

CO₂ の地中貯留, 概要と可能性

小出 仁¹⁾

1. はじめに

人類が通常使っているのは地球の表面に極く近い部分に限られている。宇宙時代とはいっても、宇宙へ一般の人が行けるようになるのはかなり先の事であろう。人類にとってかけがえのない地表および地表に近い空間を守る事に人類の将来がかかっている。

現在人類は多量の地下資源を掘りだして利用しているが、その行く末についてはほとんど注意を払っていない。しかし、掘り出された物質の大部分は地表あるいは地表近くの何処かに存在している。私達は地下資源を掘り出すだけでなく、その行く末についても注意して見守らなければならない。

従来地下資源の探査は埋蔵量の確保だけを目標にしていたが、採取した資源の行く末まで考えなければならなくなった今、資源探査の考え方も大きく変わらなければならない。21世紀後半には枯渇しそうな石油に対し、石炭は300年以上の使用に十分な埋蔵量があるといわれている(資源エネルギー庁, 1992)。しかし、高品位炭だけで約1兆トン以上の確認可採埋蔵量があるといっても、その石炭をすべて燃やすと現在大気中にある量にほぼ匹敵するCO₂が発生する。したがって石炭は埋蔵量よりむしろ環境への影響のために利用できなくなる恐れがある。地下資源を探査し掘り出すだけでなく、環境保全も含めた総合的な資源開発が望まれている。

2. 環境鉱山の提案

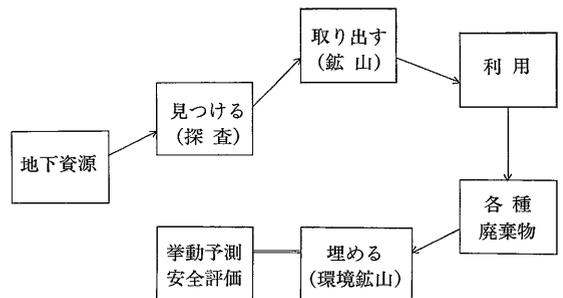
地球環境問題とは、要するに廃棄物問題であるといっても過言ではない。資源が使われれば当然廃棄物が生じる。資源を節約し、廃棄物を少なくするためには再利用するのがよいが、再利用には限度があ

り、再利用不能のものもある。

大量の物質が地表に供給され続ければ、限りある地表が満杯になるのは当然であるから、結局はどこかへ処分するほかない。処分場所としては、1)大気中に放出する、2)海中に放出する、3)地中に埋設する、4)宇宙に放出するしかない。廃棄物の種類と量・質の飛躍的な増加と共に大気中や海中への放出は困難になってきているが、宇宙への放出も技術的に当分困難である。したがって、最も環境に優しい解決策として、地中への廃棄物埋設が増加するのは当然の帰結である。

しかし、地中埋設に当たっても、環境への影響や安全性の確保に十分に注意しなければならないのは当然である。無害な廃棄物は地表からの埋め立てができるが、有害な廃棄物はある程度の深部に埋設して人間の住む地表から隔離する必要がある。そして、有害物質が将来にわたって漏れ出さない事を確認しなければならない。

地下から掘り出した資源を使用した後の廃棄物を地下に戻すのは自然な解決策である。技術や設備もほぼ同じような設備が使用できる。そこで環境を守るための環境鉱山の考え方を提唱したい。しかし作業としてはまったく逆になる事に注意しなければならない。通常、鉱山では過去に生じた有用物を探し



