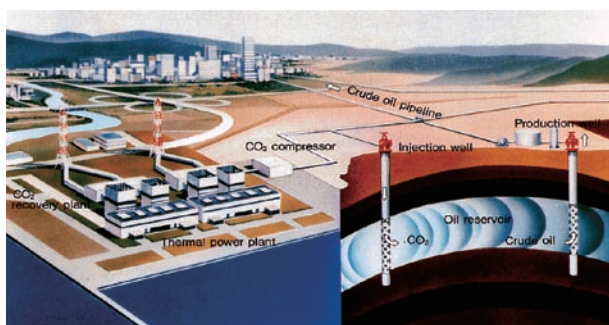


特 集 論 文

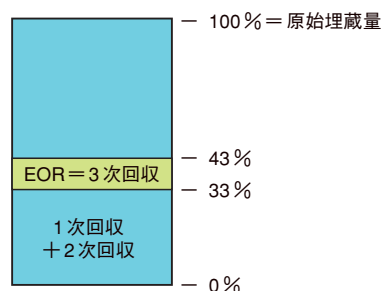
地球温暖化防止とピークオイル緩和に有効な CO₂ 回収技術とその EOR への適用Flue Gas CO₂ Recovery Technology and Its Application to EOR which is Effective for Global Warming Issue and Peak Oil Issue飯 嶋 正 樹^{*1}
Masaki Iijima高 品 徹^{*2}
Toru Takashina岩 崎 省 二 郎^{*3}
Shojiro Iwasaki沖 野 進^{*4}
Susumu Okino

1. は じ め に

原油価格は2006年半ばに78 US\$ / バレルの最高値をつけて以降、やや下落したものの60 US\$ / バレル近辺で落ち着きを取り戻している。60 US\$ / バレルという価格は、若干下がったとは言え1990年代の価格レベル（15～18 US\$ / バレル）と比べると3倍以上と、かなり高値と言わざるを得ない。

一方、中国、インドを始めとするBRICs諸国を中心にエネルギー消費量が急拡大を続けており、CO₂排出量を削減するには程遠い状況が続いている。CO₂排出削減による温暖化対策は本当に可能だろうか。本稿では、燃焼排ガスからCO₂を回収し、回収したCO₂を油田に圧入する事により原油の回収率を飛躍的^(注1)に高めるCO₂ EOR (Enhanced Oil Recovery) と温暖化対策としてのCO₂回収処分 (Carbon Capture and Sequestration = CCS) について述べ、当社の開発の経緯と、今後のCCS技術の適用及びその将来像について我々の考え方をまとめた。

注1 一般に、通常の原油生産（1次回収+2次回収）では原始埋蔵量の約33%が回収され、EORにより、回収率をさらに10%向上できると言われている（図参照）。



原始埋蔵量と生産量
原始埋蔵量とは生産開始以前に存在していた油層内原油の総量。

2. 世界のエネルギーと温暖化対策としてのニーズ

3年前に技報“石油資源とCO₂排出抑制の展望”と題する論文の中でDr. C. J. Campbellのピークオイル論^(注2)及びASPO (The Association for the Study of Peak Oil and Gas) による原油、天然ガスの生産予測について紹介したが、3年を経過した今ではこのピークオイルに関する論議が、米国を中心に行われていることが特筆される点である。3年前はヨーロッパを中心にピークオイルが論じられていたが、1年半ほど前から米国のMr. Matthew R. Simmons (エネルギープロジェクト投資銀行の会長) を中心にピークオイルが論じられ、約1年前には米国議会の公聴会でもこのピークオイルが討議され、米国としてどのような手を打つべきか議論されている。

注2 ピークオイル論：世界の原油生産量が数年以内にピークを迎え、その後、減退するという理論。

Mr. Matthew R. Simmonsは現在まさにピークオイルの危機がせまっており、直ちにあらゆる対策を打つべきと主張している⁽¹⁾。

ピークオイル論の根拠として、現在その需給が逼迫していることから明らかとなりつつあるが、Dr. C. J. Campbellらによると1981年を境に発見される原油よりも消費される原油の方が多くなり、既に25年間を経過している。またMr. Matthew R. Simmonsによると世界の主要大油田は次のように減退期に入っている⁽¹⁾。

現生産量

● ガワール油田 (サウジアラビア)

4.5 百万バレル / 日…恐らく減退中

● カンタレル油田 (メキシコ)

2.0 百万バレル / 日…減退中

*1 プラント・交通システム事業センター CO₂・EOR グループ長

*2 技術本部広島研究所化学プラント研究室長 工博

*3 プラント・交通システム事業センター CO₂・EOR グループ主席

*4 技術本部広島研究所化学プラント研究室主席

●ブルガン油田 (クウェート)

