



# 温暖化対策は CO<sub>2</sub> 地中処理が最適

## 田崎 義行

TAZAKI, Yoshiyuki 関東天然瓦斯開発(株)茂原鉱業所。1976年東京大学工学部卒業。同年関東天然瓦斯開発(株)入社、1983年石油公団、石油開発技術センターへ出向、1985年復職。趣味：囲碁。石油、天然ガスの開発生産を仕事とする。専門は油層工学。連絡先：297 千葉県茂原市茂原 661 (勤務先)



## 小出 仁

KOIDE, Hitoshi 工業技術院地質調査所環境地質部長。1962年東京大学工学部卒業、同大学院修了。工学博士。1969年通産省工業技術院地質調査所入所。代表的な著書：「地震と活断層の本」国際地学協会刊。趣味：絵画。専門は岩石力学、地質構造力学。断層や地震の発生機構や地下空間利用について研究。連絡先：305 茨城県つくば市東 1-1-3 (勤務先)



### 1 はじめに

産業革命以来、大量の化石燃料を消費してきたために温室効果ガスである CO<sub>2</sub> の大気中の濃度が上昇して、地球温暖化<sup>1)</sup>が進行しているといわれている。このまま対策を講じなければ、人口の増加、生活の高度化によって CO<sub>2</sub> 排出量は急激に増大し、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度はさらに上昇するという予測がある。地球温暖化についてはさまざまな説があり、因果関係は必ずしも明らかではないが、近い将来には気候変動が生態系や社会、経済に何らかの悪影響を及ぼす可能性が指摘されている。

地球サミットでは大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることで国際的合意が成立した。一方、持続的な経済成長の達成、特に発展途上国における貧困の根絶の重要性も再確認され、先進国は責任をもって気候変動およびその悪影響に対処すべきであるとされた。現在、多くの分野で対策が検討されているが、CO<sub>2</sub> 排出量の膨大さから、これといった良い対策が浮かび上がっていない。また、温暖化とその対策が経済に及ぼす影響は国家間で異なるために国際協調を弱める結果になっている。

このような地球規模の複雑な問題である温暖化を解決するためにはエネルギー利用効率の向上、

エネルギー源の非化石燃料化、あるいは低 CO<sub>2</sub> 排出エネルギーへの転換、排ガスからの CO<sub>2</sub> 分離回収そして固定化、植林による大気中の CO<sub>2</sub> 吸収固定などといった対策が考えられている。ここでは、固定化の一方法として CO<sub>2</sub> 地中処理をとり上げ、論ずる。

生産量が減退した油田に CO<sub>2</sub> を圧入して石油の増進回収<sup>2)</sup>を図る方法が米国を中心に実施されてきた。地質データがそろい、設備が整っている油田に CO<sub>2</sub> を圧入、有効利用することは経済性から最適な固定化といえる。しかし、この方法による処理量には限度があり、油田の存在には地域的な偏りがある。そこで研究の対象を変え、枯渇ガス田や塩分濃度が高く利用価値のない帯水層を処理場所として調査した<sup>3)</sup>。

### 2 地下での CO<sub>2</sub> の挙動

原油増進回収法の研究によって CO<sub>2</sub> 地下圧入技術は現時点である程度、確立している。固定発生源の排ガスから回収した大量の CO<sub>2</sub> を枯渇ガス田あるいは塩分濃度の高い帯水層に長期間、安全に地下貯蔵するために地下で CO<sub>2</sub> がどのような動きをするか検討した。

CO<sub>2</sub> をガス状で地中に圧入したとき CO<sub>2</sub> 挙動の原理は地化学で扱う炭化水素の 2 次移動・集積<sup>4)</sup>と類似している。大量の CO<sub>2</sub> を圧入すると一

