

CO₂ 地中貯留技術の概要と産総研での取り組み

中尾信典¹⁾・當舍利行²⁾・西 祐司¹⁾

1. はじめに

二酸化炭素回収・貯留（CCS：Carbon-dioxide Capture and Storage）は、火力発電所や製鉄所などの大規模な排出源から二酸化炭素（CO₂）を分離回収し、地下または海洋に長期間にわたり貯留・隔離することで、大気中に排出されるCO₂の量を削減し、気候変動を抑制しようとする技術です。

温室効果ガスの排出は、一つの技術のみで大幅に削減できるものではなく、再生可能エネルギーの普及や、省エネルギーの一層の促進など、多様な技術を組み合わせて対応していくことが気候変動対策として重要です。その中でCCSは、化石燃料の使用にある程度依存する必要があるとする今後の中長期的なエネルギー展望の中で、化石燃料に依存したエネルギー消費社会から低炭素社会への脱却を図るまでの過渡的な段階において、CO₂を即効的に削減可能な技術として最近注目されている技術の一つです。

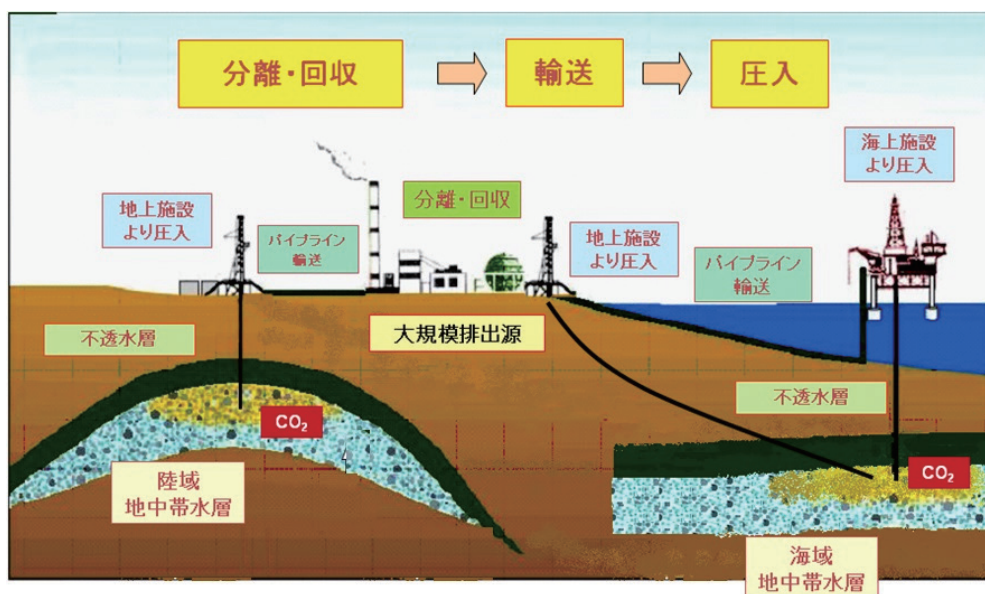
少し前になりますが、2008年7月に行われた洞爺湖サミットの首脳宣言において、「我々は、2020年までにCCSの広範な展開を始めるために、各国毎の様々な事情を考慮

しつつ、2010年までに世界的に20の大規模なCCSの実証プロジェクトが開始されることを、強く支持する。」ことが、明記されました。国際的にも気候変動対策の一つとしてCCSに重点を置く方向性が打ち出されています。また、2012年6月に、政府のエネルギー・環境会議が取りまとめた「エネルギー・環境に関する選択肢」の3つのシナリオ（原子力発電の比率を2030年までに0%、15%、20~25%程度に下げるというシナリオ）のいずれにおいても、2030年時点での化石燃料の依存度は50~65%と想定されています。このように、しばらく化石燃料に依存したエネルギー消費社会が続く限りは、CO₂を即効的に削減可能なCCS技術の早期導入・普及が不可欠と考えられます。

本稿では、「CO₂地中貯留」小特集の導入として、CCSのしくみ、CCSのうちCO₂地中貯留技術に関して、現状と課題、国内外の動向、産総研の研究取り組みなどを紹介します。

2. CCSとは

CCSとは、人為的大規模排出源からCO₂を分離回収し、



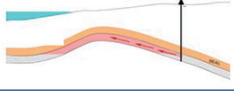
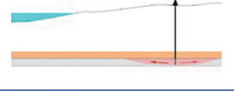
第1図 二酸化炭素回収・貯留（CCS）の一連の流れと仕組み（経済産業省，2007より）

