



Fuel Gas CO₂ Recovery Utilization, Disposal and Business Development

飯 嶋 正 樹 上 條 孝
高 品 徹 尾 口 彰

弊社は関西電力(株)と共同して、ボイラ等の燃焼排ガスから効率的にCO₂を回収する技術を開発し、既に尿素製造用に実用化している。本稿では、この技術で回収したCO₂の有効利用方法と温暖化対策としてのCO₂の固定化方法を解説し、CO₂の有効利用と隔離が経済的に成り立つ条件を説明する。

1. はじめに

(1) 地球温暖化枠組条約交渉の最近の動向

気候変動枠組条約第7回締約国会議(COP7)は2001年10月29日からモロッコのマラケシュで開催された。COP7以前にアメリカ合衆国の京都議定書からの離脱という事態があったものの、関係国の京都議定書の発効を目指すという合意が得られた。これを受け各国は、京都議定書批准の手続きを進め、我が国も本年6月に批准した。

(2) 各国の動向

英国とオランダは政府主導による温室効果ガス排出権取引制度を開始した。EU全体としても2005年より同様の制度を開始することとなっており、国としての動きはEU諸国が先行している。

アメリカ合衆国は京都議定書離脱を表明した後、ブッシュ大統領は、原油輸入の増大と天然ガス価格の高騰を受け、新エネルギー政策を発表し長期スパンでクリーンコールテクノロジーの開発と、原子力発電の再開を表明した。

日本は、2002年3月に新たな地球温暖化対策推進大綱を決定したが、排出権取引や炭素税の導入は未実施である。しかし、本年6月に京都議定書を批准したことにより、今後急速に温暖化対策が具体化されることを期待する。

2. 温暖化対策としてのCO₂回収・隔離の位置付け

(1) GHGT-5におけるIEAの発表

政治的動きとは別に、温暖化対策技術最新の動向としては2年毎に温室効果ガス削減技術国際会議(GHGT: Green House Gas Technology)が開催され発表されている。この会議の中のトピックスとして2000年オーストラリアケアンズで開催されたGHGT-5においてIEA Dr. Stoke Orchardらは、次のような注目すべき発表をしている⁽¹⁾。

“温暖化対策を実効のあるものにする技術として、CO₂対策量及びコストの両面において、CO₂回収・隔離が不可

欠である。高効率エネルギー利用や、炭素分の少ないエネルギーへの転換及び太陽光、風力等の自然エネルギーの利用等では、量的にもコスト的にも温暖化対策として不十分で、CO₂回収・隔離が将来的に主要な役割を果たすことになるだろう”と指摘し、CO₂回収・隔離技術の開発、大規模実証を行うべきだとしている。

(2) CO₂回収・隔離の各国の動きと大規模対策の可能性

CO₂回収・隔離プロジェクトが実施されている状況をまとめてみると、ノルウェーは1996年からスレプナーガス田において、天然ガスから分離したCO₂の地下帯水層への圧入を行っており、CO₂圧入量は約百万トン/年である。カナダは2001年秋から米国ノースダコタ州の石炭ガス化プラントオフガスCO₂をサスカチュワン州ウエイバーン油田にパイプラインで輸送し、CO₂を用いた原油の増進回収法EOR(Enhanced Oil Recovery)を開始している。

このEORにより、原油回収率の向上だけでなく同時にCO₂の油層への隔離が達成されている。

日本は2002年末より新潟において、合計2万トンのCO₂を帯水層に隔離するパイロットプロジェクトを実施する予定となっている。

このように各国が具体的なCO₂隔離プロジェクトを進めているなかで、EU諸国は北海地域を中心に広く帯水層や油・ガス田が分布しており、CO₂の隔離場所には事欠かない。アメリカ合衆国やカナダも中央部の平原は厚い堆積層があり、CO₂の隔離場所は十分に確保できる状況にある。

一方日本は、火山国であり地震国であるため、堆積層も少なく、また断層により細かく分断されて十分なCO₂隔離場所を確保することは難しいと考えられている。それでも地球環境産業技術開発機構(RITE)を中心にCO₂隔離場所の調査が現在行われ、日本におけるCO₂隔離の可能性拡大に努力が払われている。