部は地下水に溶解するが、溶解できないCO<sub>2</sub>は気相を形成して水相とインミシブル<sup>脚注1)</sup>挙動をとるであろう。気相のCO<sub>2</sub>は水相より密度が小さいため、浮力が働いて上方へ移動する。移動先に厚い頁岩などで覆われたトラップ<sup>脚注2)</sup>が存在すれば炭化水素と同様にCO<sub>2</sub>もそこに集積すると予想される。

炭化水素のような軽い流体の上昇を遮る浸透性の非常に悪い岩石を帽岩という。泥質岩などでは圧密が進むと孔隙間通路の半径と浸透率はともに小さくなる。逆に、気体が水を押しつけて泥質岩中に侵入するのに必要な置換圧は大きくなる。このような帽岩が上部を覆ったトラップ構造<sup>9)</sup>の地層では気相の圧力が置換圧を超えなければ気相は帽岩を通過できないため、CO<sub>2</sub>が気相の状態ですらうに貯蔵されることになる。

ガス田の鉱床は炭化水素の存在そのものが帽岩のトラップ能力を実証している。そのためCO<sub>2</sub>を枯渇ガス田に貯蔵することには問題がない。しかし帯水層の場合、地質構造がトラップに適した形であっても帽岩の置換圧が小さかったり、帽岩に縦のフラクチャーが入っていたりするとCO<sub>2</sub>を気相状態で貯蔵できない。従って、帯水層にCO<sub>2</sub>を気相で貯蔵する計画を立てるとき、帽岩のトラップ能力を正確に判定したうえで処理限度量を求める必要がある。

CO<sub>2</sub>をガス状でトラップに貯蔵する方法とは別に、CO<sub>2</sub>の水への溶解度<sup>6)</sup>が比較的大きいことから、地下水に溶解した状態で帯水層深部に固定化する方法を考えてみる。帯水層へCO<sub>2</sub>を圧入すると一部は地下水に溶解して炭酸水となる。そのときの溶解度は地層の圧力、温度と地下水の塩分濃度によって決まる。炭酸は炭酸塩鉱物やケイ酸塩鉱物などと反応して重炭酸塩を形成する。この重炭酸塩は水に溶解するため、岩石の孔隙を広げ流体を流れやすくすることも考えられる。

地下水とそれに溶解したCO<sub>2</sub>とは帯水層の中でミシブル挙動<sup>脚注1)</sup>をとる。その現象は拡散と対流<sup>7)</sup>の組み合わせされたもので表すことができる。地下水の流速が小さいときCO<sub>2</sub>の分散は拡散に

支配される。しかし、流速が大きくなるに従いCO<sub>2</sub>の分散を支配する要因は対流に移っていく。CO<sub>2</sub>を地下水に溶解した状態で長期間、地下深部に貯蔵するためには地下水の流速が非常に小さいことが必要条件となる。

### 3 CO<sub>2</sub>処理可能量の概算

石油や天然ガスの鉱床であればCO<sub>2</sub>の貯蔵は可能と考えられる。そのため、枯渇ガス田にCO<sub>2</sub>を貯蔵することに問題はなく、すでに温暖化防止対策の一つとして検討されている<sup>8)</sup>。また、石油・天然ガス鉱床は炭化水素の生成・移動・集積がそろって初めて形成される。炭化水素のトラップに適した地質構造が存在しても、生成、または移動が十分でなければ石油・天然ガス鉱床とならない。過去に実施された地震探査や試掘のデータをもう一度、詳細に分析すればCO<sub>2</sub>の貯蔵に利用できそうなトラップ構造が多数、浮かび上がると思う。今まで見捨てられていた経済性の悪い鉱床であってもCO<sub>2</sub>処理場所として温暖化防止に役立つ。固定発生源の近くにこのような地質構造があれば、CO<sub>2</sub>を回収してそこに圧入固定化できる。

