

CO₂ 地中貯蔵の開発動向

企画小委員会委員 米山一幸（清水建設(株) 技術研究所）

1. はじめに

現在、地球温暖化対策は今世紀の世界における最も危急な課題のひとつと位置付けられており、CO₂ などの温室効果ガスの削減に向けた取り組みが世界各国で進められている。この中で、発電所などの大規模排出減から分離・回収した CO₂ を地下の油ガス田、帯水層などに圧入・貯蔵する CO₂ 地中貯蔵（CCS：Carbon Dioxide Capture and Storage）は、大気中の CO₂ 濃度を低減する経済的かつ有効な将来技術として期待されており、近年特に精力的な検討が行われている。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）は、世界各国の研究者の協力の下、炭素隔離技術特別報告書（Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage）を 2005 年にまとめた。この成果は、2007 年に予定されている第 4 次評価報告書において、重要な位置付けを占めることが予想されている。また、2006 年 6 月には第 8 回温室効果ガス制御技術国際会議（8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies：GHGT-8）がノルウェーのトロンハイムで開催され、世界各国から約 1000 人が参加して温室効果ガスの回収・貯蔵技術や、その経済性、関連する政策などについて活発な議論が行われた。

国内においても、NEDO、RITE が中心となって各種の CO₂ 隔離技術の検討が進められている。地中帯水層貯蔵については 2003 年から 2004 年にかけて新潟県長岡市において実証試験が実施され、地下 1,100m の帯水層に 10,400 t の CO₂ を圧入されて、現在も継続してモニタリングが行われている。さらに、実適用に向けたロードマップの提示、安全評価手法の確立などを目的とした検討が 2005～2007 年の 3 年計画で進行中であり、将来の実用化に向けた取り組みが鋭意進められている。

本報では、現在までに実施された CO₂ 地中貯蔵プロジェクトの事例と、最近の動向として IPCC 特別報告書の概要、GHGT-8 の発表内容の動向などを紹介する。

2. CO₂ 地中貯蔵プロジェクトの事例

CO₂ 地下貯蔵の実施事例として、ノルウェーの SACS プロジェクト、アルジェリアの InSalah Gas プロジェクト、カナダの Weyburn-Midale プロジェクト、および、新潟県長岡市の CO₂ 圧入実証試験について概説する。

(1) SACS プロジェクト（ノルウェー）¹⁾

ノルウェーの国営石油会社 Statoil 社によって運営されている Sleipner 天然ガス田において、生産される天然ガスから分離した CO₂ を地下帯水層に圧入・貯蔵を行ったもので、CO₂ 地中貯蔵として世界初の商用プロジェクトである。

Sleipner ガス田は、ノルウェーの沖合い約 250km の北海中央部に位置する。同ガス田から算出されるガスは約 9%の CO₂ を含有し、これをパイプラインによる EU 諸国への輸出規格である 2.5%まで減少するため、産出ガスから CO₂ を分離・回収する必要があった。当初は、分離した CO₂ は大気へ放出されていたが、1991 年にノルウェーが炭素税を導入したことを契機に、分離した CO₂ を地下帯水層に圧入・貯蔵することが決定された。調査の結果、Sleipner 東ガス田地下の Utsira 層と呼ばれる砂岩層が貯留層として選定された。Utsira 層は海底下約千 m に位置し、広さは約 2,600km²、層厚は 20～250m、平均的な間隙率は 30～40%程度である。また、Utsira 層の上部には厚さ 50～100m の低浸透性の頁岩層（キャップロック）が分布しており、圧入された CO₂ の上方への拡散を防止することが期待された。

CO₂ の圧入は 1996 年 9 月から開始された。注入圧は静水圧相当の 100bar、注入量は年間約 100 万トンであり、これは、当時のノルウェーの CO₂ 年間排出量の約 3%に相当する。