(3) エネルギー(石油、天然ガス)生産のためのCO₂有効利用 CO₂を用いてエネルギーを生産する手法として最も広く

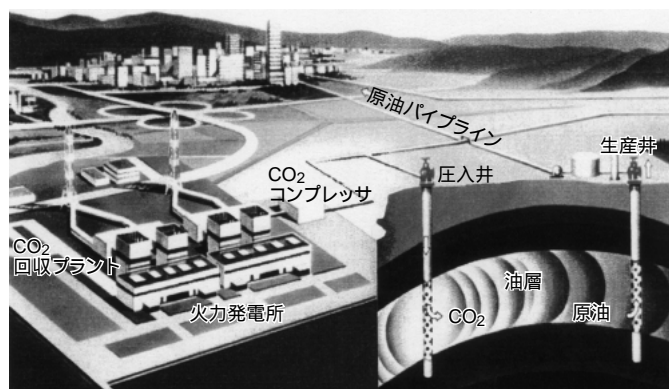


図1 排煙脱炭 EOR 発電所排ガスからCO₂を回収しEORを行う概念。

用いられているのは、原油増進回収法（EOR）である。CO₂は油層内においてミッシブル状態（CO₂と原油が超臨界圧下において自由に混ざり合う状態）を形成し、原油の粘度を著しく下げ、原油の油層内における流動性を高めて、原油回収率が飛躍的に向上する。

この手法により米国テキサス州の西部を中心に現在200 000バレル/日の原油が生産されている⁽²⁾。

もし大量のCO₂が安価に油田に供給できるならば、CO₂ EORは広く行われ原油の回収率向上に大いに寄与すると言われている。発電所等の大規模なCO₂排出源と油田とが隣接する場合、ボイラ等のCO₂排出源からCO₂を回収し安価に大量のCO₂を油田に供給することができる。弊社は図1に示す排煙脱炭EORのコンセプトを基に提案し、商談を進めている。

CO₂はEORに用いる外に、採掘困難な深部炭層に圧入し、石炭に吸着しているメタンガスを有効に回収（ECBMR：Enhanced Coal Bed Methan Recovery）できるとされており、現在米国ニューメキシコ/コロラド両州のSan Juan Basinにおいてパイロットテストが行われている。石炭層は油田よりも世界的に広く分布しているため、CO₂の隔離場所としては油田よりも可能性が高いとされている。

このようにCO₂は原油や天然ガスの回収に有効に用いることができるため、温暖化対策を加味、原油や天然ガスの回収に最大限利用されるべきである。

3. CO₂回収技術と弊社の排煙脱炭技術

(1) CO₂回収技術（天然ガス、合成ガス、燃焼排ガス）

CO₂の分離回収は天然ガスや合成ガスの分野において広く行われており、既に数十年の歴史がある。天然ガス中に含まれるCO₂は、それ自体役に立たない上、天然ガスのカロリーを低下させたり、また、LNGプラントやエタン回収プラントにおいてCO₂がドライアイスとなって固化するトラブルをもたらす。そこでこれらのトラブルを防止するためにCO₂が除去されている。

合成ガスからのCO₂分離回収としては、天然ガスやナフサを改質して水素を製造するプラントにおいては、合成ガスとして水素と同時に生成されるCOをCO₂に変換した

後、CO₂が分離されている。またアンモニア/尿素プラントにおいては、水素、窒素、CO₂混合ガスからCO₂が分離され、水素、窒素から合成されたアンモニアと分離されたCO₂を用いて尿素が製造されている。

一方、燃焼排ガスからCO₂を分離回収するニーズは今まであまり多くなく、食品やドライアイス製造用にわずかに行われていたにすぎなかった。天然ガスや合成ガスからCO₂を分離する場合、ガスが高圧であることからCO₂の分離は比較的容易であるが、燃焼排ガスからCO₂を分離回収する場合、排ガスの圧力レベルが非常に低いことと、また排ガス中に酸素やSO_x、NO_x、パイジンを含むことから、技術的にも困難な点が多い。

(2) 固定排出源からCO₂回収を行う必要性

世の中の化石燃料（石油、天然ガス、石炭）は、そのほとんどが、ボイラ、ガスタービンや内燃機関の燃料に使用され、燃焼排ガスとして大気中にCO₂を放出している。この結果、大気中のCO₂濃度が上昇して地球の温暖化を引き起こしていると言われており、大気に放出されているCO₂を削減しない限り温暖化防止にはならない。しかしながら、車や船舶のような移動体からCO₂を回収し、隔離することは困難な点が多く、おのずとボイラやガスタービンのような固定CO₂排出源からCO₂を回収する方が容易である。