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

2) 産総研 地圏資源環境研究部門（現 石油天然ガス・金属鉱物資源機構）

キーワード：CO₂地中貯留，気候変動対策，モニタリング，モデリング，安全性評価

第1表 国内深部帯水層のカテゴリー分類と貯留ポテンシャル（経済産業省，2007より）。

地質データ		カテゴリーA 構造性帯水層	カテゴリーB 非構造性帯水層
油ガス田	坑井・震探 データが豊富	A1 35億t-CO ₂	B1 275億t-CO ₂
基礎試錐	坑井・震探 データあり	A2 52億t-CO ₂	
基礎物探	坑井データなし、 震探データあり	A3 214億t-CO ₂	B2 885億t-CO ₂
貯留概念図			
小計		301億t-CO ₂	1,160億t-CO ₂
合計		1,461億t-CO ₂	
(参考)実施状況		Weyburn(カナダ)等 長岡岩野原(日本)	Sleipner(ノルウェー)等

地下または海洋に長期間にわたり貯留・隔離する技術であり，第1図に示すように，分離回収，輸送，貯留の3つのプロセスから構成されます（経済産業省，2007）．CO₂の分離回収には，化学吸収法，物理吸収法，膜分離法などが，輸送方法には，パイプライン，船舶，車両などがあります．貯留には，地中貯留と海洋隔離があります：地中貯留には，帯水層貯留，石油増進回収（EOR：Enhanced Oil Recovery）・ガス増進回収（EGR：Enhanced Gas Recovery），枯渇油・ガス層貯留および炭層固定が，海洋隔離には，溶解希釈方法と深海底貯留隔離があります．海洋隔離は，海洋に囲まれた日本にとっては長期的観点から重要なCO₂貯留・隔離方法ですが，国際的に実施するための環境がまだ整っていない状況です．日本におけるCO₂地中貯留を想定した場合，深部帯水層（塩水を間隙に保持している地層）への貯留が大きな貯留ポテンシャル（貯留可能容量）を有しており，有望と考えられています．しかし，一定程度の経済メリットのある省エネルギー技術などと異なり，また，CCSの同類で経済的インセンティブが働くEORとは異なり，CCSは単独ではインセンティブが働かない温暖化対策に特化した方策です．

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）がCCSに関する特別報告書を2005年に発表して以来（IPCC，2005），二酸化炭素の回収・貯留技術をCCSと呼称することが定着し，気候変動対策の手法として脚光を浴びるようになりました．ただし，CCSの各プロセスは以前から研究がされていたものであり，それらの既存技術を気候変動対策として組み合わせたのがCCSであるといえます．分離回収技術については都市ガスの生産用に60年ほど前に関連手法が開発され，それ以降様々な手法が研究されています．1980年代には，気候変動対策として発電所からのCO₂分離回収

の適用が初めて議論されています（Horn and Steinberg，1982）．地中への圧入・貯留については，石油・ガスの探査・生産と同様の掘削技術などが応用可能であり，EORを目的としたCO₂圧入が1970年代から実施されています（Blunt *et al.*，1993）．さらに，塩水帯水層（Koide *et al.*，1992），石炭層（Gunter *et al.*，1997）への貯留が，貯留概念の発展系として提唱されてきました．

では，CCSにより，どの程度のCO₂排出量の削減が可能となるのでしょうか．IPCCのCCS特別報告書によると，地中貯留によるCCSだけでも約2兆トンの貯留ポテンシャル（貯留可能容量）が見込まれており（IPCC，2005），これは現在の世界全体のCO₂排出量の約80年分に相当します．一方，日本での貯留ポテンシャルは第1表に示す通り，地球環境産業技術研究機構（RITE）の調査によると，約1461億トンと算出されています（経済産業省，2007）．我が国の温室効果ガスの総排出量は2010年度に12億5800万トンであり，我が国周辺にも十分な地中貯留量が見込まれます．

また，国際エネルギー機関（IEA）が公表した「エネルギー技術展望2012」では，2050年のCO₂累積削減量の最大20%をCCSにより達成する，という青写真が描かれています．このように，CCSには非常に高い評価と期待が寄せられています．しかし約20%削減を担うためには，現在商用ベースで稼働している北海・スライプナーのCO₂年間貯留量と同規模の地中貯留プロジェクトが，2050年に世界で数千ヶ所必要となります（世界排出量の約4%に当たる日本では，100ヶ所オーダーに相当）．これは非常にチャレンジングな目標であるとともに，このスケールを意識した上で，一日も早い実用化に向けたRD&D（研究・開発・実証）を加速させる必要があります．

第2表 海外における主な CCS 関連プロジェクト.