Sleipner での CO₂ 圧入の開始後、圧入した CO₂ の挙動をモニタリングする計画が Statoil 社より提案され、ヨーロッパを中心とした国際共同研究プロジェクト（SACS（Saline Aquifer CO₂ Storage）プロジェクト）が 1998 年から 2002 年にかけて実施された。プロジェクトの主な内容は以下のとおりである。

- 1) 貯留層・キャップロックの地質調査（コア・カッティングの分析，既存資料の調査）
- 2) 貯留層シミュレーション（シミュレータ開発、CO₂ / 塩水の性状調査，相対浸透率計測）
- 3) 貯留層・キャップロックの地化学調査（CO₂ との反応実験）
- 4) 物理探査（3 次元地震探査による貯留層内 CO₂ の探査、その他のモニタリング手法の検討）

プロジェクトの主な目的であった CO₂ のモニタリングについては、3 次元地震探査を繰り返し実施する（4 次元地震探査と呼ばれる）ことにより、貯留層内の気体 / 臨界状態の CO₂ の挙動をモニタリングでき、最小で厚さ 1m 程度の CO₂ の滞留が検知可能であることが示されている。

(2) In Salah Gas プロジェクト（アルジェリア）²⁾

アルジェリアの In Salah Gas 田において、産出ガスから分離した CO₂ を地下のガス貯留層（石炭紀帯水層）に圧入・貯蔵を行うもので、アルジェリアの国営炭化水素公社 Sonatrach と BP、Statoil の共同プロジェクトとして進められている。

In Salah Gas 田は、図-1 に示すようにアルジェリア南部の中央サハラ地域にあり、同国一の巨大ガス田である Hassi R' Mel ガス田の 520km 南方に位置する。その存在は 1950 年代より知られていたが、主に遠隔地にあることが原因で、近年まで開発が進められていなかった。1990 年代半ば頃より、南欧への輸出ガス量の将来的な需要増に対応するために開発が進められ、2004 年に生産が開始されている。

In Salah Gas プロジェクトでは、概念設計段階でプロジェクトのライフサイクル全体を

対象とした環境マネジメント計画を作成し、プロジェクトの遂行に関して ISO14001 の認定を取得したことが大きな特徴となっている。産出ガスの CO₂ 濃度を輸出規格である 0.3%以下に調整するために、最大で年間 6.6 億 m³、プロジェクト全期間で 120 億 m³ の CO₂ が発生することが予測されているが、そのすべてが地中に貯蔵される計画である。CO₂ 貯留層として複数の層が調査された結果、ガス田北部の Krechba フィールドのガス貯留層（石炭紀帯水層）が選定され、ガス生産井の周囲 3ヶ所に CO₂ 圧入井が掘削されて、ガスの生産と CO₂ の圧入が同時に行われている。BP が事前に実施した予測シミュレーションでは、圧入した CO₂ は約 30 年後にガスの貯留部に到達するが、ガス生産終了後であり（生産期間 25～30 年）、産出ガスへの影響はないとされている。

本プラントの設計・建設には日揮（株）が参加した。CO₂ の圧入は 2004 年 8 月から開始され、設計圧入量は 120 万トン/年となっている。



図-1 In Salah Gas 田¹⁾

(3) Weyburn-Midale CO₂ Monitoring and Storage プロジェクト（カナダ）³⁾

カナダアルバータ州、サスカチュワンアルの Weyburn 油田、Midale 油田において、石油増産回収（EOR）のために地下に圧入された CO₂ のモニタリングするプロジェクトで、国際エネルギー機関（IEA）の GHG R&D プログラムとして実施されている。

プロジェクトは 2000 年から 2004 年までの第 1 フェーズと、2005 年から 2009 年までの最終フェーズからなっている。第 1 フェーズは Weyburn 油田のみを対象としており、深度 1,500m の油層に 5,000 t/日のレートで CO₂ が圧入され、30,000 バレル/日（CO₂ 圧入による増産分は 18,000 バレル/日）の軽質原油が生産されている。CO₂ はダコダ近傍の石炭ガス化プラントで排気から分離・圧縮（液化）され、長さ 320km のパイプラインを介して圧入サイトまで運ばれる。圧入は現在も継続されており、30 年間で約 3 千万トン程度の CO₂ が油層中に貯蔵されると見込まれている。

