解説シリーズ

福島第一原子力発電所事故後の天然ガス及び化石燃料の利用動向

第3回 CO₂回収・貯留(CCS)

(公財)地球環境産業技術研究機構 高木 正人

CO₂回収・貯留(CCS)は化石燃料からエネルギーを取り出す際に発生するCO₂を分離回収し、地中や海洋に隔離することによって、大気中への排出を抑制する技術であり、地球温暖化防止のために、原子力、再生可能エネルギーと並んで有効な技術である。各国で活発な研究開発が行われ、多くの実証プロジェクトが計画されている。気候変動政策が不透明であることに対して、初期の投資額の大きさやパブリックアプセプタンスが実施に向けての課題となっている。

I. はじめに

本稿では、化石燃料の利用動向としてCO₂回収・貯留(Carbon dioxide Capture and Storage: CCS)について解説する。CCSは化石燃料からエネルギーを取り出す際に発生するCO₂を分離回収し、地中や海洋に隔離することによって、大気中への排出を抑制する技術であり、地球温暖化防止のために、原子力、再生可能エネルギーと並んで有効な技術である。本稿ではまず、CCSとは何かについて解説した後、地球温暖化防止のためにCCSに期待するCO₂削減量、プロジェクト動向、我が国での取り組み、および現状での課題について述べてみたい。

II. CCSという技術：概要と位置づけ

1. CCSの概要

CCSは発電所や製鉄所などの固定排出源から発生するCO₂を分離回収し、貯留場所まで輸送し、(地中貯留の場合には)地下の貯留層に圧入し、隔離することによって、大気中へのCO₂の排出を抑制する技術である(第1図)。技術を要素別に概観すると次のようになる。

(1) CO₂の回収

固定発生源からCO₂を分離回収するプロセスである。回収時の消費エネルギーおよび回収コストの低減はCCSの大きな課題のひとつであり、このため低エネルギー消費、低コスト型の分離回収技術がさかんに研究開発されている。CO₂の濃度を高めるには、空気の代わりに酸素によって燃焼や酸化を行う酸素燃焼法などの燃

焼・酸化プロセスの改善による方法と、発生するCO₂を化学吸収、物理吸収、膜分離、深冷分離などの方法によって分離回収する方法がある。

(2) 輸送

分離回収したCO₂を貯留層まで輸送するプロセスである。パイプライン、タンカー、ローリー輸送が考えられる。パイプライン輸送では、回収されたCO₂を脱水、昇圧し、パイプラインに送り込む。海外ではCO₂が液体状態となる10 MPa以上で行われることが多い。北米ではすでに自然源や人為的発生源から生じる3,000万トン以上のCO₂が毎年、6,200 kmに及ぶ米国とカナダを結ぶパイプラインを通じて輸送されている。一方、輸送距離が大きくなるとパイプラインでの輸送コストは増大するため、タンカー輸送が有利となる。日本においては陸上パイプラインの敷設コストは極めて高いことから、タンカー輸送も有望な選択肢となり得る。タンカー輸送の場合にはCO₂を液化して輸送を行う。

(3) 貯留

海洋隔離は非常に有効なCO₂の隔離法であるが、国際

第1図 CCSの概要と構成要素

Global Utilization Trend of Natural Gas and Fossil Fuels after Fukushima Dai-ichi Nuclear Accidents(3); Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS): Masato TAKAGI.