(3) 排ガスからのCO₂回収技術の特徴と優位性

関西電力（株）と弊社は共同して1990年から温暖化対策を目的に、発電所等の排ガスからCO₂を回収する研究開発を開始した。まず従来から用いられている“モノエタノールアミン”（MEA）吸収液をベースにした当時最も省エネルギーのCO₂回収技術とされていた技術の評価を行った。この技術はダウ社が開発し、後にフロアードニエル社が権利を取得したプロセスである。このMEAをベースにした技術は、CO₂回収に必要なエネルギーが大きいこと、吸収液の劣化が早く損失が大きいこと等の問題があり、温暖化対策用に大規模プラントに用いる場合問題があることが判明した。関西電力（株）と弊社は基礎研究から開始し、新しい吸収液の探索を行った。結果、省エネルギーでかつ劣化と損失が少ない新吸収液を開発し、既にマレーシアにおいて尿素製造用に実用化している。

関西電力（株）と弊社が共同開発した点は、この新しい吸収液だけでなく、CO₂回収装置としての新たな工夫、改良を加えたことにある。また装置として排ガス系の圧力損失を大巾に低減した新充填材と、吸収液の損失を大巾に削減する工夫がなされている。

さらに発電所とCO₂回収システムにおいてエネルギーを最も有効に利用する蒸気システムを開発している。

弊社は従来技術と比べて大いに優位性をもった排ガスからのCO₂回収プラントを核に事業展開を進めている。

4. CO₂有効利用技術

CO₂の有効利用技術を分類すると次のようになる。

(1) 一般的用途

CO₂として一般に我々が目にするのは、炭酸飲料やドラ

アイスとしてである。これらCO₂は国内では液化炭酸として流通しており国内の消費量は約80万トン/年である。CO₂の一般的用途としては次のものがある。

- 溶接用
- 冷却用
- ドライアイス
- 炭酸飲料用（コーラ、ビール）

(2) 化学的利用

化学的なCO₂の利用方法として次のものがある。

- 尿素製造
- メタノール製造
- DME製造
- GTL製造
- ソーダ灰、重ソー製造
- オキシガス、CO製造

① 尿素製造

現在尿素は主に安価な天然ガスを原料にアンモニアを合成し、その時のオフガスのCO₂とアンモニアから尿素が合成されている。しかしながら天然ガスを原料として尿素を合成する場合、アンモニアとオフガスのCO₂のバランスからCO₂が不足する。このため、天然ガスから水素とCOを製造する改質炉（スチームリフォーマ）の排ガスからCO₂を回収し、尿素合成用に供給することにより、アンモニアとCO₂のバランスを調整し、尿素的生産量最大化が可能となる。弊社がマレーシアペトロナスファティライザー社に納入したプラントはこの目的に合致したものである。

② メタノール製造

メタノールも現在主に天然ガスを原料に製造されている。天然ガスをスチームリフォーミングして水素とCOを合成すると水素とCOとの比率は3：1となる。一方、メタノール合成のためには水素とCO比率は2：1が最適であり、スチームリフォーマ排ガスからCO₂を回収し、炭素分のCO₂をプロセス内に添加することによりメタノールの生産量を最大化することができる。現在サウジアラビアに弊社が納入したメタノールプラントの生産能力向上のため、CO₂を添加する計画が進んでいる。

図2は天然ガスを原料としてメタノールを生産するプロセスにおいて、スチームリフォーマ排ガスからCO₂を回収し水素とCOの比率をメタノール合成に最適化し、メタノールの生産量を増大させるシステムを示す。

③ DME（ディメチルエーテル）製造

DMEはメタノール経由合成される。プロセスでは、前記メタノール製造と同様のシステムが用いられる。

④ GTL製造

GTLとはGas to Liquidの略で一般には天然ガスから灯油、軽油をフィッシャー・トロプシュ法（FT法）により合成する方法である。このGTL合成にはメタノールと同様に水素とCOの比率を2：1に調整する必要があり、メタノール生産と同様にスチームリフォーマ排ガスからCO₂を回収しプロセス系内に投入することにより水素とCO₂の比率調整が可能となる。

