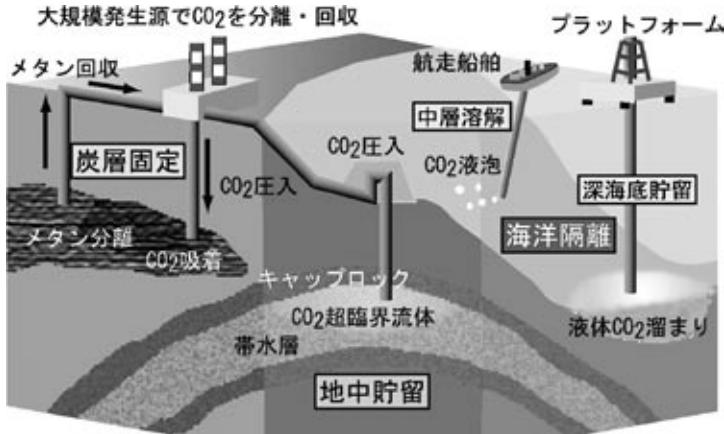


図2 CO₂ 海洋隔離、帯水層貯留および炭層固定の概念図 (RITE, 2008).

Fig. 2 A schematic diagram showing CO₂ injection into middle and deep ocean, deep saline aquifer and deep unminable coal seam (RITE, 2008).

海オランダセクターのK12-Bガス田では、天然ガスから分離したCO₂を採掘後のガス貯留層田に圧入することが試みられている。2005年より試験的なCO₂圧入が行われており、貯留メカニズムへの理解を深めるとともに、本格的なCO₂圧入に必要な安全性評価を進めている。石炭層へのCO₂圧入(炭層固定)については、ポーランドで行われたRECOPELプロジェクト¹⁾と日本の夕張(北海道夕張市)プロジェクトがよく知られている。CO₂がメタンに比べて石炭に吸着されやすい特性を利用して、CO₂貯留と同時にメタン回収ができることから、中国やオーストラリアでも炭層固定プロジェクトが進められている。

4) 帯水層への貯留

2005年に発行された地中貯留に関する特別報告書(IPCC Special Report)では、塩水性帯水層(saline aquifer)へのCO₂地中貯留(以降、帯水層貯留と呼ぶ)を「大気中の温室効果ガス濃度を安定化させるための主要な対策の一つ」と位置づけている。その主な理由の一つは、帯水層貯留のもつポテンシャルが、世界全体で約2兆トン²⁾と試算されていることである(IPCC, 2005)。帯水層貯留は、これまでの石油・天然ガスの開発や石油増進回収等で蓄積された技術が応

用できるので、即効性がある温暖化対策技術として期待されている。

帯水層貯留の代表例として、北海のSleipnerプロジェクトがよく知られている。北海のSleipnerガス田では、天然ガスから分離されたCO₂をガス田上部の塩水性帯水層(Utsira層)に圧入している。Utsira層は海底下800m~1,000mに位置する未固結の砂層で、その上部を厚い頁岩層が覆い、東西約40km、南北約200km以上の広がりをもつたため貯留ポテンシャルは膨大である。1996年10月より操業を開始し、年間約100万トンのCO₂を圧入しており、最終的には約2,000万トンのCO₂が貯留される計画である。また、アルジェリアでは、2004年からのIn Salahガス田において、天然ガスから分離したCO₂(ガス全体の5~10%)を、大気放散せずに地下のガス貯留層(石炭紀帯水層)への圧入を行っている。

IV. 帯水層貯留の貯留メカニズム

ここでは、もっとも貯留ポテンシャルの大きい帯水層貯留について、その貯留メカニズムを述べる。帯水層貯留の対象層は主に多孔質砂岩(貯留層)からなっており、経済的に利用価値がほとん

どない塩水性帯水層 (Saline Aquifer) である。貯留層の上部には泥質岩のような透水性の低い地層 (キャップロック) が覆っている。キャップロックとなる地層がドーム構造 (背斜構造) を伴う場合は構造性帯水層と呼ばれ、石油や天然ガスの貯留層と同じ地質構造となっている。日本国内で確認された構造性帯水層に限定した場合、CO₂貯留ポテンシャルは約 20 億トンと試算されている (Tanaka *et al.*, 1995)。これは京都議定書目標の達成に必要な CO₂削減量の約 12 年分に相当する。一方、ドーム構造を伴わない非構造性帯水層をあわせた試算では、帯水層貯留のポテンシャルが約 1,460 億トンに達している (RITE, 2008)。