	ノルウェー スライプナー	ノルウェー スノービット	カナダ ウェイバーン	アルジェリア インサラ
実施主体	Statoil社	Statoil社	Encana社	BP社+Statoil社
場所	ガス田上の 帯水層	ガス田上の 帯水層	油層 (EOR)	ガス田
	海域	海域	陸域	陸域
開始時期	1996年10月	2008年4月	2000年9月	2004年7月
注入レート (国内総排出量比)	100万トン/年 (2.9%)	70万トン/年 (2.3%)	100万トン/年 (0.2%)	120万トン/年 (1.7%) 2012年11月中止
総量	1700万トン	4000万トン	2000万トン	1700万トン
CO ₂ 源	天然ガス随伴	天然ガス随伴	石炭ガス化炉	天然ガス随伴

3. 貯留技術の国内外動向

CO₂は常温常圧では気体の状態にあり体積が大きいため、地下への圧入には向きません。そこで、気体と液体の区別がなくなる超臨界状態（圧力7.38 MPa以上、温度31.1℃以上）にして体積を小さく、かつ粘性が低い状態にして坑井を通して地下に圧入する必要があります。深度的には超臨界状態を保持できる圧力・温度となる深度800 mよりも深い地層まで坑井を掘削して貯留用のターゲットとします。

海外で実際に稼働している大規模なCCS関連プロジェクトは、2013年10月10日時点で12か所あり、2015年までに稼働予定のプロジェクトも同程度あります（Global CCS institute, 2014；以後GCCSIと略す）。12の稼働中のプロジェクトのうち、主なものを記します（第2表）。EORではない海域のプロジェクトとして一番古いのは、1996年から稼働している北海のスライプナー天然ガス田です。スライプナーでは、天然ガスに伴って産出される9%程度のCO₂を分離して、海底下約800 mから1,000 mの深さにある地層へ圧入する事業が行われています。CO₂貯留量は年間100万トン規模であり、貯留したCO₂の挙動を把握するため、弾性波探査（反射法）を利用したモニタリング（監視）ならびに海底重力計による重力モニタリングが行われています。カナダのウェイバーン（陸域）ではEORを主体とした圧入および弾性波探査によるモニタリングが実施されています。アルジェリアのインサラでは年間120万トンが圧入されていましたが、2011年6月から操業が停止されています。

上述の稼働中12か所以外にも、CCS関連プロジェクトはEOR、EGR関連のプロジェクトだけでなく、帯水層を

貯留場としたプロジェクトも含めて先進国を中心に53か所ほど計画されています（GCCSI, 2014）。しかし最近では、米国をはじめとして、経済的なインセンティブが働くEOR関連のプロジェクトにシフトする傾向が見られます。一方、2011年10月にはISO（国際標準化機構）のTC265専門委員会が設立され、CCSの国際標準化に向けた検討が進められています。

我が国では、新潟県長岡市の帝国石油岩野原サイトにおいてRITEにより基礎的な圧入実験が行われました。2003年2月より2005年1月までの間で総量約1万トンのCO₂が圧入され、弾性波を用いたモニタリング手法である坑井間トモグラフィなどにより貯留帯水層内にCO₂が漏洩することなく留まっていることが確認されています（薛・松岡, 2008）。このような石油ガス田の付随する地層は、構造的にCO₂貯留に適していると考えられており、通常、石油ガスが採取された後の地層は塩水地下水に満たされていることから構造的帯水層と呼ばれています（第1表参照）。

一方、CCSの適用対象として考えられている火力発電所などの大規模排出源から貯留場所が近ければ近いほど、輸送に必要なコストの低減が可能となります。現在、我が国の多くの大規模排出源は大都市周辺に立地しており、構造的帯水層が確認されている地域からは離れた地域にあります。このような大規模排出源が立地する大都市の多くは海岸沿いの平野部にあり、その地下には比較的単純な構造で、長期間にわたって停滞して水資源として利用できない地下水（塩水）に満たされた地層が存在しています。このような非構造的帯水層（第1表）についても、今後は地中貯留のターゲットとして技術的な検討をする必要があると考えられます。