トラップ構造とは別に堆積盆地深部もCO<sub>2</sub>処理場所としてとり上げた。堆積盆地深部には塩分の濃い地層水が存在する可能性が高い。地層水は堆積当時からほとんど動いていない。そのような環境にある堆積盆地深部の帯水層にCO<sub>2</sub>を圧入、地下水に溶解させれば長時間、貯蔵できるであろう。

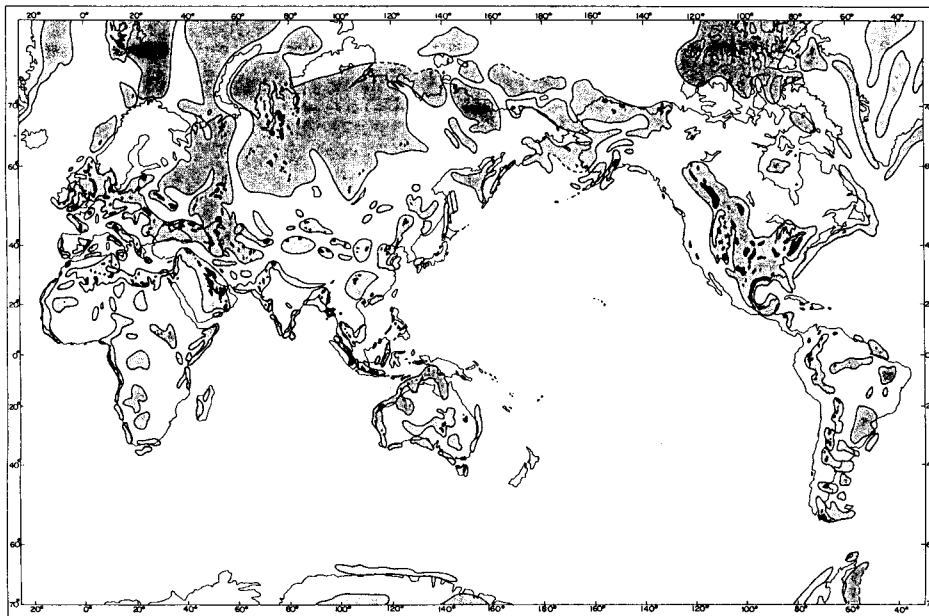
CO<sub>2</sub>の処理場所として検討している枯渇ガス田や開発に至らない石油・天然ガス鉱床、塩分濃度が高く利用価値のない帯水層はすべて堆積盆地にある。堆積盆地は大小さまざまな規模を持ち、世界各地に存在する(図1)。

そこで、堆積盆地に処理できるCO<sub>2</sub>の量を推定した。推定するにあたり、資源量予測の手法の一つである面積法を使った。面積法とは、探鉱によってすでに原始埋蔵量が把握されている地域をデータをもとに、未探鉱の地域の資源量を予測するときに使われる簡単な手法である。

まず、上記の枯渇ガス田、経済性のない石油・天然ガス鉱床、塩水化帯水層の中から最も広くかつ確実に存在する塩水化帯水層を選び、その単位面積あたりに処理できるCO<sub>2</sub>の量を求めた。CO<sub>2</sub>

脚注1) 2流体が界面を形成せずに流動することをミシブル挙動、その逆をインミシブル挙動という。

脚注2) 上部を浸透性の非常に悪い地層で覆われた石油・天然ガスなどを貯留できる構造体。



● 石油・ガス田  
 ○ たい積盆地

図1 世界の堆積盆地

表1 貯留層パラメーター

中央深度	2,500 m
地層圧	250 kscg
地層温度	90 °C
有効層厚	300 m
孔隙率	20 %
置換効率	20 %

表2 CO<sub>2</sub> 処理可能量

ブロック	たい積盆地面積 [10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> ]	CO <sub>2</sub> 処理可能量 [10 <sup>8</sup> ton]
東アジア	358	177
東南アジア	286	136
中東/西アジア	500	247
ソビエト連邦	971	480
ヨーロッパ	271	136
南アメリカ	907	448
北アメリカ	921	455
アフリカ	1,523	753
豪州/オセアニア	747	369
計 (全世界)	6,479	3,201