プロジェクトは、カナダの Petroleum Technology Research Centre（PTRC）が中心となって実施し、日本からは（財）エンジニアリング振興協会が参加している。モニタリング技術の開発・評価、長期貯蔵のリスクアセスメント、定期的な地震探査、地下水、地層ガス調査、貯留層モデルと生産・圧入量のマッチング、地質化学的メカニズムの研究のための地層水サンプリングなどが行われている。この第 1 フェーズの報告書は、2004 年にバンクーバーで開催された GHGT-7 で公表されている。また、報告書の概要版は PTRC のホームページ（<http://www.ptrc.ca>）からダウンロードできる。

プロジェクトの第1フェーズに引き続き、最終フェーズが2005年より開始された。このフェーズでは、Weyburn 油田に加えて2005年10月にCO₂圧入が開始されたMidale 油田も対象となっており、2006年9月現在1368 t/日のレートで圧入が行われている。最終フェーズは、EOR ベースのCO₂ 地中貯蔵のベストプラクティスマニュアルを完成することを目的としており、下記の5テーマについて検討が行われている。

- 1) 地質学的検討（適地選定）
- 2) 坑井仕上げ・閉塞
- 3) 貯留層モニタリング
- 4) リスクアセスメント，貯蔵メカニズム

この他に、CO₂ 地中貯蔵の広範な実施に向け、規制・ガイドライン、社会的受容性（PA）などについても検討が行われている。

(4) CO₂ 圧入実証試験（新潟県長岡市）⁴⁾

本試験は、NEDO の委託により RITE が2000年から2004年に実施した「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」において計画・実施されたCO₂ 圧入実証試験であり、新潟県長岡市の地下1,100mの帯水層にCO₂の圧入が実施された。本実証試験の目的は、

- 1) 二酸化炭素の地中挙動に関する理解
- 2) 既存技術の二酸化炭素地中貯蔵への適用性検証

とされている。圧入井の周囲3ヶ所に観測井を掘削し、弾性波トモグラフィ、坑井内計測（比抵抗検層、中性子検層、ガンマ線検層、音波検層）などの計測が実施され、挙動予測シミュレーションと結果の比較が行われている。

圧入試験は2003年7月7日から2005年1月11日まで実施され、累計で10,405トンのCO₂が圧入された。CO₂の挙動を観測するためのモニタリングは現在も継続して実施されている。

なお、本試験の詳細を報告した「二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書」は RITE ホームページ（<http://www.rite.or.jp>）からダウンロードできる。

参考文献

- 1) Torp, T. A. and Gale, J. : Storing CO₂ in geological reservoirs: the Sleipner and SACS projects, Proc. of the 22nd World Gas Conference, 2003
- 2) Riddiford, F. et. Al. : Storage and Sequestration of CO₂ in the In Salah Gas Project, Proc. of the 22nd World Gas Conference, 2003
- 3) Monea, M. and Preston, C. K. : Overview and new directions of IEA GHG Weyburn – Midale CO₂ Monitoring and Storage Project, Proc. of 8th International Conference of Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-8), 2006
- 4) 村井：日本のCO₂ 地中貯留技術・海洋隔離技術の現状と展望：RITE World 2003-I, pp.16-17, 2003

2 . IPCC 特別報告書

二酸化炭素の回収・貯蔵技術（CCS：Carbon Dioxide Capture and Storage）については、2004年4月のIPCC第19回全体会合（スイス・ジュネーブ）で特別報告書（Special Report）としてまとめることが合意され、2003年初めに執筆者が選定され、4回の執筆者会合を経て2005年1月に最終ドラフトが完成。各国政策担当者のレビューの後、2005年9月の第24回全体会合（カナダ・モントリオール）で承認された。