(2012年 4月2日 受理)

的な合意が得られていないため、本稿では CO₂ 地中貯留について記述する。CO₂ 地中貯留は CO₂ を地下の空間に圧入して閉じ込め、貯留する技術である。したがって、貯留場所には「CO₂ を貯留するための空間」、「CO₂ が逃げ出さないためのシール層」および「シールのための構造」が必要である。「CO₂ を貯留するための空間」としては多孔質で浸透性のある岩石が適しており、堆積層が有力な候補になる。また、「CO₂ が逃げ出さないためのシール層」としては低空隙率・浸透率の頁岩や泥岩などがあげられる。「シールのための構造」としては貯留層の上部にシール層(キャップロック)を有する構造が必要であり、ドーム構造(背斜構造)などがあげられる。また、CO₂ の貯留量を大きく取るためには、CO₂ が占有する体積を小さくするように、超臨界状態で貯留する。このため、貯留層の深度が、圧力・温度条件を満たす 800 m 以上であることが必要である。

このような貯留の条件を満たす場所としては堆積盆地がある。堆積盆地とは、泥や砂、火山噴出物が堆積した地層が厚く分布する場所のことであり、貯留層としては第 2 図に示す石油・ガス田、石炭層、および地下深部塩水層(帯水層)があげられる。

石油・ガス田の CO₂ 貯留ポテンシャルは世界全体で 6,750~9,000 億トンと推定されているが、地下深部塩水層は 1~10 兆トン以上とさらに大きな貯留ポテンシャルを持っている。このように世界の地中貯留のポテンシャルは少なく見積もっても約 2 兆トンあるとされている¹⁾。

2. CCS の位置づけ

CCS は大気中の CO₂ を大量かつ比較的安価に削減できる技術であり、また既存の技術を組み合わせることで対応できるため、再生可能エネルギー等が普及するまでの Bridging Technology として極めて重要であると国際的に認識されている。

IEA (国際エネルギー機関) による²⁾と、2050 年に CO₂ を半減させるシナリオを成立させるためには、2050 年で

第 2 図 CO₂ の貯留場所
(CCS に関する IPCC 特別報告書¹⁾を加工)

第 3 図 2050 年半減シナリオと CCS
(IEA エネルギー技術見通し 2010)

はベースラインから 48 Gt CO₂ の排出削減が必要であり、対策技術ごとの寄与率は省エネが 36%、再生可能エネルギーが 21%であり、CCS は 19%と 3 番目に大きな必須の技術である(第 3 図)。また、もし CCS 技術が利用できなければ、2050 年までに CO₂ 排出量を 50%削減するという目標を達成するための全体的なコストが 70%増加するだろうということが示されている。したがって CCS は、世界の CO₂ 排出量の相当量の削減を達成するために必要な CO₂ 排出削減術のポートフォリオの重要部分である。

II. CCS のプロジェクト動向

1. 世界の CCS プロジェクト動向

最初に商用状態にある IEA が一貫(integrated)プロジェクトと認定した 5 つのプロジェクトを紹介する。

Sleipner: 1996 年から圧入開始。事業主体は Statoil。北海の沖合 Sleipner ガス田から発生する天然ガスを分離回収し、年間 100 万トンの CO₂ を天然ガス田近傍の Utsira 深部塩水層(深度 1,000 m)に圧入。55 米ドル/t CO₂ の炭素税がかかるため、それより経済的と判断。貯留ポテンシャルは 6,000 億トンあり、天然ガスの採取終了後も CO₂ 受け入れを続ける予定。

In Salah: 2004 年 8 月から圧入開始。事業主体は Sonatrach (アルジェリアの天然ガス会社)、BP、Statoil。貯留層はサハラ砂漠の天然ガス採取サイトの近傍の Krechba 深部塩水層(深度 1,800 m)。圧入量は 100 万トン/年。1,700 万トンの CO₂ を貯留する計画。

Snøhvit: 2008 年圧入開始。ヨーロッパ初の LNG プラントから CO₂ を分離回収。事業主体は Statoil。Barents 海の沖合 Snøhvit ガス田から天然ガスと CO₂ を採取し、Hammerfest 付近 LNG プラントに 160 km の海底パイプラインで輸送し、CO₂ を分離して LNG を製造。分離回収した 70 万トン/年の CO₂ はパイプラインで沖合プラットフォームに戻り、天然ガス層より下の深度 2,600 m の Tubåsen 砂層に圧入。