国内のCCS進捗状況としては、経済産業省が2012年2

月に北海道苫小牧地点において実証試験を実施することを決定し、委託先の日本CCS調査株式会社が2012年から設計・建設等に着手、2016年にはCO₂地中貯留が開始される見込みとなっています。

4. 技術的課題と産総研の取り組み

地下に貯留したCO₂が長期間にわたり留まるかを監視することは、CCSの事業化を推進する上で非常に重要なポイントです。実際に利用可能なモニタリング技術として、地震探査、重力探査という物理探査手法がありますが、地下貯留したCO₂量をより正確に検証するためには、精度の高い当該技術の開発やCO₂保持機能の解明を進めるとともに、モニタリング技術の低コスト化に向けた取組を進め、モニタリング結果を踏まえたCO₂挙動予測手法の確立を図ることが今後の課題です。圧入したCO₂が地下構造、地層、地層水との間で物理的・化学的にどのようにトラップ（保持）されるかを定量的に調べることも課題です。また、地震国であり活断層が数多く存在する我が国においては、環境影響評価・社会的受容性の確保も、CCSにとって重要な課題であり、CCSの事業化に当たっては、社会的な認知度を高めていくことが技術開発とともに必要です。

地圏資源環境研究部門では現在、経済産業省からの受託研究を中心にCO₂地中貯留関連の技術開発・研究を行っています。それらの内容は、地下貯留層に圧入されたCO₂を精度よく、かつ低コストで効率的にモニタリングする技術開発、長期的な挙動を予測・モデル化する技術開発、圧入したCO₂を封じ込めるための地層（断層を含む砂岩泥岩互層）の遮蔽性能を評価するための技術開発・知見の蓄積など、CO₂地中貯留を安全に、かつ効率的に実施するための研究です。本特集号では当部門で実施しているこれら研究の概要を紹介し、また当部門では、地下に圧入したCO₂の漏洩がないか評価をする“リスク評価”技術の開発(田中ほか,2010)や、資源創成に向けたCO₂圧入による地下微生物の挙動(メタン生成)に関する萌芽的研究(Mayumi *et al.*, 2013)などにも積極的に取り組んでいます。

文 献

- Blunt, M., Fayers, F. J. and Orr Jr., F. M. (1993) Carbon dioxide in enhanced oil recovery. *Energy Convers. Manage.*, **34**, 1197-1204.
- Global CCS Institute (2014) Status of CCS project database. <http://www.globalccsinstitute.com/data/status-ccs-project-database> (2014/03/27/ 確認)
- Gunter, W. D., Gentzis, T., Rottengusser, B. A. and Richardson, R. J. H. (1997) Deep coalbed methane in Alberta, Canada: a fuel resource with the potential of zero greenhouse gas emissions. *Energy Convers. Manage.*, **38**, 217-222.
- Horn, F. L. and Steinberg, M. (1982) Control of carbon dioxide emissions from a power plant (and use in enhanced oil recovery). *Fuel*, **61**, 415-422.
- IEA (2012) エネルギー技術展望2012エグゼクティブサマリー日本語版, http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ETP_Executive_Sum_Japanese_WEB.pdf (2014/03/27/ 確認)
- IPCC (2005) *Special report on carbon dioxide capture and storage*. Cambridge Univ. Press, New York, 431p.
- 経済産業省 (2007) CCS2020—二酸化炭素の分離回収・地中貯留技術の現状と実用化の方向について, <http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g60525a09j.pdf> (2014/03/27/ 確認)
- Koide, H., Tazaki, Y., Noguchi, Y., Nakayama, S., Iijima, M., Ito, K. and Shindo, Y. (1992) Subterranean containment and long-term storage of carbon dioxide in unused aquifers and in depleted natural gas reservoirs. *Energy Convers. Manage.*, **33**, 619-626.
- Mayumi, D., Dolfing, J., Sakata, S., Maeda, H., Miyagawa, Y., Ikarashi, M., Tamaki, H., Takeuchi, M., Nakatsu, C. H. and Kamagata, Y. (2013) Carbon dioxide concentration dictates alternative methanogenic pathways in oil reservoirs. *Nature Communications*, DOI: 10.1038/ncomms2998.
- 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.
- 田中敦子・坂本靖英・駒井 武 (2010) CO₂地中貯留に対するリスクアセスメント取り組みの現状. *Journal of MMIJ*, **126**, 592-601.
- NAKAO Shinsuke, TOSHA Toshiyuki and NISHI Yuji (2014) Outline of CO₂ geological storage, and AIST's research approach.

(受付: 2014年3月28日)