第1図 環境鉱山の概念

1) 地質調査所 環境地質部

て取り出せば済んだが、環境鉱山では未来に責任を持たなければならない事が重大な相違である(第1図)。

地下資源の探査は、過去に生じた何らかの原因で有用な鉱物などが濃集した場所を見つける作業である。すなわち異常箇所を見いだす事が通常の資源探査である。しかし廃棄物の埋設に当たっては、断層等の異常がなく、埋設後の将来にわたっても有害物質が漏れ出すような異常現象が起きない事を確認する必要がある。従来の資源探査は過去の異常を探す事であったが、今後重要になる廃棄物処分の安全性評価では将来異常がない事を示さなければならない。資源探査と廃棄物処分の環境安全性評価では、ほとんど同じような地下調査技術を使うが、過去の異常を見つけるより、将来異常がない事を確認する方が一般にはるかに困難である。異常を探すときは、一つの異常を発見できれば目的を達するが、異常がない事を確認するにはあらゆる可能性を調べる必要がある。また過去の出来事を調べるより、将来を予測する方が難しいのは明白であろう。

廃棄物処分関係で最も研究されているのは放射性廃棄物の分野である。特に高レベル放射性廃棄物については、1万年以上の長期未来にわたり、安全性を確認する為に国家プロジェクトとして研究開発が進められている。放射性廃棄物処分については別に報告がなされている(小出, 1992など)。

3. 地球温暖化防止のためのCO₂対策

高レベル放射性廃棄物を質の面での廃棄物の横綱とすれば、量の面での横綱はCO₂であろう。CO₂は人体への毒性は低いので従来はまったく問題にされていなかったが、地球温暖化の最大の要因として注目されるようになり、大気中への排出を抑制しなければならなくなってきた。CO₂対策を困難にしているのは、量の膨大さである: 化石燃料からのCO₂排出量は世界で年間約200億トン、1気圧での容積にして約10兆m³に達する(1987年)。これは全地球を2cmの厚さで覆う容積である。化石燃料の中でも、資源量の大きい石炭の成分はほとんど炭素である。炭素の燃焼によりCO₂が生じる過程で放出される熱を利用しているので、リサイクルしては原理的にエネルギーを抽出できない。化石燃料中の

炭素分をエネルギー源として利用する限りでは、CO₂はリサイクル不能である。

日本では、火力発電所や製鉄所のような大量固定発生源から排出されるCO₂が全体の排出量の約60%を占める(進藤, 1992)。大量固定発生源から排出されるCO₂を分離回収するための技術開発は地球環境への貢献が大きいので、盛んに進められている(小宮山, 1990; 公害資源研究所, 1990; 野口, 1993)。しかし、CO₂の回収に成功しても、つぎに、それを如何に処分するかが問題となる。再利用の研究も行われているが、究極的には処分しなければならなくなる。

地球温暖化対策として森林や珊瑚の育成が提案されている。これらは自然の調整機能を生かした方法であり、単なる温暖化対策以上の効果も期待されるが、長期的な対策であり、また微妙なバランスの上に成り立つ効果なので、速効性は期待できない。大量固定発生源対策としては、直接的な貯蔵や処分等の方法の開発が望ましい。

CO₂の処分場所としては海洋を利用する研究がもっとも進んでいる。海洋中には大気中の約50倍ものCO₂が溶けているが、なお人間活動によって排出されるCO₂をも十分に吸収し得る余力があると考えられている。しかし、海洋全体としては十分な容量があっても、大量のCO₂を迅速に集中的に処分すれば、局部的な海洋の環境に影響がでる恐れがある。したがって、大量固定発生源から分離したCO₂を集中的に処分するためには、海洋よりもっと環境への影響の少ない場所が望ましい。

地下には大気中のCO₂の約10万倍もの炭素分が炭酸塩鉱物あるいは有機物として固定化されている(Berner and Lasaga, 1989)。石油・石炭・天然ガス等の化石燃料として人間に利用されるのは、そのうちのごくわずか(大気中のCO₂の約5.5倍程度)でしかない。その化石燃料の燃焼によって放出されるCO₂を、再び地中に戻すことは、もっとも自然な対策といえる(小出, 1990)。