1.7 百万バレル／日…恐らく減退中

●大慶油田 (中国)

1.0 百万バレル／日…恐らく減退中

また、かつて大量の原油を生産していた大油田も現在は大幅に減退している。

●サマトロール (ロシア)

1982 年 3.0 百万バレル／日

2002 年 0.3 百万バレル／日

●ロマシュキノ (ロシア)

1973 年 1.6 百万バレル／日

1997 年 0.3 百万バレル／日

●ブルードベイ (米国アラスカ)

1987 年 1.5 百万バレル／日

2001 年 0.4 百万バレル／日

また、北海油田は 1999 年に約 6.0 百万バレル／日の原油を生産したが、2005 年には 4.8 百万バレル／日まで減退している。

このように主要油田が減退する中、現在西アフリカやブラジルの深海油田が生産を開始しており、ASPO (The Association for the Study of Oil and Gas) によると世界全体としては 2010 年ごろに原油生産がピークを迎えると予測している。このような状況にもかかわらず、中国、インドを中心とする BRICs 諸国を中心に石油消費が急増しており、Mr. Matthew R. Simmons は早急に手を打たないと、世界中が混乱に陥るとしている⁽¹⁾。

Mr. Matthew R. Simmons によるとプラン-Cが“石油にかわり得る技術”とするとプラン-Bは“プラン-Cへの中継ぎの技術”であり、プラン-Bとして次のような対策を速やかに打つ必要があるとしている⁽²⁾。

(1) 石油は主に輸送用燃料に用いられており、輸送用燃料の消費削減手段として

●ハイブリッド車

●燃費向上

●車から鉄道、船による輸送への転換

(水素は化石燃料から作られるものであり、また経済効率が極めて悪い)

(2) 石油代替又は石油の回収率の最大化技術として

●重質油 (オイルサンドを含む) の生産

●石油増進回収法 (Enhanced Oil Recovery = EOR)

●Gas To Liquid

●Coal to Liquid

●Oil Shale

プラン-Bについては上記のような手段が考えられるが、プラン-C (石油に替わりうるエネルギー) については現時点で全く見通しがついていないのが実情

である。

一方地球温暖化問題については、最近、アル・ゴア前米副大統領が世界各地を廻り温暖化対策への取組みの重要性を主張している。このアル・ゴア前副大統領の主張について最近映画化 (タイトル: An Inconvenient Truth 邦題: 不都合な真実) され反響を呼んでいるが、この映画の中でアル・ゴア前大統領は温暖化に対し真正面から取り組むためには何よりも“Political Will”が必要と訴えている。

この温暖化対策として、2005 年末には IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 特別報告書“CO₂ Capture and Sequestration = CCS”が発表され、欧米を中心に CO₂ 回収・処分 (隔離) の重要性が主張され、CCS なくして温暖化対策は不可能ではないかとの見方が示されている。この CCS の中で CO₂ を有効利用できる手法が CO₂ による Enhanced Oil Recovery = EOR であり、この手法は同時に Peak Oil を緩和する有力な手段ともなりうるもので、我々が最も注目している所である。

3. CO₂ 回収技術に求められるもの

ここでは EOR と温暖化対策としての CCS のために CO₂ 回収技術に求められている課題について述べる。

IPCC の CCS 特別報告書によると、現在大気に排出されている CO₂ の約 98 %が化石燃料 (石油、天然ガス、石炭) の燃焼に起因している。このため、燃焼排ガスからの CO₂ 回収は、既存のインフラを変更することなく利用できるという点で最も優先度が高い。次に大気に排出されている CO₂ を回収し処分 (隔離) 又は利用するために圧縮するエネルギーの低減が求められる。CO₂ 回収には一般に多量の熱エネルギーを要する。一方で CO₂ 圧縮には多量の動力を要する。このため CO₂ 回収と圧縮双方のエネルギーの最小化が、CCS における最も重要な点である。

CO₂ 回収コスト削減については、エネルギー消費の削減とともに設備費の削減が求められる。現在米国における CO₂ EOR 用の CO₂ の価格は原油価格が高騰したため、50 US\$/Ton CO₂ 程度と言われているが、CCS においてもこの 50 US\$/Ton CO₂ は一つのターゲットとなる CO₂ 回収・圧縮価格である。

CO₂ 回収技術は温暖化対策という環境対策技術であり当然のことながら環境への影響を最小限にとどめることが要求される。このためには CO₂ 回収装置からの排出物や、廃棄物をいかに少なくするかが重要となる。

