

二酸化炭素の地中貯留

大隅 多加志

財団法人電力中央研究所 地球工学研究所 客員研究員

〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646

Underground Storage of Carbon Dioxide

Takashi OHSUMI

Civil Engineering Research Laboratory

Central Research Institute of Electric Power Industry

1646 Abiko, Abiko-shi Chiba-ken 270-1194

Abstract: CO₂ storage in aquifer is an established technology, but we may feel that the acceptance of the technology could be the key. Even high cost mitigation options such as solar voltaic or wind energy for the reduction of CO₂ emission have some difficulties in their public acceptance, when their scale becomes large. If the storage site is near to the densely-populated area, the key to the acceptance is the occupancy area of the energy system. In this point of view, the terrestrial storage option as solid-CO₂ near capture plants is revisited.

Keywords: aquifer storage, solid-CO₂, photovoltaic, wind turbine

1. 二酸化炭素隔離技術全体における地中貯留

二酸化炭素回収貯留技術 (Carbon dioxide Capture and Storage)の頭文字をとってCCSと略されるようになってくる)は、化石燃料を使い続けるものの二酸化炭素 (CO₂)を大気に排出しないための技術である。文字面には二酸化炭素の回収とあるが、100%近い濃度の二酸化炭素を工程上のどこかで得るようにすることが必須とは限らない。IPCC (気候変動に関する政府間パネル) の「二酸化炭素回収貯留」特別報告書[1]の構成は、まず回収 (capture) 技術の章があり、ついで地中貯留と海洋隔離というstorageに関する各章がある。そのため、回収が前提でそれをどのようにして大気以外の場所に大量に隔離するのかという技術の開発が、CCSの中心課題であるかのような印象を与える。しかし、IPCC特別報告書には第7章「Mineral carbonation and industrial uses of carbon dioxide」が編まれ、回収した二酸化炭素の隔離という目的に対して並行的なパスを実現する技術の検討も実施されているのである。

この特集号でも飯島氏がEOR技術について寄稿している。CCSという用語が定着する10年以上前には、多くの関係者が、EOR技術があるから回収の技術の適用が進むというシナリオを考えていた。石油増産のための既存技術としてEOR技術が存在し、回収された二酸化炭素の貯留ないし隔離は、EOR技術に対して付随的に達成されるものという考え方である。欧州でのCCS技術をリードしてきたノルウェーのErik Lindeberg博士は、当時の発想を振り返って、北海油田へのEOR適用が結果的に地球温暖化防止対策技術になるのだと、彼が1980年代後半に主張しはじめたのが欧州CCS事始めであったと回顧している。

しかし、その後「CCS技術とは、二酸化炭素排出削減のために積極的に採用すべき化石燃料利用技術」という位置づけに明確にシフトした。そこで将来有望な化石燃料利用技術を多様に想定して、各種CCS技術(膜分離・化学吸収、CO₂回収型燃焼技術、石炭ガス化CO₂分離、MCFC燃料電池を用いたCO₂分離、水素製造にあたってのCO₂分離など)を開発しようとする試みが精力的に開始された。

上記の研究開発投資の事実は、CCS技術が現状のままでは適用が困難なものであることを意味するものではない。現状で、CCS技術に期待が高まっているのは、二酸化炭素の貯留場所として、たまたま地中が適していると信じる技術的実績や証拠が集まってきていて、それを欧州が二酸化炭素排出削減への手段として位置づけているからである。

世界でも日本でも、地中貯留の多くの適地が同定されていると主張され、その貯留容量は、総計では、CCS技術に今後期待されている容量(世界が必要とする二酸化炭素排出削減量にとって有意な量)を十分に達していると評価されている。しかし、これらを現実のものとして実現するには、人類にとって未経験の大規模なプロジェクトが多数必要とされ経験を積む必要がある。しかも、それらが世界各地で同時並行的に実施される必要もある。これらが早急に可能でないとすると、CCS技術の二酸化炭素排出削減技術としての有効性には早晩、疑問符がついてしまうにちがいない。そんな段階にわれわれは到達してしまった。

さらに、人々は二酸化炭素回収の技術開発には興味を示すものの二酸化炭素地中貯留の実用化には躊躇しているかのようである。前述のように、10年前までの「二酸化炭素の回収と地中貯留」技術のセットでの導入についての標準シナリオは、「二酸化炭素は石油増産のための有価物(EOR技術に必須の原料)」であるとの考えに基づいていたはずである。しかし、新しいシナリオでは、二酸化炭素は「廃棄物」である。「こんな大量の廃棄物をnot in my backyard という拒否反応をおこさせることなく、はたして人々はスムーズに受け入れるのだろうか？」という躊躇に対して、本稿では、「二酸化炭素は隔離すべき『廃棄物』」ではない。「貯留」というあいまいな用語でなく、storage = 貯蔵だとする考え方を見直してみたい。

以下、大規模な二酸化炭素地中貯留を実現しようとする欧州での具体的な提案を紹介し、読者に二酸化炭素地中貯留が現実性のある企図であることを理解いただく一助としたい。さらに、わが国でも、同様のシナリオが可能であるのかを考えるために、ドライアイス敷地内貯蔵というドラスティックな提案に、再度、光をあててみたい。

2. 欧州での二酸化炭素地中貯留提案

第9回温室効果ガス制御技術国際会議 (GHGT-9, The ninth Conference on Greenhouse Gas Control Technologies)

