

CO₂削減の切り札となるか—— CO₂回収・貯留技術

地球温暖化を食い止めるための対策のひとつとして、温室効果ガスのCO₂を地中深くに閉じ込めてしまおうというCO₂回収・貯留(CCS)技術が注目されている。海外ではすでに商業ベースで大型のCCSプロジェクトが稼働している。CCSの概要と、北海道苫小牧で準備が進められている実証プロジェクトについて紹介する。

苫小牧で建設中の実証プラント。奥に見える掘削リグでは垂直深度1,000 mの圧入井を掘削中で、掘削リグの手前に分離・回収設備などが順次建設される予定である(2015年4月撮影) (写真提供:日本CCS調査(株))

CO₂を地中深く閉じ込めるCCS

政府が2015年4月30日に発表した「日本の約束草案要綱(案)」では、温室効果ガスの排出量を2030年までに、2013年に比べ26 %削減すると長期目標を掲げている。一方、東日本大震災以降、火力発電の発電量が増加し、CO₂排出量は増加している。このようなCO₂排出量増加の有効な対策として期待されるのがCCSである。

CCS(Carbon dioxide Capture and Storage)とは、CO₂を回収して、貯留し、大気中への排出を抑えるための技術である。国際エネルギー機関(IEA)では、さまざまなCO₂排出量抑制のシナリオを検討しており、その中で2050年には、CCSによるCO₂排出量削減効果が17 %を占めるシナリオを想定している。現在、日本政府は2020年のCCS実用化を目指し、技術開発やCO₂貯留地の検討など、さまざまな取り組みを進めている。

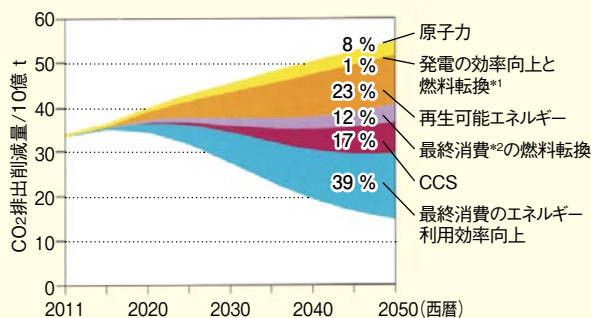
CCSの実施は、分離・回収、輸送、圧入・貯留の3工程に分けることができる。

分離・回収工程とは、火力発電所などで発生したCO₂を排ガスの中から分離・回収する工程で、排出ガスにより異なる方法が選択される。排出されるCO₂濃度は発生源により異なり、例えば最大のCO₂発生源となっている火力発電所では6~14 %であるが、高炉では25 %、石油化学では30~50 %であるといわれている。CO₂濃度に加えて、排出ガスの圧力やSO₂などの不純物も分離・回収方法を選択するうえでは重要なファクターになっている。

CO₂分離・回収技術としては、CO₂を吸収液に溶解させる「化学

吸収法」が従来から化学工場などで大規模に行われてきた。しかし、化学吸収法はCO₂の分離に大量のエネルギーを使用するため、CCSに適用するためには、省エネルギー化が課題になっている。そのほかの分離・回収方法には、固体吸着材にCO₂を吸着させる「吸着法」、「物理吸収法」、CO₂を選択的に透過させる膜を用いる「膜分離法」などがある。公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)やCOURSE50プロジェクトでは、吸収液や固体吸着材、CO₂分離膜など、効率的な分離・回収技術の開発が行われ、CCS全体のコストの約6割を占めるといわれる分離・回収コストの低下を目指している。

■エネルギー関連CO₂排出の技術別削減量(図1)



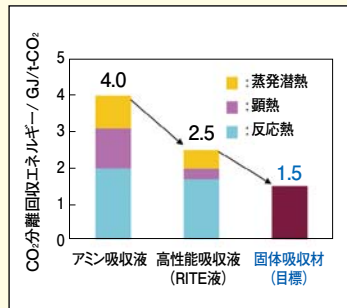
*1 燃料転換:石炭や石油から炭素含有割合が小さい天然ガスなどへの転換。

*2 最終消費:家庭、事務所、工場、輸送など、エネルギーを実際に消費するところ。

(出所:IEA「Technology Roadmap Carbon capture and storage 2013 edition」より作成)

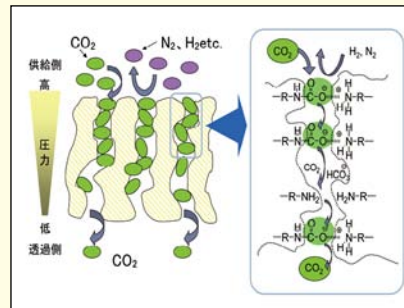
■CCSにおける分離・回収技術の開発例

●高性能固体吸収材の優位性(図2)