一方、全体システムとしては、FT合成系からの反応に寄与しないCO₂をスチームリフォーマ前流にリサイ

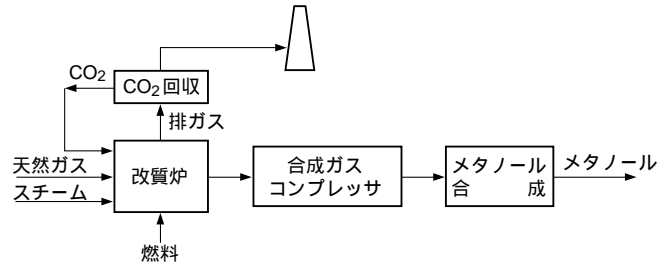


図2 CO₂回収メタノール増産 メタノールプラントにおいて排ガスからのCO₂を回収しメタノールを増産するシステム。

クルする方法を用いる。

(3) EORとしての利用

原油の回収率向上方法として、CO₂を用いるEORは理論上、非常に高い原油回収率を可能にする採油法である。CO₂は臨界圧力・温度共に低いこと、比重が大きいこと、油に対する溶解度も大きいといった有利な特性を有している。油層中の原油を低圧でミッシブル状態にし、原油の流動性を飛躍的に高めることにより、高い原油回収率と経済性を可能にしている。

CO₂ EORは1970年代から米国を中心に商業化されており、現在毎日約20万バレルの原油増産が行われている。米国以外でもカナダやトルコ、ハンガリーなどで実施されている。実際CO₂の用途別消費量では、EOR用が最も大きい。

米国では、CO₂はCO₂ガス田からパイプラインで供給されているが、弊社開発の排煙脱炭装置を利用すれば、発電所等の排ガスからCO₂を回収し、比較的近隣の油田地帯に供給することでCO₂ EORが可能となる。先の図1にこの概念を示した。CO₂ EORが経済的に成り立つには、CO₂注入による原油増産量が大きいこと、CO₂を安価で大量に供給できることが条件になるが、弊社開発の排煙脱炭装置を油田地帯に近い発電所に設置すれば経済性が高いことがフィジビリティスタディーによって確認されている。この手法は、原油回収とともにCO₂排出削減によって温暖化対策に寄与することができる。

(4) コールベッドメタンの回収としての利用

コールベッドメタンの回収とCO₂隔離対策としての燃焼排ガスからCO₂を回収するシステムについては、先の2章(3)項と図2に解説している。

5. CO₂隔離方法

CO₂の隔離方法としては地中隔離と海洋隔離が広く研究され、地中隔離は既にコマーシャルプロジェクトが実施されている。

CO₂の地中隔離としては前記のEORと、炭層隔離とともに行われるコールベッドメタンの回収法があるが、単にCO₂の隔離のみを目的とした場合、帯水層隔離、廃油田、廃ガス田への隔離法がある。

地下の帯水層は、地球上で堆積層が存在する所には広く分布している。日本は火山国であり地震国であるため、帯水層も少なくまた構造も小さいが、それでもCO₂隔離の可能性を

求め調査が行われている。

地中の空げきのある地層はその空げきを水（主に塩水）が入っているが、ここにCO₂を圧入し水を押し下げ、CO₂を隔離することができる。図3はノルウェーにおいて既に実施されているCO₂隔離の概念図である。日本の場合、ノルウェーと同様に大陸棚に分布する帯水層へのCO₂隔離が最も現実的と考えられている⁽³⁾。

帯水層以外にも既に生産を終えた廃油田、廃ガス田へのCO₂隔離も可能である。廃油田、廃ガス田は、太古の昔からその上部に油、ガスの漏れない地質構造があったために油田、ガス田ができたものであり、ここへのCO₂圧入はCO₂の漏れに対する安全性が確認された場所と考えられている。

6. CO₂排出権とCO₂回収・隔離コスト

(1) CO₂排出権価格の状況

CO₂排出権取引は、本年4月から英国においてスタートした。EU諸国全体として、2005年からCO₂排出権取引を開始すべく、法整備を進めている。2005年からEU全体でCO₂排出権取引が開始されると、CO₂排出権取引の相場は20～33ユーロ/トンCO₂程度になると予想されている。一方所定のCO₂排出枠を越えた場合の罰金は50ユーロ/トンCO₂からスタートし、将来100ユーロ/トンCO₂まで引き上げる計画とされている⁽⁴⁾。

