

CO₂の地中圧入システム

田崎 義行¹⁾

1. はじめに

地球温暖化の対策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CO₂排出エネルギーへの転換, 排ガスからのCO₂分離回収そして固定, 植林による大気中のCO₂吸収固定などが考えられる(小宮山, 1990)。「CO₂の地中貯留」はCO₂固定化に該当する。

CO₂地中貯留として枯渇ガス田への貯留が一方法としてあげられる。また, CO₂を油田に圧入して原油の増進回収を図れば有効利用につながる(田中, 1993)。地質資料が揃い, 設備が整っている油田・枯渇ガス田に圧入貯留することは安全性からも経済性からも有効なCO₂地中固定化と思う。しかし, この方法によって固定化できるCO₂の量には限度があり, 油田・枯渇ガス田の分布には地域的偏りがある。そこで, 広範に分布する帯水層にCO₂を貯留することを検討してみた(小出, 1992)。

石油, 天然ガスを集積できるようなトラップが存在しても, 十分な炭化水素が生成されなかったために油田・ガス田とならなかった地質構造が世界には数多く分布していると推察できる。そこに, 塩分濃度が高く飲料水としてはもちろん, 工業用水や農業用水としても利用できないであろうと考えられる地層水を胚胎する帯水層が広がっていれば, そこをCO₂地中貯留の対象として検討することができると思う。地質調査や探鉱によってある程度, それらの地質構造, 地下水の水質その他の情報はつかめていると考えられる。そういった情報を使ってCO₂地中貯留の観点からそれら帯水層の評価を行えば, 利用価値がないであろうと見捨てられていた帯水層であってもCO₂貯留場所として地球温暖化抑制に利用できるような帯水層が見つかるのではないかと思う。

そのような帯水層が見つかったとき, CO₂地中貯留の観点からその帯水層を評価する基本となるものはそこに貯留できるCO₂の量(以後, CO₂貯留可能量と呼ぶ)であろう。しかし, 地中に圧入したCO₂が利用している地下水帯に侵入したり, 地表や海底に漏れたりする危険がある。また, 事故による地上設備からの漏洩も考えられる。CO₂地中貯留を計画および実施する上で, 安全性についての十分な配慮を必要とする。万が一の事故に対する対策も事前に考えておくべきであろう。また, 例え地球温暖化という環境問題であっても, その規模の大きさから判断すると経済性を軽視した抑制策は取るべきでないと思う。CO₂地中貯留もしかりであって, 個々のCO₂地中貯留プロジェクトについてその経済性評価を行うことが大切であろう。

このような観点からCO₂地中圧入システムを中心にCO₂地中貯留の問題点について述べる。

2. 帯水層でのCO₂の挙動

CO₂を帯水層に圧入するとき, CO₂がどのような挙動をとるか把握しておくことは安全性の面から必須条件といえるであろう。それは経済性評価を正確に行うためにも必要な条件と考えられる。ところが, CO₂-地層水-岩石系の流体流動および化学的反応についての研究はこれまであまり行われていない。CO₂地中貯留を検討していても第一に浮かんだのはこういった基礎研究の必要性である。

CO₂-純水(あるいは塩水)系の溶解度やCO₂の物性値についてはある程度, 実験から求められている。ところが, 地層水には炭化水素をはじめ各種の物質が含まれていることが多々あり, そのような地層水とCO₂の相平衡あるいは化学的反応などについては今後の研究課題であろう。その上に, 岩石と

1) 関東天然瓦斯開発株式会社 茂原鉱業所:
〒297 千葉県茂原市茂原661

キーワード: 燃料排ガス, CO₂貯留可能量, 高圧コンプレッサー,
パイプライン, 圧入基地

の化学的反応が係わってくるとCO₂の挙動はさらに複雑になる。例えば、CO₂圧入によって炭酸塩岩の炭酸カルシウム分の溶解が起こることなどが考えられる。

ここでは、帯水層を塩水に満たされた多孔質媒体とみなしてCO₂-塩水系の流体流動機構について考察してみる。この機構は、CO₂をガス状あるいは地層水に溶解させて地中に貯留するときに、その貯留量を求めるための基本的考えとなるのではないかとと思われる。