Rangley: 1986 年から CO₂ を石油増進回収(EOR)用に利用。Rangley Weber Sand Unit はロッキー山脈地域の最大の油田で 1933 年に発見された。ガスは分離されワ

イオミングの LaBarge フィールドからの CO₂とともに再圧入されている。1986年から最大225百万トンの CO₂が貯留層に貯留された。コンピュータシミュレーションによるとほとんどすべてが CO₂溶液や炭酸水素塩として地層水に溶解している。

Weyburn Midale：年間約2.8百万トンの CO₂がノースダコタの the Great Plains Synfuels Plant の石炭ガス化プラントで回収され、320 km のパイプラインで国境を越えてカナダ、サスカチュワン州に輸送され、EOR のために枯渇油田に圧入される。商業プロジェクトであるが、世界の研究者によって圧入された CO₂のモニタリングがなされてきた。IEA Greenhouse Gas R&D Programme の Weyburn-Midale CO₂ Monitoring and Storage Project は CO₂の地下の挙動を科学的に研究しモニタする最初のプロジェクトであった。カナダの石油工学研究センターが運営。現在、第二フェーズ(2007～2011)。CO₂の圧入・貯留のベストプラクティスマニュアルが作成される予定。

商用プロジェクトとしては、さらにオーストラリアのゴルゴンプロジェクトが追加される。実施者は Chevron, Shell, ExxonMobil など。43 Billion ドルの LNG プロジェクトで、ガス田は130～200 km のオフショアにあり、40 trillion のガスを生産。うち、14%が CO₂であるため、年間3.4～4 百万トン(プロジェクト期間で120百万トン)の CO₂を回収する。回収された CO₂はパイプラインでバロー島から2.3 km の塩水層に圧入する。深度2,300 m。圧入には8～9 本の井戸を使用する。さらに圧力調整用の井戸を4 本程度設置の予定である。2014年末に圧入を開始の予定であり、2009年の投資判断以降、2012年までに地質およびダイナミックシミュレーションモデルの精度向上をはかり、圧入井および圧力調整井の計画を作成した。現在、井戸の設計を終了し、井戸の掘削を開始したところである。

世界の CCS の動向は、グローバル CCS インスティテュート(GCCSI)が発表した“The Global Status of CCS:2011”に詳しい⁴⁾。ここでは、プロジェクトを進行度に合わせて、Identify, Evaluate, Define, Execute, Operate, Closure の6つに分類して表示している。最初の Identify はサイトのスクリーニング段階、Evaluate はサイト評価とプレ FS 段階、Define は絞り込まれた候補地における詳細なサイト調査と FS の実施段階、Execute はプロジェクトの実施・圧入設備の建設段階、そして Operate で運転開始である。最後の Closure は圧入が終了し、廃坑となる段階である。この GCCSI のプロジェクトリストを基に、プロジェクトの開始年と CO₂年間処理量を、排出源・回収技術別(第4図)および貯留層・貯留技術別(第5図)に再整理した。このように表示することによって、技術動向の把握が容易となる。

まず、CO₂回収技術であるが、2011年段階で運転中の

プロジェクトの排出源は天然ガス生産が主であり、石炭等からの合成ガス製造や発電所の CCS プロジェクトは2014年からようやくスタートする。このときの発電所からの回収でみると、初期は燃焼後回収(Post)と燃焼前回収(Pre)が均衡しているが、次第に Pre が多くなっていく。酸素燃焼(Oxy)は比較的少ない。合成ガス製造のプロジェクトも含めると、燃焼前回収の占める割合が大きいことがわかる。

次に貯留技術を分析する。貯留 PJ の大部分は EOR である。Sleipner, Snohvit および In Salah といった塩水層貯留の PJ が有名であるが量的には小さい。2014年から開始される合成ガス製造や発電所の CCS プロジェクトも、一部の例外を除き貯留先は EOR である。枯渇ガス田や塩水層への貯留 PJ は2015年頃から出現し、以降、次第にその割合が増えていく。