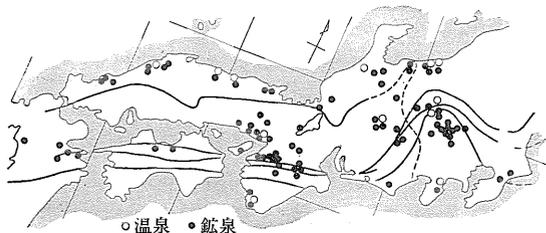
通商産業省が提案している「地球再生計画」は、省エネルギー・クリーンエネルギーの導入・CO₂固定化技術の開発・CO₂吸収源の拡大などを推進し、CO₂排出量を21世紀初期に減少傾向に転じさせ、100年後には「緑の地球」を復活させることを目標にしている。そのため様々な研究開発が既に開

始され、あるいは計画されているが(進藤, 1993), 著者らはCO₂地中処理検討会を作り、CO₂を地中に戻す事により大量固定発生源からのCO₂排出を抑制する方法を提案している。検討会のメンバーは、小出仁(工業技術院地質調査所, 主査), 進藤勇治(工業技術院物質工学工業技術研究所), 野口嘉一・中山寿美枝・原田円(電源開発株式会社), 飯島正樹・伊藤和逸(三菱重工業株式会社), 田崎義行(関東天然瓦斯開発株式会社)であり、本号にその研究の成果の一部を紹介する。

4. 天然における地中CO₂

地下から採取される天然ガス中には常に多少のCO₂成分が含まれているが、時に高濃度のCO₂が含まれていることがある。群馬県安中市の磯部ガス田は炭酸ガスの生産で知られ、産出ガス中の99.45%が炭酸ガスで占められている坑井がある(福田, 1973)。また、坑井から出る水1klあたりに産出するガスの容量が20 m³以上であることが多く、深度300 mで水1klあたりガス483 m³(炭酸ガス95%)を産する坑井もある。磯部ガス田の高濃度のCO₂は地下深部のマグマから供給された火山性のものであろうと考えられているが、炭酸塩鉱物や有機物の分解によるCO₂が蓄積している場合もある(福田, 1973)。

温泉や鉱泉水中にも高濃度のCO₂が溶存ガスあるいは炭酸(H₂CO₃)や炭酸水素イオン(HCO₃⁻)や炭酸イオン(CO₃²⁻)として溶け込んでいて、炭酸泉と呼ばれているものがある(第2図)。長湯温泉(大分県)では、温泉水1kgに約3.4gの炭酸ガスが溶存し、有馬温泉(兵庫県)でも約1.5gのCO₂を含むものがある(湯原, 瀬野, 1969)。炭酸水素イオンとしては、琵琶の窪鉱泉(群馬県)で水1kgにHCO₃⁻



第2図 全炭酸1g/kg以上を含む温・鉱泉の分布(湯原・瀬野, 1969)

約9gが溶けている例がある。

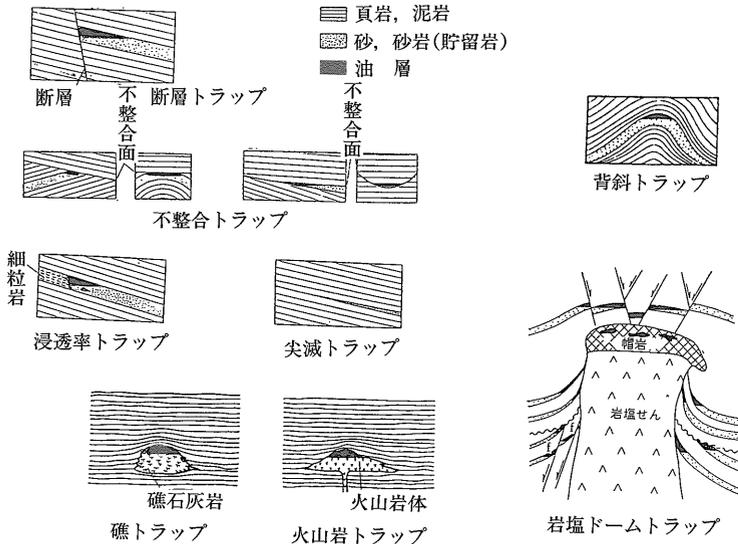
炭酸ガスに富む鉱泉水は、しばしばミネラル・ウォーターとして上質の飲料水に用いられている。日本でも兵庫県六甲山周辺の冷炭酸泉が知られている。天然鉱泉水のほかに、人工的に圧力を加えて炭酸ガスを溶解させたソーダ水は清涼飲料として用いられる。さらにソーダ水に第二次加工を加えたサイダーやコーラなどの炭酸飲料は広く飲用されている。