CO₂をガス状で帯水層に貯留するときの基本原理解は地化学で扱う炭化水素の二次移動・集積と類似している。地下に大量のCO₂を圧入するとCO₂の一部は水に溶解するが、水に溶解できないCO₂は気相を形成して水相とインミシブル挙動をとるであろう。気相のCO₂は水相より密度が小さいと、浮力が働いて移動する。そのため、帯水層の上部に分離したCO₂が集積し、流体圧によってさらに上方に移動しようとする。流体圧に対する主な抵抗力は毛細管圧力で、移動先に厚い頁岩などの帽岩で覆われたトラップが存在すれば炭化水素と同様にCO₂もそこに集積すると予想される。

帽岩のトラップ能力はCO₂-水の置換圧Pdで判定できる。Pdは岩石の孔隙間通路の半径をr、気相のCO₂と水相との界面張力をσ、ウェッタビリティをcosθとして次式で表される(Collins, 1976)。

$$Pd = 2\sigma \cos \theta / r \quad (1)$$

泥質岩などでは圧密が進むと孔隙間通路の半径rが小さくなり、置換圧Pdが大きくなると考えられる。このような岩石が上部を覆ったトラップでは気相の圧力が帽岩の置換圧を越えなければ気相は帽岩を通過できないため、CO₂が気相の状態でもトラップに貯蔵されるであろう。

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と考えられる。そのためCO₂を枯渇ガス田に貯蔵することには問題ないであろう。しかし、帯水層の場合、地質構造がCO₂をトラップできるような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CO₂を気相状態で貯蔵できない。帯水層にCO₂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てCO₂貯留可能性を求めることが重要と思われる。

CO₂を気相状態でトラップに貯蔵する方法とは別に、CO₂の水に対する溶解度が比較的大きいことから、水に溶解した状態で帯水層深部に固定化する方法が考えられる。帯水層に圧入されたCO₂の地下水へ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ほぼ決まるとみてよい。

水に溶解したCO₂は水とミシブル挙動をとるであろう。その現象は拡散と対流の組み合わせられたものと考えられる。一次元拡散-対流の式は次式で表すことができる(Siemek et al., 1985)。

$$\phi \frac{\partial c(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(x, t) \frac{\partial c(x, t)}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial x} [u(x, t)c(x, t)] \quad (2)$$

ここで、cはCO₂濃度、Kは見掛けの拡散係数、uはダルシーの法則による流速、φは孔隙率である。拡散係数と流速を一定とおくと式(2)は次式になる。

$$\phi \frac{\partial c(x, t)}{\partial t} = K \frac{\partial^2 c(x, t)}{\partial x^2} - u \frac{\partial c(x, t)}{\partial x} \quad (3)$$