4. CO₂ 回収技術開発の経緯

当社は 1990 年から関西電力 (株) と共同して、発電

所などの排ガスから CO₂ を回収する技術の開発に着手した。開発の目的として我々は温暖化対策を掲げていたが、一方で当社は当時から既にニーズのあった化学・一般用途や、先々の原油供給のタイト化を予想しての CO₂ EOR の用途を念頭におき開発に着手した。

1990 年代は原油価格が 20 US\$ / バレル以下で推移したため、CO₂ 回収 EOR のニーズはほとんど出現せず、一方で温暖化対策としての CO₂ 回収のニーズはかなり先と考えられたため、1990 年代前半は基礎技術の開発と特許出願による開発技術の権利化に主眼をおき研究開発を実施した。

研究開発の当初、我々は従来用いられていたモノエタノールアミン (MEA) を用いた技術の実証を試みた。MEA は数十年も前から CO₂ 回収用の最も基礎的な吸収液として長く用いられてきた。MEA は分子量が 62 と小さいため、おのずと 1 kg 当たりの CO₂ 吸収量が高くなるメリットがあり、大気圧下の CO₂ 分圧の低い範囲では MEA を越える性能を得る事は難しいと考えられていた。我々が MEA 吸収液によりボイラ排ガスからの CO₂ 回収を試験したところ、下記のような数々の問題点が判明した。

- (1) 吸収液再生のためのエネルギーが大きい。
- (2) アミンの損失が大きい。
- (3) アミンの劣化が大きく、リクレーミング操作が頻繁となり、かつ、廃棄物が多い。

また、吸収液だけでなくシステムとしての問題点が数々見いだされた。

このような課題を解決するため、我々は基礎研究に立ち帰り、新しい吸収液、装置、システムの開発への取組を開始した。

4. 1 吸収液の開発

我々はアミン系物質の立体障害の度合いに着目し、試験研究の候補となる物質を選定した。従来から用いられていた MEA は立体障害の度合いが低く、アミノ基と CO₂ の反応性は早いですが、一度反応すると離れにくい性質がある。一方立体障害の度合いが大きい程、アミノ基と CO₂ の反応性は遅いものの CO₂ は離れやすい。このような性質を持った物質の中から、排ガスからの CO₂ 回収に適した物質を選定すべく試験を開始した。

アミン系物質を物性、分子量で制限を設け、入手可能なものを順次試験することで、アミン系物質の性質が徐々に明らかとなった。

基礎試験では、CO₂ 吸収量、反応熱、反応スピード、腐食性について試験し、有望と思われる物質は、ベンチ試験機で吸収・再生の連続試験を行い評価した。

ベンチ試験で選ばれた吸収液を関西電力(株)南港発

電所に設備したパイロットプラントで、消費エネルギー、アミンの損失その他運転上の課題を評価する試験を実施した結果、KS-1、KS-2、KS-3 吸収液が省エネ性能も高く、実用に供することが可能と判断した。この中で吸収液のコスト面などから KS-1 を商用化することを決定した。

4. 2 装置の開発

吸収液の開発と平行して、装置の開発にも取り組んだ。まず、吸収液に適した装置として吸収部、再生部の充填材の最適化と、熱交換器の最適化に取り組んだ。これら業務は開発というよりは、通常的设计業務の延長線上の業務であるとも言える。次に排ガス系の圧力損失を大幅に削減するために、低圧損型の充填材の開発を行った。圧力損失を極端に低減した KP-1 充填材を開発し、関西電力(株)南港発電所パイロットプラントにおいて低圧損と高 CO₂ 吸収性能を実証した。この KP-1 は現在市販の充填材より高価な為、まだ商用化されていない。

次に発電と CO₂ 回収システムとしての熱エネルギーの有効利用に取り組み、発電システムにおいて復水器に捨てている熱を CO₂ 回収システムに利用すると共に、CO₂ 回収システムの廃熱によってボイラ給水を予熱するシステムを確立した。

一方で、CO₂ 回収システムにおいて系内の熱を有効活用することにより再生のための熱エネルギーを大幅に削減する省エネシステムを開発し、南港発電所パイロットプラントにおいて実証した。

5. CO₂ 回収技術の適用としての将来像

燃焼排ガスからの CO₂ 回収技術は下記の適用先が考えられる。

- 炭酸飲料、ドライアイスなどの一般用途
- 尿素、メタノール、オキソガスなどの化学用途
- CO₂ を用いた石油増進回収法 (EOR)
- CO₂ を用いた炭層メタン増進回収法 (ECBMR : Enhanced Coal Bed Methane Recovery)
- CO₂ の帯水層、廃油田、廃ガス田への処分