帯水層における CO₂ の密度は貯留層の圧力と温度の関数である。圧力と温度がそれぞれ 12.5 MPa と 47°C の場合、CO₂ の密度が約 656 kg/m³ となるが地層水の密度よりは小さい。このため、地層水との密度差に起因する浮力によって CO₂ は貯留層上部へ移動するが、浸透性が低いキャップロックによって、CO₂ の移動が遮断されることになる。これが物理トラップ (physical trap) と呼ばれる帯水層貯留にとって重要な貯留メカニズムである。一方、帯水層に圧入された CO₂ の一部は地層水に溶解し、溶解トラップ (dissolution trap) が機能する。また、CO₂ 溶解によって地層水の pH は低下し、地層を構成する岩石中の鉱物との反応により CO₂ は炭酸塩として固定される。これは鉱物固定 (mineral trap) と呼ばれており帯水層に CO₂ を長期にわたって安全に貯留できるメカニズムの一つである。最近では天然ガス採掘でよく知られている残留ガストラップ (residual gas trap) に注目が集まっている。天然ガスの貯留層に水を注入すると、大部分のガスは注水によって押し退けられるが、一部のガスは逆に貯留層に留まって動かなくなってしまう。このようなガスを残留ガスと呼ぶ。CO₂ 地中貯留では人為的な注水作業は行われないが、浮力によって CO₂ が図 3 のように地層の傾斜に沿って移動することは考えられる。CO₂ の移動によって貯留層の周囲から水が侵入すれば、天然ガス層への注水で残留ガスが生じるのと同じメカニズム

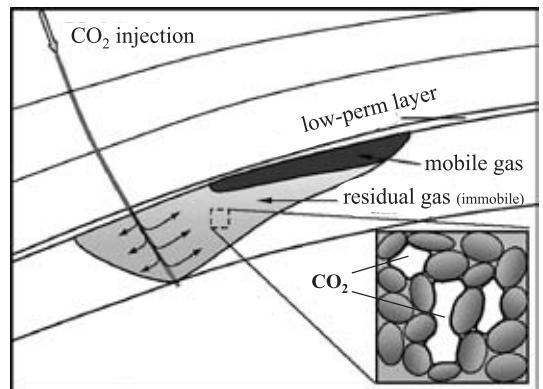


図 3 帯水層貯留における残留ガストラッピングメカニズムの概念図 (Juanes *et al.*, 2006)。

Fig. 3 A schematic diagram of the residual CO₂ trapping mechanism in aquifer storage (Juanes *et al.*, 2006).

で CO₂ が残留する可能性が高い。多孔質砂岩試料を用いた測定実験では、残留ガストラップを確認できており、その詳細については本特集 (薛・松岡, 2008) に述べられている。

V. CO₂ 挙動モニタリング

CO₂ 地中貯留を社会に広く受け入れてもらう (社会的受容) ためには長期安全性の評価が欠かせない。そのためには、帯水層に圧入された CO₂ の挙動をモニタリングする必要がある。CO₂ モニタリングの主な目的として、①圧入された CO₂ が安全に貯留対象層に留まることの確認、②貯留層モデルの最適化に必要なヒストリマッチング³⁾ 用データの取得、③貯留層からの CO₂ 漏洩を検出し、漏洩拡大阻止などの対策検討に必要な判断材料の提供、などがある。CO₂ モニタリングは、物理的モニタリング技術と化学的モニタリング技術に分かれる (IPCC, 2005)。物理的モニタリング技術は、①圧入時の圧力・圧入量の測定、②観測井を利用した物理検層や VSP、③複数の観測性を利用した坑井間弾性波・電磁波トモグラフィ、④微重力測定、⑤傾斜計や人工衛星を利用した地表の傾斜や変形の測定、⑥三次元地震波探査、などである。観測井を利用すれば、地中での