(2) CO₂回収及び圧縮コスト

弊社は排ガスからのCO₂回収装置によるCO₂回収と、回収したCO₂を供給するための圧縮及び脱水のコストの削減に努めている。

排ガスが大量にあり大型のCO₂回収装置が設置可能でかつ、燃料が安価な場所では、CO₂回収・圧縮コストを20 USドル/トンCO₂程度まで削減できると予想している。一方、回収し、圧縮したCO₂の輸送、圧入隔離コストはCO₂排出源からCO₂隔離場所の距離と隔離場所の状況によって大きく左右されるが、将来的に5 USドル/トンCO₂程度で可能となると予想しており、CO₂回収・隔離コストとしては25 USドル/トンCO₂程度で可能となると予想

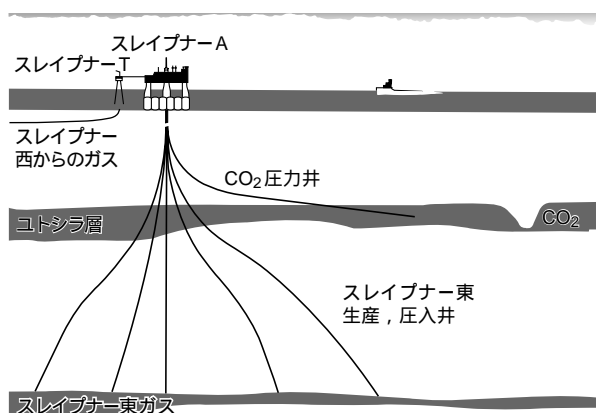


図3 ノルウェーにおけるCO₂処分 ノルウェーにおいて天然ガスからの分離されたCO₂を地下帯水層に処分されている。

している。

(3) 経済性が成り立つ条件

排ガスからのCO₂回収装置の経済性が成り立つ条件としては、まずCO₂が有効に利用可能でしかもCO₂を使用する客先が十分に利益が上がる必要がある。4章にて解説したCO₂有効利用技術を中心に事業としての展開を進めている。

CO₂回収コストとCO₂の価格は場所によって千差万別であるが、国内のようにエネルギーコストが高かつCO₂を小容量しか回収できない所では、約1万円/トンCO₂前後となる。

一方、産油国のようにエネルギーコストが安かつ大規模にCO₂回収する場合、CO₂回収・圧縮を含めたコストとしても20 USドル/トンCO₂程度が可能である。

将来CO₂排出権市場が世界的にでき上がり、CO₂排出権価格が25 USドル/トンCO₂以上になるとCO₂の隔離だけを目的としたプロジェクトの経済性が成り立つことになり、温暖化対策としてCO₂回収・隔離技術が広く用いられると予想される。

7. ま と め

6章において解説したように排ガスからのCO₂回収技術はCO₂が有効に利用される分野（化学用途やEOR）において現在でも経済性が成り立っている。

弊社はこのような分野において排煙脱炭装置の利用拡大を進めるとともに、最終目標として温暖化対策を目的とする発電所等の排ガスからCO₂を回収し隔離するプロジェクトを早期に実現すべく努力していきたいと考えている。

参考文献

- (1) JA EDMONDS, P FREUND AND JJ DOOLEY
Pacific Northwest National Laboratory
901 D St. SW, Suite 900, Washington, DC 20024
IEA Greenhouse Gas R&D Programme
Stoke Orchard, Cheltenham, Gloucestershire, GL52 4RZ,
United Kingdom
THE ROLE OF CARGON MANAGEMENT
TECHNOLOGIES IN ADDRESSING ATMOSPHERIC
STABILIZATION OF GREENHOUSE GASES
- (2) Special Report Enhanced Oil Recovery p.43, Oil & Gas
Journal April 15, 2002
- (3) Burlington Allison(USA San Juan basin)の概念図による。
- (4) Stat Oil社資料による。
- (5) 日経新聞2001年11月19日記事による。



飯嶋正樹
機械事業本部
プラント事業センター
企画・開発グループ
主席



上條孝
機械事業本部
プラント事業センター
ガス・石油化学部プロ
セス設計グループ



高品徹
技術本部
広島研究所
化学プラント研究推
進室主席



尾口彰
機械事業本部
化学プラント部
第1グループ主席