このように地下水中に高濃度のCO₂が溶解している場合があり、温泉として浴用に、また天然鉱泉水として飲用に利用されている。CO₂の溶存する地下水は直接には人体に有害なものではない。

1986年アフリカ西部カメルーンのニオス湖で、急に炭酸ガスが突出し、大量に谷へ流入したため、酸欠状態となって多くの死者がでた。地下のマグマから放出されたCO₂が、火口湖であるニオス湖の底層水を飽和状態にしていて、何かのきっかけで急激に気化・発泡したためと考えられている(久保寺, 1991)。日本でも火山地域などでは地下深部のマグマからCO₂が放出されているが、熱帯地域にあるニオス湖と異なり、日本の湖は対流があるので、飽和状態にはならず、突出の心配はない。また、岩盤の中では、細かい空隙中に貯留されているので、たとえ飽和状態になっていても地下水中のCO₂が一気に突出する心配はない。ただし、火山地帯などでは炭酸ガスが徐々に侵出して、地下空洞や低地に滞留することに注意する必要がある。

5. 天然ガスの地下貯蔵

日本でも大規模な石油地下備蓄基地が建設されており、また圧縮空気の地下貯蔵の計画も進行している。しかし、CO₂の地下貯留のために技術的にもっとも参考になるのは、天然ガスの地下貯蔵である。天然ガスの地下貯蔵は、米国等で大規模に実施されている。夏期等のガスの需要の少ない時期に地下に貯蔵し、冬期等の需要の多い時期に排出して、供給不足分をおぎなう。米国で、1979年には399個所で2120億m³のガスが貯蔵されている(Katz and Tek, 1981)。貯蔵には、枯渇した、ないしは枯渇しかけたガス田または油田が用いられることが多い。既存のガス田や油田には、天然ガスを大量に貯

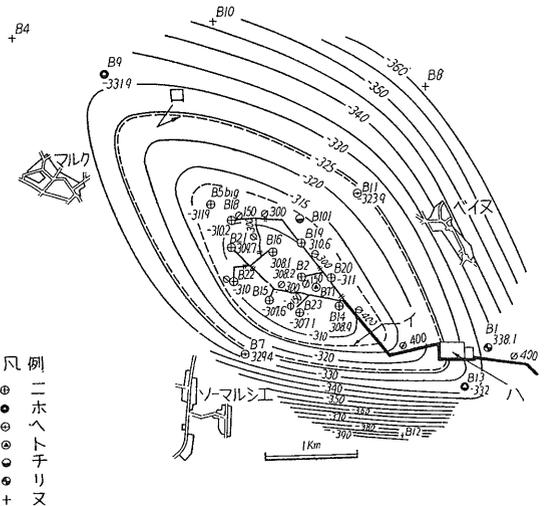


第3図
種々のトラップ
(石油技術協会, 1983)

え、かつ逃がさないような貯蔵に好適な地下のトラップ(封塞構造)がある。トラップとは、間隙率が高く浸透性の好い貯留岩の周囲または上方を難浸透性のキャップロック(帽岩)が覆っていて、地下水より比重の軽いガスや油が逃げられないような地質構造である(第3図)。貯留岩は、細密な空隙が多い砂岩や石灰岩などの岩体で、空隙の合計容積が全容積の数%から時には30%以上もあり、大量の流体を蓄えられる。