化学吸収剤であるアミンを多孔質支持体に担持させた固体吸収材を使用することで、蒸発潜熱が必要な化学吸収法よりも少ないエネルギーでCO₂の分離・回収を実現できる。

●分子ゲート膜の概念図(図3)



CO₂を選択的に吸収する材料を利用することで、CO₂とN₂、H₂などのガスを効率的に分離できる。

(資料提供: 公益財団法人地球環境産業技術研究機構)

CO₂に適した輸送や圧入・貯留技術

分離・回収されたCO₂は圧入基地まで輸送する必要がある。CO₂の輸送には、タンクローリー、パイプライン、タンカーなど複数の方法がある。タンクローリーによる輸送はすでに商業ベースで行われている。また、パイプラインによる輸送は北米などで実績がある輸送方法である。このパイプラインは、「CO₂-EOR (Enhanced Oil Recovery: 石油増進回収法)」と呼ばれる地下の油層に水やCO₂などを輸送、圧入するために用いられ、原油の生産量を増やす技術に用いられている。従来は天然ガス生産にともなって発生する天然のCO₂をEORに用いていたが、近年、北米では火力発電所で回収したCO₂をEORに用いた大規模プロジェクトが実現している。CO₂を輸送するパイプラインの日本国内の敷設に関しては、

法的な整備なども充分でなく、日本で実施する場合には、課題も多い。また、タンカーによる海上輸送は少量の輸送実績があり、環境省がシャトルシップ方式のコストなどの検討を行っている。

CCSの最後の工程は圧入・貯留である。貯留には地中貯留、海洋隔離などがあるが、ここでは地中貯留について説明する。地中貯留に適した地層としては、油田や天然ガス田(枯渇田あるいはEORやEGR*)、石炭層、深部塩水層などが想定されている。油田や天然ガス田はもともと長期間にわたって原油や天然ガスを貯蔵してきた実績がある場所であり、EORについてはすでにCO₂圧入の実績がある。石炭層に圧入する方法はCO₂を石炭に吸着させて安定化させる(炭層固定)方法である。

*EGR: Enhanced Gas Recovery (天然ガス増進回収)

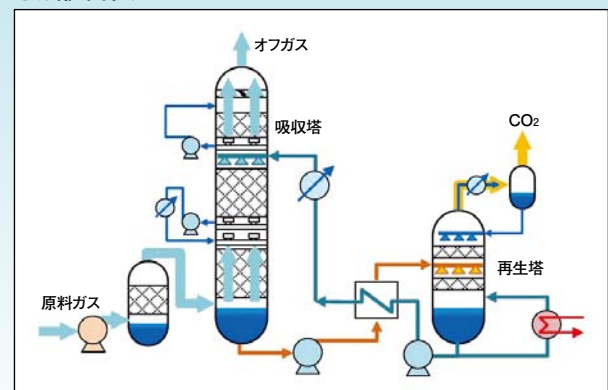
COURSE50プロジェクトの成果を産業分野に活用

CO₂の化学吸収法は、アルカリ性の反応液(アミン吸収液)にCO₂を選択的に吸収させ、その後、反応液を加熱してCO₂を分離・回収する方法である。この加熱工程では多大な熱エネルギーが必要なため、コストダウンが求められていた。

「環境調和型製鉄プロセス技術開発(COURSE50)」の一環として、低コストの化学吸収法が開発されている。ここで開発された高性能な化学吸収液の反応プロセスを工夫し、CO₂回収率を90%以上の高い状態に維持したまま、従来法に比べ熱エネルギー量を6割以下に低減する技術が開発された。この技術は、新日鉄住金エンジニアリング(株)の省エネ型二酸化炭素回収設備「ESCAP®」に生かされ、プロセスの改良なども加えられたうえで、新日鉄住金(株)室蘭製鉄所構内に建設され、2014年11月から稼働している。この設備は、熱源として世界で初めて製鉄所の熱風炉排ガスを活用した化学吸収法としても注目されている。液化炭酸ガスの製造能力は日量120 t

で、エア・ウォーター炭酸(株)がドライアイスの製造に用いている。なお、実用化に先立って腐食試験が行われ、耐酸性鋼やSS400、SUS304などプラントに使用される材料が、CO₂やアミン吸収液の存在下でも問題ないことが確認されている。