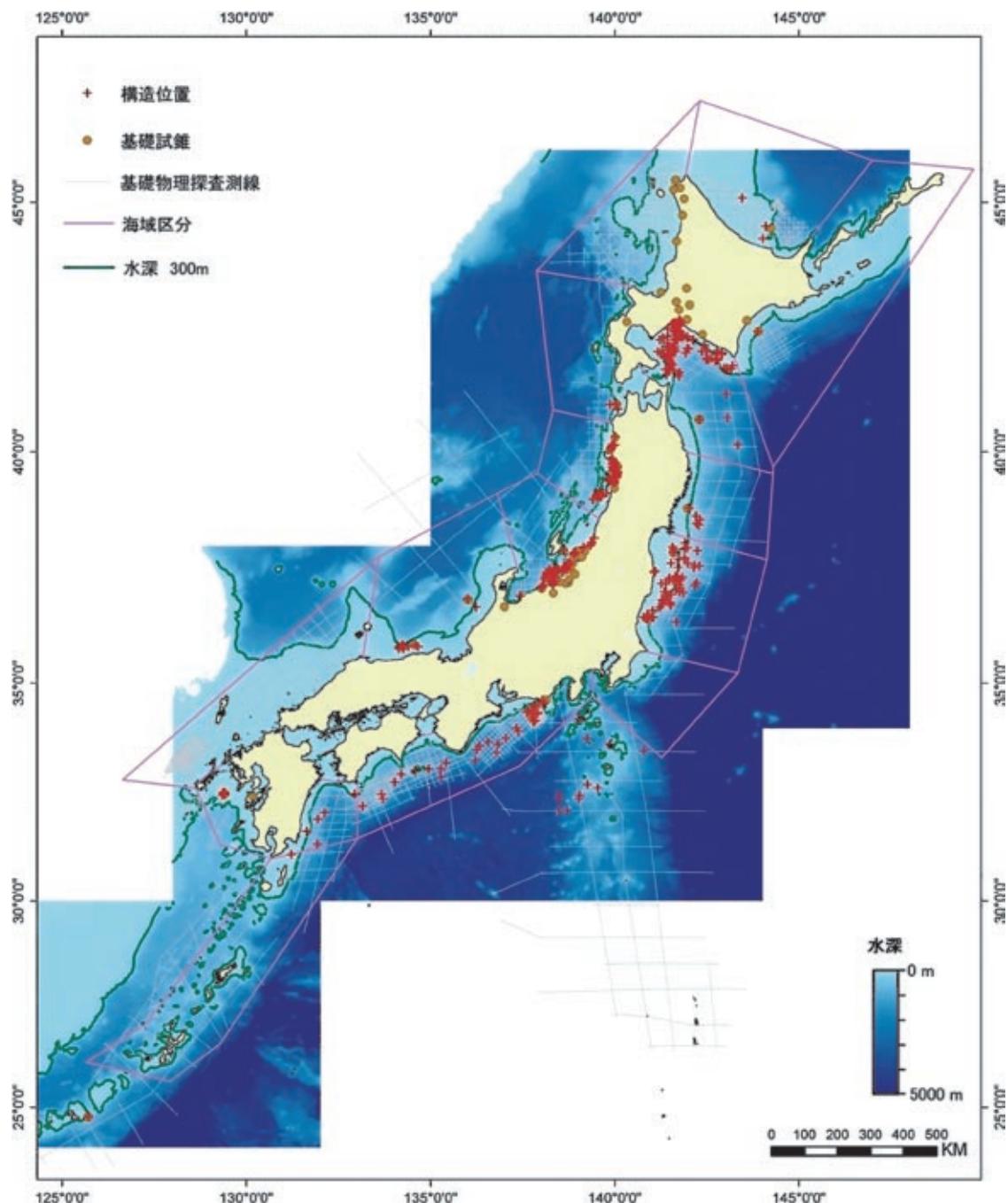


Fig. 4 Locations of anticlinal traps revealed from seismic surveys around the islands of Japan (RITE, 2002). + indicates locations of anticlinal traps.

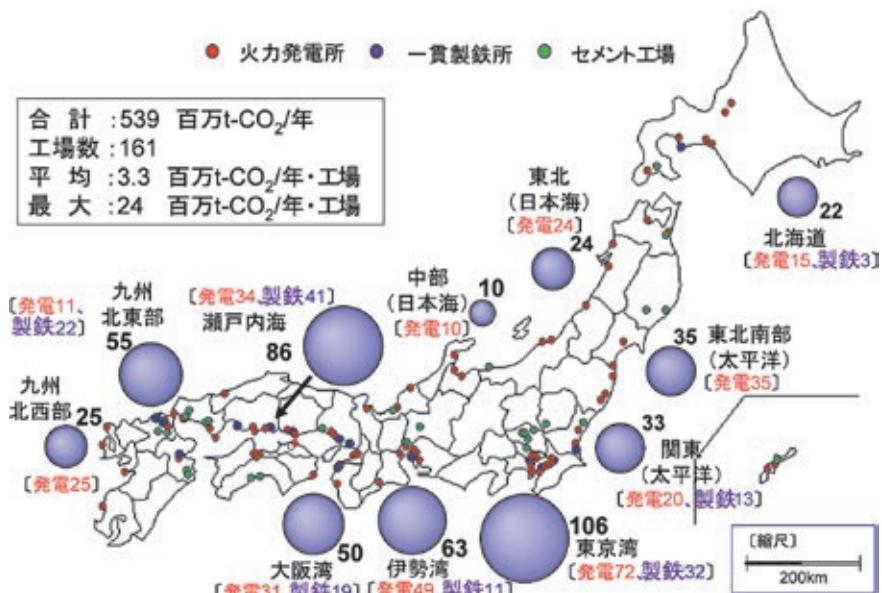


図 5 日本全国の 11 地域における CO₂ 大規模排出源の分布図 (RITE, 2005). 赤点: 火力発電所, 紫点: 一貫製鉄所, 緑点: セメント工場. 紫色の円は地域ごとの CO₂ 排出量を示す.