報告書はCO₂の回収（Capture）、輸送（Transportation）、貯蔵（Storage）および工業利用（Industrial uses）を対象としており、このうちの貯蔵については地中貯蔵（Geological storage）、海洋貯蔵（Ocean storage）、鉱物固定（Mineral carbonation）のそれぞれについて技術、経済性の両面から検討が行われている。報告書は「政策担当者向け要約（Summary for Policymakers）」、「技術的要約（Technical Summary）」と「全体報告（Full Report）」で構成されており、IPCCのホームページ（<http://www.ipcc.ch>）からダウンロードすることができる。

・特別報告書目次

Summary for Policymakers

Technical Summary

1. Introduction

2. Sources of CO₂

3. Capture of CO₂

4. Transport of CO₂

5. Underground geological storage

6. Ocean storage

7. Mineral carbonation and industrial uses of carbon dioxide

8. Costs and economic potential

9. Implications of carbon dioxide capture and storage for greenhouse gas inventories and accounting

以下に「政策担当者向け要約」の中の主な結論を列記する。なお、経済性の検討は原油価格が20～30ドル/bblで推移していた2002年当時の結果であり、現状では異なる結果となる可能性があることに留意する必要がある

- ・現状のCO₂回収技術では発電、工業プロセスの85～95%を回収できる。一方で、CCSプロセスを装備した発電プラントは装備しない場合に比べてエネルギー消費量がおよそ10～40%増加し、そのほとんどは回収と昇圧に用いられる。
- ・深部地層へのCO₂貯蔵は、石油・ガス産業で発達した技術を適用でき、油ガス田、帯水

層を対象とした場合は特定の条件下では経済的にフィージブルであることが検証されている。

- ・現在の発電コストは 1kWh 当たり 0.04 ~ 0.06 ドルが、CCS 技術を導入すると、1kWh 当たり 0.01 ~ 0.05 ドル価格が高くなる。
- ・CCS システムは発電部門に用いられたときに地球温暖化対策として最も有効である。発電所からの排出削減を目的とした CCS が機能するためには、CO₂ 削減コストが 25 ~ 30 ドル/CO₂-t となる必要がある
- ・現在確認されている地質情報によると、全世界の CO₂ 地中貯蔵の貯蔵容量はおおよそ 2000Gt-CO₂
- ・温室効果ガス安定化シナリオの多くにおいて、CCS の経済的ポテンシャル量は 220 ~ 2200Gt-CO₂ と試算され、これは 2100 年までの削減量の 15 ~ 55%に相当する。CCS がこのポテンシャルを確保するためには、毎年 1 ~ 5Mt の CO₂ を貯蔵する CCS システムを 21 世紀中に数百から数千設置する必要があり、環境へのインパクト、漏洩リスク、明確な法制度の欠如などの理由で、実際の設置数はこれより少なくなりそうである。
- ・ほとんどのシナリオにおいて、温暖化対策における CCS の役割は 21 世紀中に増加し、CO₂ 濃度安定化の費用を 30%以上削減する可能性がある。
- ・工学およびナチュラルアナログの観測によると、適切に選択・運営された貯留層の場合、100 年後に 99%の CO₂ が層内に残存する可能性が高く (very likely: 90 ~ 99%の確度)、1000 年後に 99%の CO₂ が層内に残存しそうである (likely: 66 ~ 90%の確度)