これは天然ガス生産では生産プロセスの中に CO₂回収が含まれるので新たな回収工程を持つ必要がなく CO₂の処理コストが小さいこと、さらに EOR によって増油収入が得られるため、炭素価格や政府の補助という要素がなくとも自立できる可能性が大きいためである。

2. わが国の動向

CCS の研究に関して、わが国では、1980年代末から基礎研究が開始され、1995年からの2年間の先導研究を経て、1997年から「CO₂の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」が、また2000年から「CO₂地中貯留技術研究開発」、2002年からは「CO₂炭層固定化技術開発」が開始された。このように、わが国では世界に先駆けて、CCS の研究開発がなされてきた。

上記の「CO₂地中貯留技術研究開発」⁴⁾においては、長岡地区の陸域地下深部塩水層への約1万トンの CO₂の圧入実証試験を中心に、モニタリング技術や地中での CO₂の挙動シミュレーションなどの基礎研究、わが国における CO₂貯留層調査と貯留ポテンシャルの算出、および CCS の経済性評価とわが国での CO₂削減技術としての有効性評価などが実施された。

(1) 貯留ポテンシャル

わが国における CO₂貯留ポテンシャルの算出は、1993年に石油資源探査の公開データを基に実施された成果を基に、2005年には新しい坑井データの追加と CO₂貯留ポテンシャルの計算方法の再検討が行われ、貯留量の見直しがなされた。

わが国では、北海道、東北から新潟にかけての日本海側、仙台から房総にかけての太平洋側および山陰から九州北部にかけて貯留層となりうる堆積層が認められる。また、内水面では東京湾、大阪湾、伊勢湾などにも堆積層が認められる。一方、瀬戸内地域では厚い堆積層を欠き、浅い基盤深度に花崗岩類や古い時代の酸性岩類が分布しているため、貯留には適さない。

第4図 CO₂回収プロジェクトの動向 第5図 CO₂地中貯留プロジェクトの動向

2005年度の検討では、わが国の貯留層を明確なクロージャー構造を持つカテゴリー A とそれ以外のカテゴリー B に大別した上で、さらに下記の 5 タイプに分類した。番号は調査データの多寡の程度を示し、数字が小さいほど調査データが豊富であることを示す。これらの堆積層への CO₂貯留ポテンシャルを第 1 表に示す。カテゴリー A で 301 億トン、カテゴリー B を含めると、わが国での CO₂貯留ポテンシャルは 1,461 億トンとなる。

第1表 我が国の CO₂貯留ポテンシャル(出典: RITE CO₂地中貯留技術開発 H17 年度成果報告書より作成)

地質データ		カテゴリー A (背斜構造への貯留)	カテゴリー B (層位トラップなどを有する地質構造への貯留)
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
基礎試験	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	

(註1) 内陸盆地ならびに内湾(瀬戸内海、大阪湾、伊勢湾など)は対象とせず
(註2) 地下 800m 以深、かつ、4000m 以浅が対象

(2) 長岡での CO₂圧入実験

長岡で実施した CO₂圧入実施試験の概要は下記の通りである。また、第 6 図に設備状況を示す。

- ・場所：新潟県長岡市深沢町字岩野原
(帝国石油(株)南長岡鉱山内の岩野原基地)
- ・貯留層：地下 1,100 m の地下深部塩水層
貯留部：砂岩層、厚さ約 60 m、平均浸透率 6.7 md
(md：ミリダルシー、浸透率を表す単位)

第6図 長岡での CO₂圧入実験

シール部：泥岩層、厚さ約140 m

- ・坑井：圧入井1本、観測井3本
- ・圧入期間：2003年7月から約1.5年
- ・CO₂圧入量：10,400 t
- ・坑口温度：34℃
- ・CO₂圧入レート：約20及び40 t-CO₂/日