Fig. 5 Locations of large stationary emission sources of thermal power plants (small red dots), iron works (small purple dots) and cement factories (small green dots) in Japan (RITE, 2005). Purple circles indicate total CO₂ emissions from eleven areas. The circle size is proportional to total CO₂ emissions in the area.

CO₂ 挙動の精確な把握が可能だが、観測井そのものが CO₂ の漏洩経路となりうるため、実規模では観測井を配置する可能性は低いだろう。Sleipner や Weyburn では繰り返し三次元地震波探査 (4D seismic survey) が実施され、地中の CO₂ 挙動の把握だけでなく、貯留層からの CO₂ 漏洩監視にも有効であることがわかった (White, 2004; Arts *et al.*, 2005)。油ガス田開発で蓄積されたノウハウや広域調査に有利な地震波探査法は、CO₂ モニタリングの主要な技術と言える。

一方、化学的モニタリング技術は、①地下流体サンプルの採取、②地表付近のガス採取、③トーレーサ試験、などである。このうち、流体サンプリングでは地層水への CO₂ 溶解によって、流体中の HCO₃⁻ イオン濃度の変化や酸性化などの現象を捉えることができる。Weyburn では地層水 + 岩盤 + CO₂ 系の地化学反応について、地化学的モニタリングに基づき、貯留層での化学反応、地層水への CO₂ 溶解と炭酸塩鉱物の溶解という

二つの重要な反応が特定された。CO₂ 溶解によって地層水は酸性水となり、方解石やドロマイドとの化学反応によって HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺ イオンの増加が確認できた。さらに、圧入された CO₂ の炭素が、貯留層の炭素とは異なる同位体組成をもつことから、圧入された CO₂ ($\delta^{13}\text{C}$ 量 35%) と貯留層の圧入前の HCO₃⁻ ($\delta^{13}\text{C}$ 量 6 ~ 20%) との比により圧入された CO₂ が追跡された (Perkins *et al.*, 2005)。このように化学的モニタリング技術も、CO₂ 地中貯留の長期安全性評価に寄与できる。実際の地中貯留で何をモニターするかは規制当局や社会の要請に従うことになり、要請に合致したモニタリング技術を選択することになる。

VI. 国内の動きと CCS 実施に向けた課題

地中貯留の対象となる帯水層は日本の陸域と海域に広く分布するが、Sleipner や Weyburn のような商業規模の地中貯留を実施する場合、圧入サ

イトと排出源の間の距離も考慮しなければならない。両者の距離は地中貯留事業のコストに大きく影響するからである。とくに、圧入サイトが海域となる場合は、離岸距離と水深も重要な検討要素となる。図4は基礎物理探査より得られた国内の貯留層構造の分布と水深を示している(RITE, 2002)。この図では主に海域の帶水層、かつ水深が300m以浅の貯留層の分布に限定している。北海道、新潟県および秋田県に分布する貯留層近傍では、地質調査のための基礎試錐も行われております。これらの調査結果は圧入サイト選定にとって重要な情報となる。国内の貯留層分布調査の詳細については、2002年度の地中貯留プロジェクト成果報告書を参考されたい(RITE, 2002)。

一方、図5は国内の火力発電所、一貫製鉄所、セメント工場のような大規模排出源の分布を示しており、図中の数字は年間CO₂排出量の推定値である(RITE, 2005)。大規模排出源と帶水層の分布関係をみると、本格的な地中貯留を実現するには、貯留ポテンシャルの大きい非構造性帶水層(背斜構造を有しない帶水層)を視野に入れた検討が必要である。ただし、貯留ポテンシャルはある種の仮定に基づく手法によって試算されたCO₂貯留可能量である。個々の圧入サイト選定の段階では、ボーリング調査などを実施し、貯留可能量を精査しなければならない。