●分離・回収プロセスフロー



COURSE50の成果を生かすことで、CO₂濃度約22%の製鉄所の熱風炉ガスから、濃度99.9%のCO₂の連続回収を実現している。

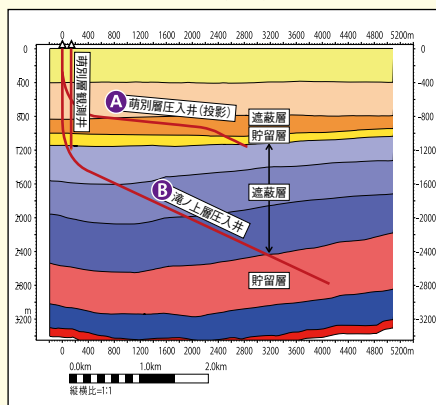
■CCS実証プロジェクトの概要（北海道苫小牧市）

●ガス供給基地、CCSプラントおよびモニタリングシステムの位置(図4)



圧入井のほかに、3つの観測井、ケーブル型地震計のOBC(常設型海底受振ケーブル)、船舶による三次元弾性波探査などによるモニタリングが行われる。

●圧入井付近の断面図(図5)



(資料提供:日本CCS調査(株))

そして、化石燃料をほとんど産出しない日本でCCSを行う場合の適地として期待されているのが、深部塩水層である。深部塩水層は地下深部の塩水を含んだ地層で、粘土層などの不透水層（遮蔽層、キャップロック）に覆われている場合、CO₂を圧入し、貯留することが可能である。

なお、北米などで進められているシェールガスの採掘では、地下に水などを圧入することが地震発生の原因になるとの指摘があり、CCSでも同様の懸念を持たれることもある。しかし、高圧水でシェール層を破壊するシェールガス採掘と異なり、苫小牧での実証試験では、地層を破壊することのないように綿密な計画を立てたうえで、操業中はモニタリングをしっかりと行い、もし、万が一異常があれば、ただちに中止できるよう万全の監視体制を整えて進めていくので、安全性は高いと考えられている。

このようにして地中に圧入・貯留されたCO₂は、地層内である程度拡散した後、地層水に溶解し、さらに千年以上という時間をかけて炭酸塩鉱物などに変化していくと考えられている。

苫小牧で建設が進むCCS実証プラント

日本では、RITEなどにより、CCSの研究開発が進められてきた。2003～2005年にかけて新潟県長岡市岩野原において、地下約1,100 mの地層中に約1万 tのCO₂圧入パイロット試験が実施された。さらに現在でも圧入後のモニタリングを行っている。

現在、北海道苫小牧市では、CCSの実証プロジェクトを行うためのプラント建設が進行中である。設備の建設は2012年度から開始され、2015年4月の時点で、1本目の圧入井の掘削が終了し、地上設備の現地工事が進行中である。プラントは2015年度中に

完成予定で、2016年以降は年間10万 t以上のCO₂圧入を行う予定になっている。圧入は3年間の予定で、モニタリングは圧入期間終了後も2年間にわたって継続される計画だ。

圧入するCO₂は、商業運転中の製油所の水素製造装置のオフガスから分離・回収する。オフガスをCO₂分離・回収設備までパイプラインで輸送し、CO₂分離を行った後、圧縮して、圧入井から貯留層に圧入される。

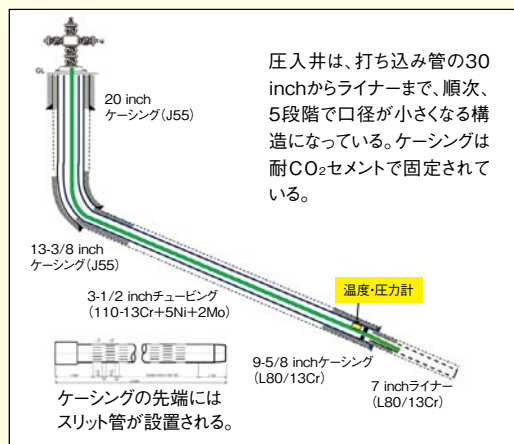
苦小牧プラントでは、化学吸収法が採用されているが、回収溶液は従来型の活性アミンを使用し、省エネルギー型プロセスを採用した。分離・回収されたCO₂は約10 MPaと約23 MPaに昇圧された後、深度の異なる2つの地層に圧入される。圧入井は深度1,100～1,200 mの萌別層と深度2,400～3,000 mの滝ノ上層の2つがあり、深度の異なる貯留層にCO₂を圧入し、CO₂の挙動や環境への影響などをモニタリングしていく(モニタリングの詳細は連携記事を参照)。

地上から斜めに海底下へ掘削する世界初の試み

大規模CCSプロジェクトは、すでに米国を中心としていくつかの実施例がある。その多くはEORによるもので、海底下深部塩水層に圧入している例もあるが、いずれもCO₂をパイプラインで圧入井まで輸送する方式が採用されている。したがって、貯留層が陸上の場合には陸上から、海底下の場合には海上から圧入する方式である。これに対して苫小牧の実証プロジェクトでは、圧入井は地上から斜めに掘削され、海底の深部塩水層を貯留層として利用する、世界初の試みが行われている。この方式では、CO₂の大きな排出源となる火力発電所や製鉄所の多くが臨海部にある日本では、直下