日本においても1969年以来新潟県の関原ガス田で天然ガスの貯蔵が行われている(牧, 1973)。既存のガス田ではなくても、ガスの貯蔵に好適なトラップ構造があれば、天然ガスの貯蔵を行うことができる(第4図)。

1976年の米国の天然ガス地下貯蔵所386個所の内訳は、1)ガス田302個所、2)油・ガス田18個所、3)油田7個所、4)帯水層(地下水層)53個所、5)その他(岩塩層・炭鉱)6個所であった(石油技術協会, 1983)。既存ガス田を利用したものが多いが、帯水層への貯蔵も全貯蔵量の約22%を占めている。



第4図 帯水層への天然ガス貯蔵の例、フランス、ベルサイユ付近(金原, 1960)。地下等高線は、ウィルデン砂層上面の深度(m)を示す。

6. CO₂の地下貯蔵

分離・回収したCO₂の状態によって最適な処分方法は当然異なる。炭酸カルシウムのような安定な固体であれば、埋め立てやごく浅い埋設で十分であるし、土壌改良やセメントなどの半永久的な利用法も

期待できる。しかし、同じ固体でもドライアイスの場合は、かなり深部地下空洞内に低温貯蔵する必要がある。シャーベット状(ハイドレート)の場合は、深さ・温度共に条件がやや緩やかになる。固体に吸収させた場合は、その安定度に応じた深度の地下空洞に貯蔵できると思われる。

地下空洞への貯蔵は、天然の洞窟や鉱山等の既存の空洞が利用できないと掘削コストの負担が大きいため、日本には安価に空洞を作れる岩塩層がないので、経済的な無人掘削技術の開発が必要である。軟岩中の無人掘削技術は、都市域大深度地下空間開発や圧縮空気貯蔵のために研究開発が進められているので、その成果が待たれる。

7. 枯渇油田・ガス田への CO₂ 地中貯留

天然ガスや石油は、地下の岩層中の微細な空隙に、数百万年・数千万年の長期にわたり蓄えられていたものを、現在採取して使用している。天然ガスや石油を蓄えていた貯留岩は、細密な空隙が多い砂岩や石灰岩などの岩体で、空隙の合計容積が全容積の数%から時には30%以上もある。天然ガスや石油の鉱床には、貯留岩の周囲または上方を難浸透性のキャップロック(帽岩)が覆った封塞構造(トラップ)があり、地下水より比重の軽いガスや油を閉じこめておくことができるようになっている。

枯渇したガス田や油田に CO₂ を流体状(気体、液体、または水溶液)で圧入する方法は、コストと確実性から有望な貯留法と考えられる。ガス田や油田は、天然ガスや油田ガスを数百万年以上もの長期にわたって貯留してきた。既に天然ガスの貯蔵に大規模に利用されているように、ガス田や油田のトラップには気体や液体を長期貯蔵する能力が元来備わっている。粘度や比重が高く不燃性で毒性も小さい CO₂ は、メタンを主体とする天然ガスよりむしろ容易に長期貯蔵ができる。

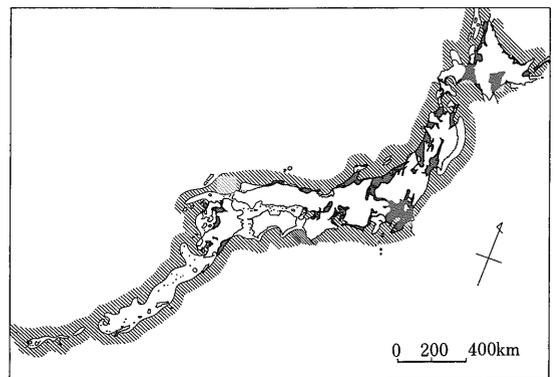
地下深部に存在する流体には、通常、地下水面からの深さに応じた水頭圧が加わっている。天然ガスや石油のようにトラップ中に閉じこめられた流体にはもっと大きな圧力が加わっていることがあるが、地表からの深さと同深度の海中の水圧と同程度の圧力が加わっていると考えてほぼ間違いない。例えば、深度1,000 m で約100気圧、深度2,000 m で約200気圧の「静水圧」が加わる。CO₂ も静水圧以上の圧力を加えないと、所定の深度に圧入できない。気体の場合は、同一温度であれば圧力にほぼ反比例して圧縮される。従って高圧で圧入した方が貯蔵可能量が多くなるが、静水圧の約2.5倍程度で岩圧に近くなるので、ほぼ限界になる。