このように地中貯留技術には、コストの削減、圧入したCO₂の漏洩、環境への影響、安全性評価手法の確立、海洋生態系への影響、法制度の整備、国民の理解など解決すべき課題が多い。しかし、地球温暖化が世界的に問題視されている状況下で革新的な解決策がない現状を考えると、地中貯留はCO₂排出量削減の有効な技術の一つである。とくに深部帶水層でのCO₂貯留メカニズムに関する科学的研究と関連技術の開発はCCS実現の鍵を握っていると言えるだろう。

謝 辞

本稿は経済産業省の補助事業「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」の成果を中心まとめたものである。補助事業の実施にあたっては、地球環境産業技術研究

機構をはじめ、エンジニアリング振興協会、帝国石油等関係機関の多くの方にご協力をいただいた。また、本稿の完成にあたっては、本小特集編集委員の西澤修氏(株式会社ダイヤコンサルタント)と當舎利行氏(産業技術総合研究所)および地学雑誌編集委員会のかたがたに助言と協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

注

- 1) オランダの地層科学研究所(TNO)が中心となり、EUの支援を受けて、ポーランドのシレジア炭田で行われた炭層固定プロジェクト RECOPOL: Reduction of CO₂ emission by means of CO₂ storage in coal seams in the Silesian Coal Basin of Poland。
- 2) 世界全体の貯留ポテンシャルについて、IPCCの特別報告書では“likely at least about 2,000 Gt CO₂ in geological formations”, “Likely” is a probability between 66 and 90%と記載している。仮に、この貯留ポテンシャルの50%が利用できれば、世界全体のCO₂排出量(265億トン:2004)の約40年分に該当する。この貯留ポテンシャルは枯渇油ガス田、深部未開発の石炭層および深部塩水性帶水層を対象に評価されたが、このうちの深部塩水性帶水層だけでも、貯留ポテンシャルは最低でも1兆トンと膨大である。
- 3) すでに観測された各種の物理・化学的データを説明する最適な貯留層モデルを数値シミュレーションで探す手法。モデルでは貯留層の構造や物性だけでなく、貯留層内で生じる化学反応なども考慮する。最適モデルが見つかればそれをもとに将来予測も可能となる。

文 献

- Arts, R., Chadwick, A. and Eiken, O. (2005): Recent time-lapse seismic data show no indication of leakage at the Sleipner CO₂ injection site. *Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-7), September 5-9, 2004, Vancouver, Canada, Vol. I*, 653–662.
- IPCC (2005): Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage.
<http://www.ipcc.ch/ipccreports/srcs.htm> [Cited 2008/08/11].
- IPCC, 気象庁訳 (2007): IPCC 第4次評価報告書.
<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/> [Cited 2008/08/11].
- Juanes, R., Spiteri, E.J., Orr, Jr. F.M. and Blunt, M.J. (2006): Impact of relative permeability hysteresis on geological CO₂ sequestration. *Water Resources Research*, **42**, W12418, doi:10.1029/2005WR004806.
- 環境省 (2008):
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/cop.html> [Cited 2008/08/11].
- 経済産業省 (2007): 二酸化炭素回収・貯留研究会―中間取りまとめ。

- <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g71019a01j.pdf> [Cited 2008/08/11].
- Perkins, E., Czernichowski-Lauriol, I., Azaroual, M. and Durst, P. (2005): Long term predictions of CO₂ storage by mineral and solubility trapping in the Weyburn Midale Reservoir. *Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), September 5-9, 2004, Vancouver, Canada, Vol. II*, 2093–2096.
- RITE (2002): 平成 14 年度「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」成果報告書, 702–713.
- RITE (2005): 平成 17 年度「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」成果報告書. 1112p.
- RITE (2008):
<http://www.rite.or.jp/Japanese/project/tityu/fuzon.html> [Cited 2008/08/11].
- Tanaka, S., Koide, H. and Sasagawa, A. (1995): Possibility of underground CO₂ sequestration in Japan.
- Energy Conversion and Management*, **36**, 527–530.
- White, D. (2004): Seismic results from the Weyburn monitoring project. *1st Monitoring Workshop –in augural Meeting, University of California Santa Cruz, November 8-9*.
- 薛 自求・松岡俊文 (2008): 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**, 734–752.
- Yi, C.K. (2007): Current CCS R&D Activities in Korea.
http://www.rite.or.jp/Japanese/labochoryu/ccsccs2007tokyo/p03_Chang-Keun_Yi.pdf [Cited 2008/08/11].
- 全国地球温暖化防止推進センター (JCCA) (2008):
<http://www.jcca.org/content/view/1032/773/> [Cited 2008/08/11].

(2008 年 8 月 19 日受付, 2008 年 9 月 1 日受理)