は水に溶解した状態で貯蔵されるとして、計算に必要なパラメーターを表1に示すような値に設定した。この圧力温度でのCO<sub>2</sub>の水への溶解度は0.041 t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>であり、堆積盆地1 km<sup>2</sup>あたりのCO<sub>2</sub>処理可能量は49万2000 t CO<sub>2</sub>となる。ここ

で、地下水の塩分濃度は不明として溶解度の減退は無視した。

CO<sub>2</sub>を貯蔵できるトラップまたは地層水領域が堆積盆地に、ある確率で分布すると考える。さらに立地条件や法的規制、そして経済性などを考慮して堆積盆地の面積の1%がCO<sub>2</sub>処理可能地域と仮定した。世界を9ブロックに分けて各ブロックの堆積盆地の面積を求め、CO<sub>2</sub>処理可能量を計算した結果を表2に示す。

堆積盆地に処理できるCO<sub>2</sub>の量は世界全体で3200億t CO<sub>2</sub>となった。化石燃料使用によるCO<sub>2</sub>排出量が1988年現在、世界合計で216億t CO<sub>2</sub>であることを考えると、この値は十分大きな値といえる。また、今回の試算では海洋底下の地層は対象から外している。海洋底下も入れると地中処理可能量はさらに大きくなる。

#### 4 システム設計とコスト試算

温暖化防止に関しては現在、多くの分野で対策を模索している状態であって、経済性のみで特定の対策の是非を論ずることはできない。しかし、CO<sub>2</sub>地中処理が固定化の一手段として有効であるかどうかを判断する目安として、技術と同様に経済性を十分に検討しておく必要がある。そこで、

架空のCO<sub>2</sub>地中処理プロジェクトを想定して処理システムの概略設計を行い、CO<sub>2</sub>1tあたりの処理コストを試算した。

火力発電所の排ガスに含まれているCO<sub>2</sub>を日量5000t回収、地中処理するプロジェクトを想定した。日量5000tのCO<sub>2</sub>を20年間処理するためには前述の処理可能量の推定に使った条件で約80km<sup>2</sup>の帯水層が必要となる。この規模の帯水層が火力発電所から10km離れた所に広がっていると仮定した。

火力発電所の燃料は石炭から重原油、天然ガスへと多様化している。燃料によって排ガスの組成に差があるが、火力発電所の排ガス中のCO<sub>2</sub>濃度は一般に低く、天然ガスの場合、9%弱と考えられる。その排ガスから回収したCO<sub>2</sub>を高圧コンプレッサーを使いパイプラインで配給所へ輸送し、そこから複数の圧入基地へふり分ける。各圧入基地でさらに複数の圧入井にふり分けて地中に圧入する。大量のCO<sub>2</sub>を貯留層に圧入すると貯留層の圧力が上昇して、CO<sub>2</sub>の圧入や貯蔵に障害が生じる可能性がある。このような場合には揚水井を掘り、水を汲み上げて貯留層の圧力上昇を抑えることが必要となる。汲み上げた水の一部はCO<sub>2</sub>の置換効率を上げるために再び貯留層に圧入する。残りの水は排水管を通して海に捨てる(図2)。

圧入開始後ある程度、時間が経過すると汲み上げる水にCO<sub>2</sub>が混入して出はじめる。このCO<sub>2</sub>は圧入基地で水と分離して再び地中に還元する。そのため設備として圧入基地内に、揚水井から送られてきた水とCO<sub>2</sub>を分離するセパレーター、CO<sub>2</sub>の除湿装置とコンプレッサーなどを設置する。貯留層が天然ガス鉱床であれば天然ガスからCO<sub>2</sub>を分離回収する装置が必要となる。また、水を圧入するためのポンプや水処理装置なども置く(図3)。