枯渇したガス・石油鉱床でも、通常、多量の石油や天然ガスが採取できずに残されている。しかし、単に CO₂ を圧入するだけでなく、汲み上げも行って強制的に入れ換える方法を取れば、残存する石油や天然ガスの採取ができ、エネルギー資源の有効利用にも役立つ。実際に、油田からの原油の回収率をよくすることを目的として、油層に炭酸ガスを圧入する原油増進回収法(EOR)の開発も進められている(石油技術協会, 1983)。

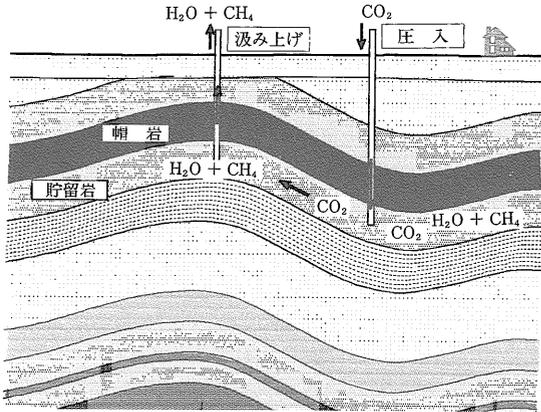
しかし、日本の天然ガス・石油資源は埋蔵量が少なく、しかも新潟県や秋田県などに偏している。遊離性天然ガス田では日本で最大級の新潟県の吉井・東柏崎ガス田でも可採天然ガス埋蔵量としては120億 m³ にすぎない。通常天然ガス・油田だけでは、日本の膨大な CO₂ 排出量に対応できる十分な貯蔵量は期待できない。

8. 地下塩水・化石水層への CO₂ 地中貯留

天然ガスや石油鉱床の下方や周辺には、油田水やガス田水の層が広がっている。油田水やガス田水は塩水であり、主に母岩堆積当時の海水が閉じこめられた化石水である。海水が閉じこめられた化石水を含む帯水層は、油田地帯以外の沿海堆積盆地の地下にも広く存在するが、塩水であるため、通常の水資源として利用できない。このような化石水には、堆積物や海水に含まれていた有機物に由来するメタンが含まれており、水溶性天然ガスとして採取される事がある(第5図)。商業的に稼行されている水溶



第5図 水溶性天然ガス鉱床のおよその分布範囲(石油技術協会, 1983)

第6図 廃ガス田へのCO₂圧入概念図

性ガス田は、千葉県・新潟県・宮崎県に限られているが、メタンに富む化石水は日本だけでなく世界全体の堆積盆地に膨大に存在する。

CO₂はメタンに比較して水に溶解し易く、同じ温度圧力条件下では10倍以上溶け込む。したがって、メタンに富む地下水中には、CO₂を大量に溶解させる事が可能である。そこで安全性・経済性・貯留量の各面から最も有望なCO₂貯留法として、メタンを溶存する化石地下水を汲み上げ、代わりにCO₂を圧入する技術を提案する(第6図)。

一般に、圧力が高いほど気体は水に多量に溶解する。鍵となるCO₂の水への溶解度については、別報告を参照されたい(飯島ら, 1993)。地下水中に溶解したCO₂は、岩石中の珪酸塩鉱物や炭酸塩鉱物と反応し、炭酸水素イオンHCO₃⁻となり、Ca²⁺やMg²⁺などの陽イオンを溶出する(北野・中村, 1973)。これは中和反応であり、地下水の酸性化を抑制すると共に、CO₂を安定に地下水に溶解させる効果がある。地下水がアルカリ性になると一部はCaCO₃などの炭酸塩として沈澱することが期待される。