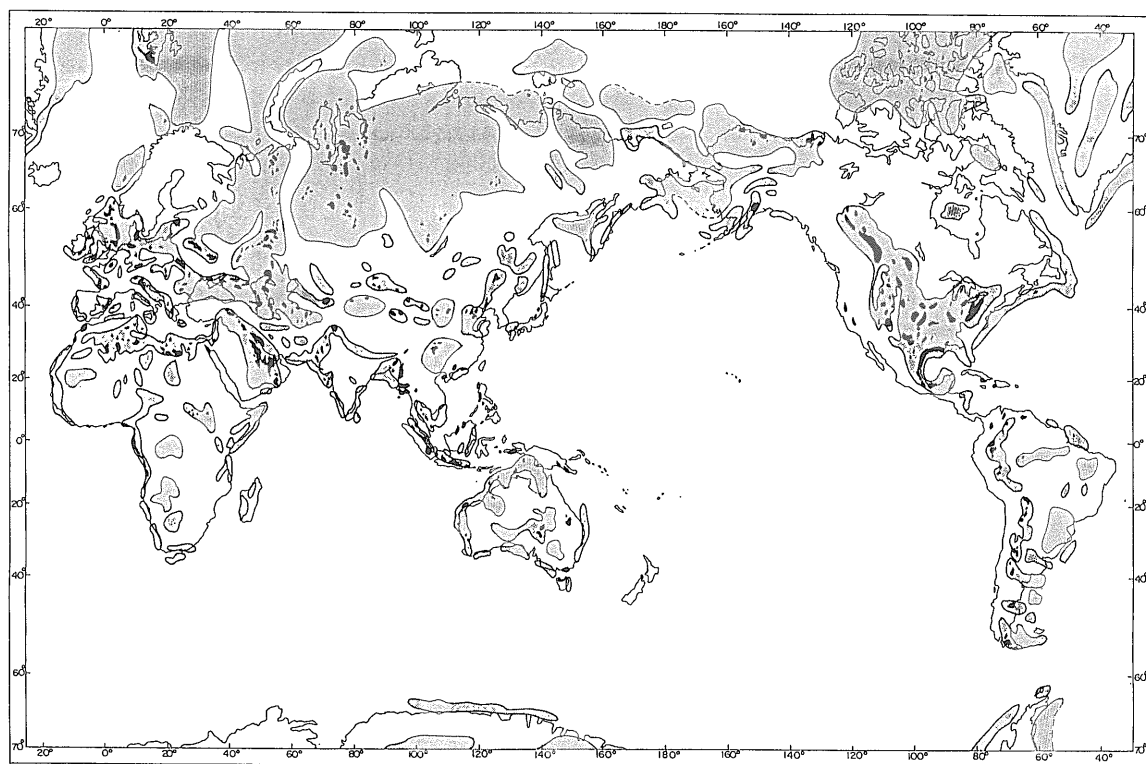
流速uが小さいときCO₂の分散は拡散に支配される。しかし、流速が大きくなるに従いCO₂の分散を支配する要因は対流に移っていく。CO₂を水に溶解した状態で長期間、地下深部に貯留するためには地下水の流速が非常に小さいことが必要条件となる。

3. CO₂貯留可能量の概算

CO₂の地中貯留場所として検討している利用価値のない帯水層は全て堆積盆地にある。堆積盆地は大小様々な規模を持ち、世界各地に存在する(第1図)。CO₂を気相あるいは水に溶解した状態で堆積盆地に貯留するとしてCO₂貯留可能量を推定した。

堆積盆地のCO₂貯留可能量を推定するに当たり、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、CO₂を地中貯留できるような前述のトラップまたは帯水層が堆積盆地にある確立で分布すると考える。さらに立地条件、法的規制、経済性などを考慮して堆積盆地の面積の1%がCO₂地中貯留可能地域と仮定した。

CO₂を水に溶解させた状態で地中に貯留すると



● 油田・ガス田
 ○ 堆積盆地

第1図 世界の堆積盆地(鈴木, 1986)

して、単位面積当たりのCO₂地中貯留可能量を求めてみた。計算に必要な貯留層、その他のパラメーターを仮定して堆積盆地1km²当たりのCO₂地中貯留可能量を求めたところ492,000 ton-CO₂となった。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からCO₂地中貯留可能量を計算した結果を第1表に示す。堆積盆地を利用したCO₂地中貯留可能量は世界全体で3,201億 ton-CO₂ (87 gigaton-C)となった。

4. CO₂地中圧入システムとコスト

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況であって、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であろう。しかし、CO₂地中貯留が固定の一手段として有効であるかどうかを判断する要素として、技術や量的有効性と同様に経済性を十分に検討する必要があると思う。そこで、CO₂の地中貯留プロジェクトを想定して、地中圧入システムの概略設計を行ない、CO₂

第1表 CO₂地中貯留可能量(田崎・小出, 1993)

ブロック	堆積盆地面積 [10 ⁴ km ²]	CO ₂ 処理可能量 [10 ⁸ ton]
東アジア	358	177
東南アジア	286	136
中東/西アジア	500	247
旧ソビエト連邦	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	1523	753
豪州/オセアニア	747	369
計(全世界)	6479	3201

1トン当たりの地中貯留コストを試算してみた。20年間にわたって火力発電所の排ガスに含まれているCO₂を日量5,000トン回収、地中貯留するプロジェクトを想定した。これだけのCO₂を貯留するためには前述のCO₂貯留可能量の概算に使った条件で