圧入レートを250tCO<sub>2</sub>/day/wellとすると、日量5000tのCO<sub>2</sub>を地中処理するためには圧入井が20本必要になる。8×10kmの領域に5-spot pattern<sup>脚注3)</sup>で圧入井と揚水井を配置すると揚水井が30本必要になる。圧入基地を10基地設け、各圧入基地で圧入井2本と揚水井3本をコントロ

脚注3) 圧入井と生産井を幾何学的(四角形の頂点と中心)に繰り返し配置すること。

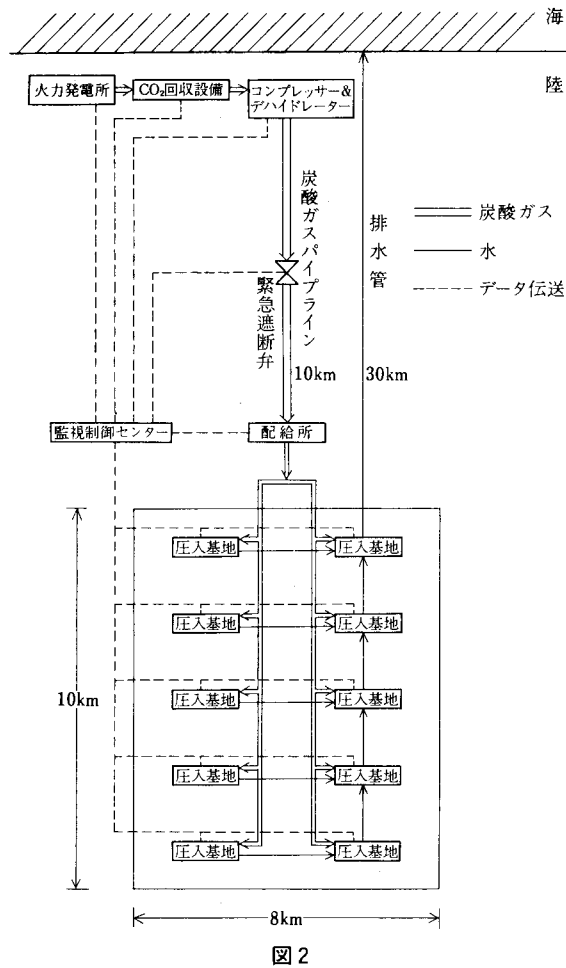


図2

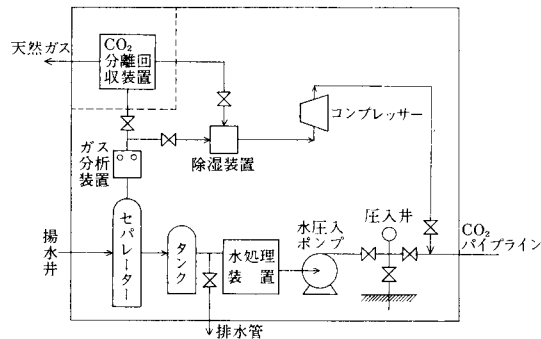


図3

ルする。

次に、処理コストの試算結果については、処理プロセスを高圧コンプレッサー入り口からとして、パイプライン、圧入基地、坑井などの設備費を求めた。日量5000tのCO<sub>2</sub>を地中に処理するために必要な設備費は総額460億円となり、その

表3 建設コスト (処理容量 5000 t CO<sub>2</sub>)

設 備	単 価 [億円]	個 数	設備費 [億円]
高圧コンプレッサー	70	1台	70
パイプライン			
主要ライン	1.0	10 km	10
分岐ライン	0.5	70 km	35
圧入設備			
水処理設備	2.0	10	20
水圧入ポンプ	1.5	10	15
圧入井	8.0	20	160
揚水井	3.5	30	105
排水管	1.0	30 km	30
遠隔監視制御装置	15	1式	15
合 計			460