■CCSプラントに使用される鉄鋼製品

● 滝ノ上層圧入井で使用される鋼管の例 (図6)

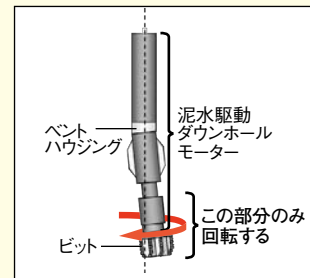


● ケーシング (図7)



ケーシングの端部は互いに接続できるようにねじ加工が施されている。

● ダウンホールモーター (図8)



ベントを有する泥水駆動型ダウンホールモーターを定方位に維持して掘進することで、緩やかに屈曲した坑井の掘削が可能になる。

(資料提供: 日本CCS調査(株))

に貯留するよりも貯留候補地の選択肢が広がるというメリットがあり、世界的にも注目されている。

苫小牧プラントの圧入井の掘削には、ロータリー掘削技術が使われている。これは、先端にビットを取り付けたドリルストリングと呼ばれる一連のパイプを掘削リグから吊り下げ、ドリルストリングの最上部に取り付けられた回転装置でドリルストリングを回転させることで、掘削していく方法である。ビットへの荷重は、ドリルストリングの自重が利用されている。

掘削の際には、掘削流体として加圧された泥水がドリルストリング内部を通して、ビットのノズルから噴出し、ドリルストリングと坑井の隙間を通して地上に戻ってくる。掘削泥水は坑井の保護や堀屑の搬出などの役割を担っている。所定の深度まで掘削を行うと、ドリルストリングを引き上げ、ケーシングと呼ばれる鋼管を挿入する。ケーシングを固定した後に、口径の小さなビットによりさらに掘削を進めていく。したがって、ケーシングは先に行くほど徐々に口径が小さくなる「振出竿」のような構造になっている。ケーシングはセメントにより固定される。通常の油井ではポルトランドセメント(一般的なセメント)が使用されるが、ポルトランドセメントはCO₂によって急激に劣化することが知られており、CCSでは特殊な耐CO₂セメントが用いられる。

また、坑井を傾斜させる際は、ベントを有する泥水駆動ダウンホールモーターを使用する。ドリルストリング全体ではなく、先端部分のビット部分のみを回転させることで、坑井を傾斜させることを可能にしている。

掘削中は、泥水圧力波を利用してデータを伝送するMWD (Measurement While Drilling) により、坑跡(傾斜や水平の坑井の軌跡)を制御している。その精度は掘削長が約5,800 mの滝ノ上層圧入井で、誤差数mである。

ケーシングの設置が完了すると、ケーシング内部にはCO₂を圧入するための小口径のチュービングと呼ばれる鋼管が挿入される。

チュービングの先端から圧入されたCO₂は、穴が開けられたライナーから貯留層に浸透していくことになる。

CO₂に接触する区間については、ケーシング、チュービング、およびライナーには耐CO₂鋼管を採用する必要がある。苫小牧プラントでは、萌別層でケーシング、チュービングとライナーにはAPI (アメリカ石油協会) グレードのJ55、L80/13Cr鋼管が使用され、滝ノ上層のチュービングでは110-13Cr+5Ni+2Moが採用されている。

なお、ケーシングとチュービングの隙間は、NaClやNaBrなどで比重を調整した仕上流体が掘削泥水に換わり充填されている。

世界中で進行するCCSプロジェクト

現在、世界中で10プロジェクト以上のCCS (EORを含む) が実施されており、計画中を含めると50以上のプロジェクトが進行している。計画がすべて実現すれば、2020年には年間1億 t以上のCO₂を貯留できることになる。

日本の貯留ポテンシャルは、2005年の概略調査で、約1,460億 t (国内排出量の100年分相当) が貯留可能と見積もられているが、これは既存の基礎データに基づく推定であるため、2014年より詳細な調査が行われているところである。

今後、CCSが実用化するための課題の1つは低コスト化と省エネルギー化である。高い化学工業技術を有する日本は、吸収液、固体吸着・吸収や膜分離などのCO₂回収技術分野で世界をリードしている。高い鋼管製造技術とともに、今後、市場が拡大されることが予想されるCCSの分野で、日本の技術が世界の温暖化防止対策に貢献していくことが期待される。

●取材協力 公益財団法人地球環境産業技術研究機構、日本CCS調査(株)
●文 石田亮一