約80 km²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10 km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CO₂濃度は一般に低く、天然ガスの場合、9%弱と考えられる。そのため、CO₂回収プロセスには化学吸収法の適用を考えてみた。

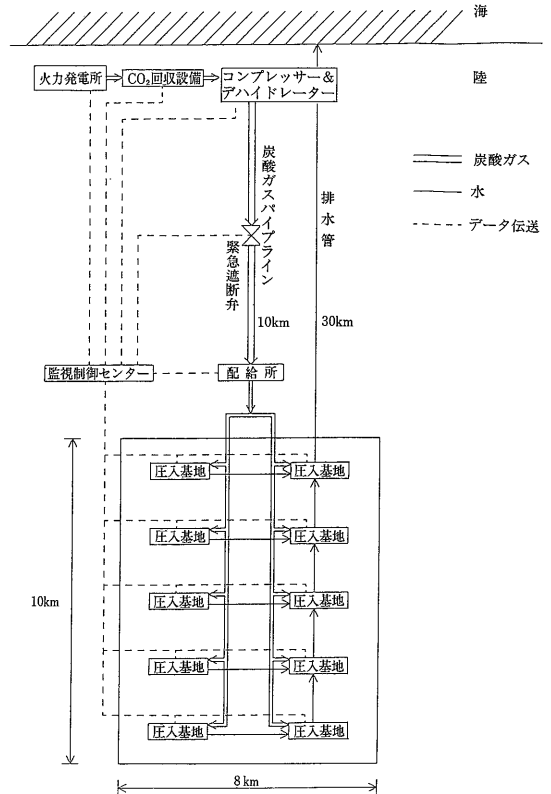
燃料排ガスから回収されたCO₂は高圧コンプレッサーを使いパイプラインで配給所へ輸送され、そこから複数の圧入基地へ振り分けられる(第2図)。各圧入基地でさらに複数の圧入井に振り分けられて地中に圧入される。大量のCO₂を貯留層に圧入すると貯留層の圧力が上昇して、CO₂の圧入や貯蔵に障害が生じる可能性がある。このような場合には揚水井を掘り、水を汲み上げて貯留層の圧力上昇を押えることが必要となる。汲み上げられた水の一部はCO₂の置換率を上げるために貯留層に圧入される。残りは配水管を通して海に捨てられる。

圧入開始後、ある時間が経過すると汲み上げる水にCO₂が混入し始める。このCO₂は圧入基地で水と分離して再び地中に圧入する。そのための設備として圧入基地内に、揚水井から送られてきた水とCO₂を分離するセパレーター、CO₂の除湿装置とコンプレッサーを設置する(第3図)。貯留層が天然ガス鉱床であれば天然ガスからCO₂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。

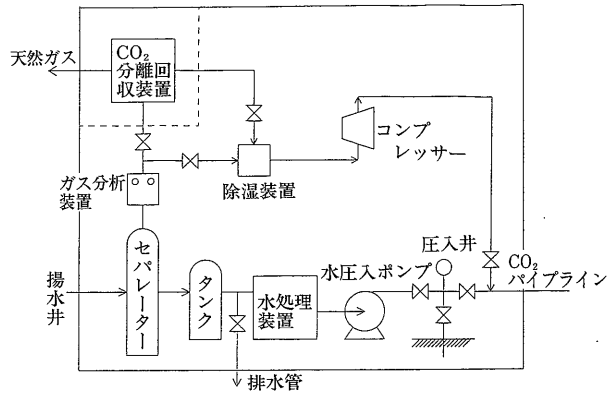
圧入レートを250 ton-CO₂/day/wellとすると、日量5,000トンのCO₂を地中貯留するためには、圧入井が20本、8 km×10 kmの領域に圧入井と揚水井を平面幾何学的に交互に配置すると揚水井が30本必要になる。圧入基地を10基地設け、各圧入基地で圧入井2本と揚水井3本をコントロールする。