日本の水溶性天然ガス(主にメタン)の埋蔵量は約8000億m³(1気圧15.6°C)と試算されている(地質調査所, 1980)。CO₂はその平均15倍程度溶解し得るとすれば、天然ガスを回収して、水溶性天然ガス田だけでも約12兆m³(約240億トン)以上のCO₂を貯留できる(第1表)。これは日本のCO₂排出総量(1987年)の約30年分である。

世界の堆積盆地の分布は、石油や天然ガスの探査などでよく知られている。CO₂を圧入する深度は、

第1表 日本の水溶性ガス田へのCO₂地中貯留可能量
〔地質調査所(1980)による水溶性ガス埋蔵量の15倍の容量を貯留できるとして試算した。〕

地域名	水溶性ガス埋蔵量 (×100万m ³)	CO ₂ 貯蔵可能量 (×100万トン)
北海道	1,108	33
東北	896	27
関東	684,324	20,294
中部	124,099	3,680
近畿・中国	445	13
九州	34,950	1,036
沖縄	41,430	1,229
日本全国	887,252	26,312

2~3000 mまでとし、利用可能な面積を全堆積盆地の1%と仮定しても、世界で3200億トン以上のCO₂の処理が可能と見積もられた(田崎, 1993)。これは世界のCO₂排出量の約15年分になる。

大量のCO₂を処理するためには、経済性が重要である。日量5000トンのCO₂を地下に圧入するシステムを想定し、コストを検討してみた(田崎, 1993)。圧入井・排水井・パイプライン・ポンプシステムなどの設備費は総額460億円となり、ランニング・コストや償却費や補修費も加えた総圧入コストはCO₂1トン当たり約3,000円になった。また、エネルギー・ロスとして、地下圧入のための電力をトン当たり82 kWh消費する。しかし、CO₂1トン圧入にたいし汲み上げられる地下水から平均約0.025トンのCH₄を回収できるとすれば、このCH₄から熱効率40%として149 kWhの発電ができ、電力ロスをほぼ賄う事ができる。火力発電による排ガス中のCO₂を地中貯留するためには、圧入コストの他にCO₂分離回収のためのコストを要する。アミン吸収法による分離回収をすると、分離回収と圧入を合計した総処理コストはCO₂1トン当たり約7,600円となると試算された。

火力発電による排ガス中のCO₂を分離回収し、地中貯留すると石炭火力で60%、石油火力で45%、LNG火力で35%発電コストが上昇する(第2表)。これは試算であるが、処理コストとエネルギー・ロスの両面から、経済的に実現可能な技術であると考えられる。

第2表 CO₂地中貯留による発電コストへの影響

	発電原価	CO ₂ 処理コスト	発電コストの増加
石炭発電	10円/kWh	6.0円/kWh	60%
石油発電	11円/kWh	5.0円/kWh	45%
LNG 発電	10円/kWh	3.5円/kWh	35%

9. ま と め

CO₂を長期にわたり貯蔵あるいは貯留して置く場所は、海中か地中しかありえない。地中は、海中に比べて、岩盤が障害になる事があるが、他方漏洩や急激な突出を防ぐ効果がある。地中貯留、すなわち枯渇した天然ガス・油田、水溶性天然ガス田、帯化石水層にCO₂を圧入する技術は、容量・コスト・エネルギー消費量・環境保護のいずれの面でも有望であり、地球温暖化対策として実効性のある技術として期待できる。本技術は、未利用になっている水溶性天然ガスの回収という副産物も期待でき、一石二鳥の技術である。すなわち、二、三の地域を除いては経済的に利用困難な地下水中に溶存する天然ガスを動力源としてCO₂を地下に圧入するので、エネルギー資源をロスせずにCO₂非排出火力発電を実現できる。CO₂地中貯留技術の長所と短所を要約すると以下ようになる。