表4 CO<sub>2</sub> 地中処理コスト

(単位: 円/t CO<sub>2</sub>)

建設費償却	1,260
金利(年10%)	530
補修費	340
人件費	270
消耗品費	610
合 計	3,010

内訳を表3に示した。ただし、貯留層が天然ガス鉱床の場合に必要なCO<sub>2</sub>分離回収装置は天然ガス生産設備と見なし、このなかに含めていない。

さらに、ランニングコストとして人件費や消耗品などを合計880円/t CO<sub>2</sub>と見積もり、設備費の償却、金利、補修費からCO<sub>2</sub> 1tあたりの処理コストを計算した結果、約3000円/t CO<sub>2</sub>となった。計算結果を表4に示す。電力は火力発電所から無料供給として処理コストに含めず、エネルギーロスとみた。この処理システムでは高圧コンプレッサーが電力の大半を消費する。日量5000tのCO<sub>2</sub>を輸送して、地下2000~3000mに圧入するために費やされる電力は73kWh/t CO<sub>2</sub>程度となる。

オランダ・シェル社が同様の試算を行ったので、比較のためにそれを紹介する。酸素吹き石炭ガス化複合発電プラントからアミン法で日量1万5000tのCO<sub>2</sub>を回収、オランダ国内の枯渇ガス田に貯蔵するシステムを検討したところ、発電効率が41%から32%に低下するとのことであった。また、CO<sub>2</sub> 1tあたりの処理コストは3300~4200

円という試算結果が報告されている。

## 5 ま と め

前述のように、量およびコストの面から検討した結果、地中処理は今後も調査研究を続けるに足る、有望な処理方法とみてよいと思う。しかし、固定化の面からみると完全な方法とはいえない。地下に圧入したCO<sub>2</sub>が海中や地表に漏れ出てくる危険性がある。CO<sub>2</sub>は必ずしも生物に直接有害ではないが、環境への影響を考える必要がある。このことから、地下でのCO<sub>2</sub>-水系の流動メカニズムを解明して、貯留層への圧入の可能性を評価する技術を確認することが今後の重要な課題である。

以上、述べてきた内容はCO<sub>2</sub>地中処理検討会が1992年3月オランダで開催された第1回CO<sub>2</sub>除去国際会議(ICCDR)で発表した<sup>9)</sup>。CO<sub>2</sub>地中処理検討会とは小出 仁(工技院・地調・座長)、進藤勇治(工技院・化技研)、野口嘉一・中山寿美枝(電源開発)、飯島正樹・伊藤和逸(三菱重工業)、田崎義行(関東天然瓦斯開発)をメンバーとする私的研究会である。

## 引用文献

- 1) 小宮山宏, "地球温暖化問題ハンドブック", (1990), (株)アイビーシー.
- 2) Latil, M. et al, "Enhanced Oil Recovery", Gulf Publishing Company.
- 3) 小出 仁, "CO<sub>2</sub>の地中貯留について", 化学工学, 56, 5, (1992).
- 4) 石油技術協会編, "石油鉱業便覧", p.18, (1983).
- 5) 石油技術協会編, "石油鉱業便覧", (1966).
- 6) Mack D.J. and Harrington L.J., "Oil & Gas Journal", July, 16, 49 (1990).
- 7) Siemek J. et. al, "Classification and Characteristics of Physical Phenomena Occurring Production of Gas Reservoir and in Underground Gas Storage", 16th World Gas Conference, Munich, (1985).
- 8) van der Burgt M.J. et. al, "Carbon Dioxide Disposal from Coal Based IGCC's in Depleted Gas Fields", 10th Annual Conference on Gasification Power Plant, Sanfransisco, USA, (1991).
- 9) Koide H. et. al, "Subterranean Containment and Long-Term Storage of Carbon Dioxide in Unused Aquifers and in Depleted Natural Gas Reservoirs", 1st ICCDR, The Hague, (1992).