以上、想定したプロジェクトの地中圧入システムについて概要を説明した。次に地中貯留に要するコストの試算結果について簡単に述べてみる。

地中圧入プロセスを高圧コンプレッサー入口からとして、パイプライン、圧入基地、坑井などの設備費を計算したところ、日量5,000トンのCO₂を地中に貯留するために必要な設備費は総額460億円となった。ただし、貯留層が天然ガス鉱床の場合に必要な



第2図 CO₂地中圧入システム(田崎・小出, 1993)



第3図 CO₂圧入基地(田崎・小出, 1993)

となるCO₂分離回収装置は天然ガス生産設備とみなし、この中に含めていない。

さらに、ランニング・コストとして人件費や消耗品などを見積り、設備費の償却、金利、補修費からCO₂1トン当たりの地中貯留コストを計算した。その結果、コストは約3,000円/ton-CO₂となった。電気は火力発電所から無料供給として地中貯留コスト

に含めず、エネルギー・ロスとした。この地中貯留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5,000トンのCO₂を輸送して、地下に圧入するために費やされる電力は269 kWh/ton-Cである。

5. ま と め

固定発生源の排ガスから回収した大量のCO₂を地中貯留する場所として、塩分濃度が高く利用価値のない帯水層を検討した。帯水層にCO₂を貯留する場合、CO₂貯留層としての評価を行う必要がある。しかも、帯水層を利用した貯留には主に2通りの形態があって、それぞれ貯留層評価の重点が異なる。トラップにCO₂を気相で貯留するときは帽岩のトラップ能力が重要と考えられる。一方、堆積盆地深部に水に溶解させた状態で貯留するときは地下水の流れの有無が問題となる。

CO₂を地中貯留できる地域が堆積盆地の面積の1%を占めると仮定して、帯水層に貯留できるCO₂の量を面積法によって概算した結果、世界全体で3,200億 ton-CO₂となった。さらに、経済性を検討するために日量5,000トンのCO₂を地中貯留するプロジェクトを想定して、CO₂地中圧入のための設備費とCO₂トン当たりのコストの試算を行ったところ、設備費が460億円、コストが約3,000円/ton-CO₂となった。

検討結果から判断して貯蔵量と経済性の両面で、CO₂の地中貯留は温暖化に対する有効な対策の一つとみなせるのではないかと思う。しかし、CO₂固定化の面からみると完全とはいえない。地中に圧

入したCO₂が海中や利用されている地下水層に漏れる危険性がある。CO₂は必ずしも生物に直接有害ではないので若干量であれば問題にならないであろう。この場合は環境への影響を予測して、十分な評価をする必要がある。このことから、地中でのCO₂-水-岩石系の流体流動機構や化学的反応を解明して、CO₂の地中圧入の可能性を評価する技術を確立することが今後の課題であろうと考える。

本稿の作成にあたり、Koide et al. (1992)および田崎・小出(1993)を基に編集し、一部に加筆した。

文 献

- Collins R. E. (1976): Flow of fluids through porous materials. 32 p.
- 小出 仁(1992): CO₂の地中貯留について. 化学工学, **56**, 345-350.
- Koide, H., Tazaki, Y., Noguchi, Y., Nakayama, S., Iijima, M., Ito, K. and Shindo, Y. (1992): Subterranean containment and long-term storage of carbon dioxide in unused aquifers and in depleted natural gas reservoirs. Energy Convers. Mgmt, **33**, 619-626.
- 小宮山 宏監修(1990): 地球温暖化ハンドブック. アイビーシー, 647p.
- Siemek J., Olajosy, A., Ostrowski, L., Rojtar, J. and Rybicki, C. (1985): Classification and characteristics of physical phenomena occurring production of gas reservoir and in underground gas storage. 16th World GAS Conference, Munich.
- 鈴木宇耕(1986): 石油堆積盆地の地球的形態. 北村 信教授記念地質学論文集, 473-488.
- 田中彰一(1993): 二酸化炭素の原油採取への利用とそれによる地下固定化, ベトロテック, **16**, 30-35.
- 田崎義行・小出 仁(1993): 温暖化対策はCO₂地中処理が最適, ベトロテック, **16**, 108-112.

TAZAKI Yoshiyuki (1993): Subterranean sequestering system on carbon dioxide.