地中貯留の長所

- 1) 環境への影響が少ない：
地下であるので、生物圏に直接影響がない。
地盤沈下対策にもなる。
- 2) 安全性が高い：
岩盤に守られているため、災害に強い。
- 3) 経済性が高い：
距離が比較的短い所で処理でき、液化の必要がない。
- 4) 未利用の天然ガス資源を利用して圧入するためエネルギー資源のロスが少ない。
- 5) 内陸部でも利用できる。
- 6) SO_x や NO_x も処理できる可能性がある。

地中貯留の短所

- 1) その場所の地質条件に左右される。
- 2) 地下におけるCO₂の挙動が未解明の部分がある。

3) 新提案なので知名度が低い。

本技術が開発されれば、天然ガス特に水溶性天然ガス田は、CO₂を吸収する量の方が多くなり、環境貢献型の資源になる。しかし、環境への影響を確認しながら、技術開発を進めるため、まずトラップが完全なことが確認されている地質構造への試験的貯留を実施し、徐々に適用範囲を拡げていくべきであろう。

文 献

Berner, R. A. and Lasaga, A. C. (1989) : 地球科学的な炭素循環モデル(脇田 宏訳)別冊サイエンス93, 破壊される地球環境, 日経サイエンス社, 18-26.

地質調査所(1980) : 日本および世界における水溶性天然ガスの分布と鉱床の概要. 天然ガス鉱業会編 : 水溶性天然ガス総覧, 1-24.

福田 理(1973) : 炭酸ガス. 今井秀喜・河井興三・宮沢俊弥編 : 日本地方鉱床誌「関東地方」, 朝倉書店, 449-460.

飯島正樹・伊藤和逸・堀添浩俊・野口嘉一・田崎義行・進藤勇治・小出 仁(1993) : CO₂の溶解度特性. 地質ニュース, 462, 32-35.

Katz, D. L. and Tek, M. R. (1981) : Overview on underground storage of natural gas. Jour. Petroleum Technology, 33, 943-951.

金原均二(1960) : ガスの地下貯蔵. 石油学会誌, 3, 187-192.

北野 康・中村誠佑(1973) : 山崩れと水質. 施工技術, 6, 7, 17-23.

久保寺 章(1991) : 火山噴火のしくみと予知. 古今書院, 184p.

小出 仁(1990) : 地中へのガス状廃棄. 小宮山宏監修 : 地球温暖化問題ハンドブック. アイビージー, 345-347.

小出 仁(1992) : 放射性廃棄物地層処分と地質長期未来予測. 地質ニュース, 449, 51-54.

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) : 地球温暖化問題ハンドブック, アイビージー, 647p.

公害資源研究所編(1990) : 地球温暖化の対策技術. オーム社刊, 329p.

牧 康行(1973) : 天然ガスの地下貯蔵. 石油技術協会編 : 日本の石油鉱業と技術, 409-421.

野口嘉一(1993) : CO₂対策技術の動向. 地質ニュース, 463, 21-31.

石油技術協会編(1983) : 石油鉱業便覧. 石油技術協会, 779p.

資源エネルギー庁編(1992) : 資源エネルギーデータ集 1992年版. 電力新報社, 143p.

進藤勇治(1992) : 二酸化炭素のオンサイト回収技術. クリーンエネルギーのフロンティア, CEI, 191-216.

進藤勇治(1993) : CO₂対策研究の現状. 地質ニュース, 463, 13-20.

田崎義行(1993) : CO₂の地中圧入システム. 地質ニュース, 463, 36-40.

湯原浩三・瀬野錦蔵(1969) : 温泉学. 地人書館, 293p.

KOIDE Hitoshi (1993) : Underground sequestering of CO₂: Concept and possibility.