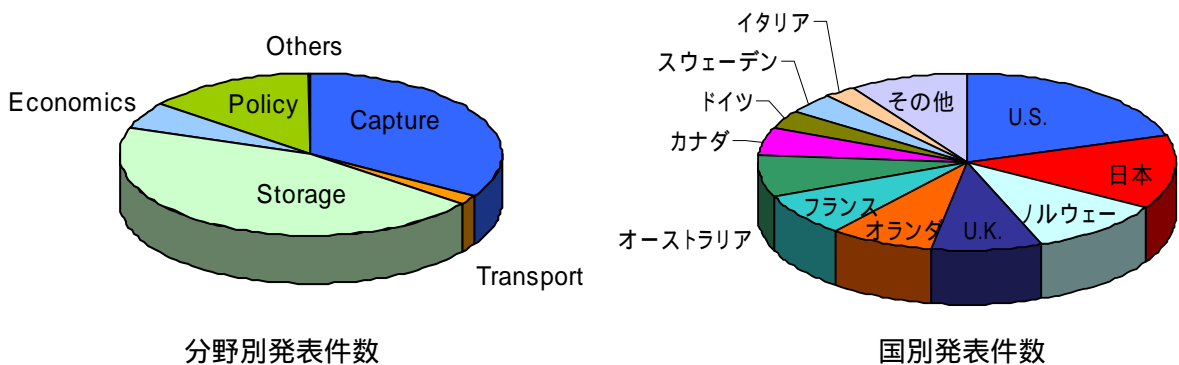
3. 第8回温室効果ガス制御技術国際会議 (GHGT-8)

第8回温室効果ガス制御技術国際会議 (GHGT-8 / 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies) が、2006年の6月19日から22日までノルウェーのトロンハイムで開催された。各国から約1000人が参加し、我が国からも、RITEを初め多くの研究者が参加し発表を行っている。

全454件の発表数(口頭・ポスター)の分野、国を分析した図を以下に示す。分野別では貯蔵(Storage)が最も多く全体の約5割を占め、この分野への興味の高まりを示している。国別の発表件数ではアメリカが最も多く、日本は60件で第2位となっている。

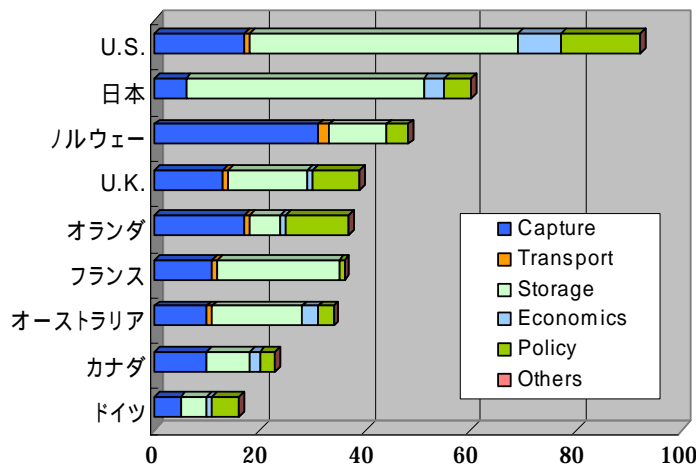
各国の発表内容を見ると、アメリカ、日本、フランス、オーストラリアなどでは貯蔵に関する発表が多いのに対し、ノルウェー、オランダなどは分離回収(Capture)の発表が多くなっている。また、貯蔵部門のセッション別件数では、従来のメカニズム、坑井仕上、モニタリングなどの分野に加えて、地域アセスメント、リスク評価などの発表が増加している点が特徴的である。

第9回会議は、2008年11月にアメリカのワシントンDCで開催される予定である



分野別発表件数

国別発表件数



各国の分野別発表件数

貯蔵 (Storage) 分野のセッション別発表件数

メカニズム (Mechanisms)	30 件
坑井仕上 (Well Integrity)	16 件
化学的見地 (Chemical Aspects)	17 件
モニタリング (Monitoring)	24 件
フィールド事例 (Field Cases)	28 件
地域アセスメント (Regional Assessments)	20 件
リスク評価 (Risk Analysis)	20 件
炭層貯蔵 (Storage in Coal)	19 件
海洋貯蔵 (Ocean Storage)	22 件