上記の適用先の中で回収された CO₂ を有効に用いるのが最も好ましい方法と考えられる。一般用途や化学用途は CO₂ が再放出されるため温暖化対策とならず、温暖化対策の手段として考えると、EOR、ECBMR 及び帯水層や廃油田、廃ガス田への処分方法があるが、この中で EOR、ECBMR は CO₂ の処分と同時に原油や天然ガスが回収できるメリットがある。

IPCC による CO₂ 回収・処分特別報告書⁽³⁾ 及び (財) エンジニアリング振興協会報告書⁽⁴⁾ によると、世界

の CO₂ 処分可能量として下記の値が示されている。

- EOR 650 億トン-CO₂
- ECBMR 150 ~ 2 000 億トン-CO₂
- 廃油田, 廃ガス田 6 750 ~ 9 000 億トン-CO₂
- 帯水層 10 000 ~ 100 000 億トン-CO₂

EOE については(財)エンジニアリング振興協会の試算では最も効率よく (CO₂ を少なく) 圧入するケースとして算出している。

全世界の大気中への年間 CO₂ 排出量が約 230 億トンであるので、上記の値は CO₂ の地中処分量としては十分な値だが、EOE によって CO₂ を有効に利用する場合でも約 3 年分の排出量に相当する CO₂ が処分可能である。問題は、EOE が実施可能な油田地帯、特に中東で中東及びその他地域の CO₂ 排出源から CO₂ を回収し供給できるかが問題となる。中東油田の原始埋蔵量は 2 兆バレル程度と予想され、この内の約 15 % が CO₂ EOE により回収されると仮定すると 3 000 億バレルの原油が回収されることになる。このために必要な CO₂ は 800 億トン程度と推算され、この CO₂ を今後 50 年で供給すると仮定すると 16 億トン/年の CO₂ が必要となる。現在中東地域の発電所や大型工場からの CO₂ 排出量は 2 ~ 4 億トン/年程度と推計され、今後中東地域の CO₂ 排出量が増加しても、十分な CO₂ は確保されないこととなる。もし中東地区のあらゆる油田において CO₂ EOE を実施するとなると CO₂ をほかの地域例えば日本、アジア、欧州などで回収しパイプラインや液体 CO₂ タンカーで輸送することが必要となる。

(財)エンジニアリング振興協会が、日本の発電所にて CO₂ を回収し中東に輸送するコストを試算したところ、120 US ドル/トン CO₂ の費用がかかるとの結果が得られた。

もしこの CO₂ を油田に圧入し EOE を行った場合の EOE のコストを算出すると CO₂ コストとして約 30 US ドル/バレルとの値となる。もし現在の油価 60 US ドル/バレルが今後も続くと仮定すると CO₂ を日本で回収し中東に輸送して EOE を行っても十分に経済性が成立する (cf. 従来、数ドル/バレルの生産コストで 20 ドル/バレル程度の油価で成立していた)。

以上より、大気中に排出されている CO₂ を回収する場合、回収された CO₂ は、温暖化対策の一手段としてのみならず、全世界で EOE に用いるのが有効であり、CO₂ を油田地帯に輸送するシステムが重要な課題となるだろう。CO₂ の液化輸送は、LNG と比べると温度的にも比較的容易であり技術的問題は特に考えられない。重要なのは、経済的にこのようなシステムが成立する仕組みを構築する事が必要である。

6. ま と め

温暖化問題は、化石燃料である石油、天然ガス、石炭の使用により引き起こされたものであるが、一方で CO₂ により石油を最大限回収できる技術もあり、温暖化対策として CCS を用いる場合、EOE のように大きな問題となっている原油の安定的供給に貢献することに利用することが有効である。

ただし、これを地球温暖化対策として推進するためには政治主導での取り組みが必要である。

当社としては、当社の CO₂ 回収技術がこの分野に貢献できるように技術的にも事業化についても進歩するように努力していきたい。

参 考 文 献

- (1) Matthew R. Simmons, Qua Vadis Our Energy Future? Harvard Business School - Energy Symposium October 24 (2006)
- (2) Matthew R. Simmons, Plan B: What Happens After Peak Oil? Society of Exploration Geologists TLE Forum, Denver, Colorado, October 11 (2004)
- (3) Bert Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos, Leo Meyer IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage
- (4) 平成 2 年度調査報告書、地球環境を考慮した二酸化炭素の有効利用技術に関する調査 (I)



飯嶋正樹



高品徹



岩崎省二郎



沖野進