モニタリングは圧入井から40 m, 60 m, 120 m の距離に観測井を設け、温度・圧力測定、弾性波トモグラフィー、物理検層(掘削された孔井内に測定器を降下させ、地層中の地質情報等を連続的に測定する技術)を実施した。また、観測井間の弾性波トモグラフィーの結果を用いて地中でのCO₂の貯留状況を可視化した。圧入量の増大とともに、CO₂は地層の傾斜方向に沿って拡大する傾向が認められた。また、圧入されたCO₂は、安定してシール層下の貯留層に留まっていることも確認された。

(3) 大規模実証試験

長岡でのCO₂圧入試験を受けて、経済産業省では年間10万 t-CO₂規模のCCS実証試験を計画している。2008年にCCSにフォーカスした調査会社として日本CCS調査株が設立され、大規模実証試験の候補地選定やFSを実施してきた。この結果を基に、経済産業省は2012年2月に、実証試験に必要な施設の設計・建設等を2012年度から2015年度にかけて実施すべく、委託先を募集した。

実施計画書によると、北海道の苫小牧地区で商業運転中の製油所(2ヶ所)の水素製造装置を排出源として、CO₂含有ガスから分離回収した気体CO₂および既分離CO₂を液化した液体CO₂を圧入基地へ輸送し、圧入基地では、これらのCO₂をそれぞれ圧縮、昇圧・加温して統合し、年間15~25万トン程度(排出源の操業状況等による)を2層の貯留層に圧入するとのことである。予算は、4年間で最大470億円が予定されている。

Ⅲ. CCSの課題と今後

プロジェクト動向のところで見たように、2014年からは炭素価格の安定や政府の補助を念頭に発電所等からのCCSプロジェクトが計画されている。しかし、現状ではCCSの実施については、下記に示す様々な課題がある。

第1に、各国において、気候変動に取り組むことが確固たる決定になっていない。このためCO₂削減を支援する政策が十分でない。炭素価格も低迷し、財政危機から国の補助も不透明な状況であり、企業が投資できる状況にない。

第2に、CCSについて、人々が十分理解しているとはいえない。CO₂の地中貯留等における漏洩等の安全や環境リスクについての十分な説明が必要である。

第3は、CO₂の回収を中心にエネルギー消費が大きいしコストが高い。また、排出源と貯留先のマッチングが

十分でない場合には、輸送に相当のコストがかかることを覚悟しなければならない。また、貯留についても、場所によっては事前調査に多大な費用がかかるであろうし、圧入後のモニタリングについても、長期の観測を行うとすると、費用が馬鹿にならない。

最近、英国Longannetプロジェクトの中止が報道されたが、このようなケースは今後も起こり得る。CO₂削減のための世界規模での政策の確立が望まれる。CCSを安定的に進めるためには、十分にタイミングのよい、かつ安定した政策のサポート(インセンティブ、法規制体系など)、コスト、消費エネルギー、リスク低減のための技術開発、早い段階からの、Community Engagementの3つが必要である。

2012年3月の時点では、福島原発事故を受けての原子力の低迷、シェールガスの躍進、再生可能エネルギーの発展の姿が見えている。また、ユーロ危機を初めとして経済情勢は芳しくなく、CCSの展開にブレーキがかかっているように見える。今後のエネルギーや経済の姿を見通すことはなかなか容易ではないが、この中で間違いなのは技術開発である。低コスト、低エネルギー、安全性等についてのCCSの技術開発と実証試験を通じての技術習熟の早急な実施が求められている。

本稿のベースは、経済産業省補助事業「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」、NEDO委託事業「革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト、発電からCO₂貯留までのトータルシステムのフィージビリティスタディ」の中で実施した。経済産業省およびNEDOの関係各位に謝意を表する。

—参考資料—

- 1) IPCC, "Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation", (2011).
- 2) IEA, "Energy Technology Perspective 2010", (2010).
- 3) GCCSI, "The Global Status of CCS: 2011", (2011).
- 4) RITE, 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, (2006).

著者紹介

高木正人(たかぎ・まさと)
地球環境産業技術研究機構
(専門分野/関心分野)環境問題/特にCCS