が、2008年11月、米国Washington, DCで開催された。この会議は、1992年オランダのユトレヒト大学Turkenberg教授が、その第1回会合を開催した「二酸化炭素除去国際会議 (ICCDR, International Conference on Carbon Dioxide Removal)」を引きつぐものであり、冒頭で紹介したIPCC特別報告書が参照する数々の研究は、この会議シリーズ(現在のGHGTという名称になったのは、スイスのインターレーケンで1998年の9月に開催された第4回会合からである)で発表されたものが多い。

2008年7月の主要国首脳会議(洞爺サミット)で示された先進各国の長期的な二酸化炭素排出削減の目標設定では、CCS技術(それも地中貯留技術)の将来的な大幅導入が組み込まれていた。そこで筆者は、各国が具体的な二酸化炭素地中貯留計画をどこまで詰めているのか、GHGT-9で各国の旧知の研究者たちから、その進展が聞けるものとの期待をもって出席した。

会議で示された、もっとも説得力のある二酸化炭素貯留計画は、ある意味では残念なことではあるが、既存プロジェクトの拡大版と称すべきものであった。その計画は以下のようなものである。Erik Lindebergら[2]の圧入二酸化炭素の地中圧入シミュレーション対象地層は、北海に広がる中新世の砂岩堆積地層であるUtsira層(南北およそ500km、東西およそ50km)であり、その面積は25 000 km²。Utsira層の南端には、1996年から年間100万トンの規模でのCO₂圧入が実施されているSleipnerガス田が位置している。彼らが示しているシミュレーションの1例では、対象層に対して、14 kmメッシュの方眼状に250坑の圧入坑井を配置、同数の水抜き井戸を各方眼の中心に掘削する。このケースでの圧入二酸化炭素量の総量は、毎年1億5000万トン(1坑井あたり年間圧入量は60万トン)である。発表会場で議論を呼んだのは、水抜き井戸から汲み上げられた深部塩水の廃水処理問題である。一体として取り扱える理想的な大規模貯留対象層であるUtsira層について、その内部圧力が過剰となりキャップロックのシール能力を損なうことのないよう、水抜き井戸は必須と判断されるシミュレーション結果である。圧入二酸化炭素の貯留対象層内での密度を500 kg/m³とすれば、250坑の水抜き井戸からの塩水汲み上げ量の総計は年間7500万m³となる。北海に新たな環境問題を惹起することをどう考えるのかという提起であった。

なお、この例では、年間1億5000万トンの二酸化炭素を削減するために、地球表面に投影して、25 000 km²に人

間の手をくわえることになる。二酸化炭素年間削減量100万トンあたり、167 km² という数値となる。

3. 二酸化炭素の隔離手法 と自然改変の規模

どんなエネルギー技術でも社会受容が困難であれば、導入される可能性は低い、限定的にとどまる。そして、二酸化炭素の回収技術においても規模の経済を追求してゆけば、その輸送手段や貯留サイトは、社会的な露出が大きくなり、社会的な受容の問題がイシュー化しやすくなる。ここでは、分散型エネルギーシステムに合致した分散型の二酸化炭素回収貯留技術は、コスト的に、また既存のエネルギー供給インフラの慣性が大きい(過去の投資を無駄にしたくない)ため、成立しにくいものとして議論を進めている。

さて世界各国で、風力発電システムも、太陽光発電システムも、規模の拡大を追求しつつ、社会的な受け入れの困難に直面しつつあるように思われる。CCSでも、前節で紹介したように、意味ある二酸化炭素削減量を追求しようとすれば、人々に脅威を与えるかもしれない規模になることを覚悟する必要がある。

「CO₂年間削減量100万トンあたり、167 km² の面積が必要」という前節での数字に触発されて、次節では、CCS技術体系の中で、最小の規模での貯留の態様について考察したい。ちなみに、二酸化炭素海洋隔離のうち、(深海底貯留=いわゆる"lake type"ではなく)溶解型と呼ばれる方法では、海洋の面積3.1億 km² のすべてを用いて、人類の二酸化炭素排出量の総量である年間260億トンについてCCSが適用可能であることを主張している。これは、「CO₂年間削減量100万トンあたり、12000 km² の面積が必要」ということを意味する。

4. 二酸化炭素の敷地内貯蔵

原子力エネルギー利用においては、高レベル廃棄物の処分に関してまだ十分な社会的受け入れが果たされていない。この技術分野では、「長期間にわたり放射能のレベルが高いため、人間の生活環境に影響を及ぼさないように長期にわたって確実に隔離することが必要となります。限られた期間であれば人間が地上で管理することは安全上全く問題ありませんが、長期にわたると、管理が途絶えた場合についても考える必要があり、この場合安全を保証す

ることは難しい」(原子力発電環境整備機構のホームページより)との考え方が確立されている。化石燃料利用の場合は、化学結合のエネルギーを解放してエネルギーとして利用する。得られるエネルギーの密度は、電圧の単位にして数ボルト(エネルギーの単位としてはeV)である。核エネルギー利用は、数MeVというエネルギーが解放されるため、原子力利用の放射性廃棄物についてはその量が10⁵~10⁶分の1という少量で済むことになる。量が少ないことも廃棄物管理を可能とする要因であろう。

さて、1990年代の初頭に、地球温暖化問題のエネルギー技術からの解決策に思索をめぐらせていた原子力工学の専門家であるWalter Seifritz博士(スタットガルト大学およびポール・シェラー研究所)は、二酸化炭素については、地上管理が成立することを指摘している[3]。彼が水素エネルギー研究においても著名であることを知っている本誌の読者もおられることであろう。彼の提案は、ドライアイスとしての地表に積み上げるアイデア(図1)である。

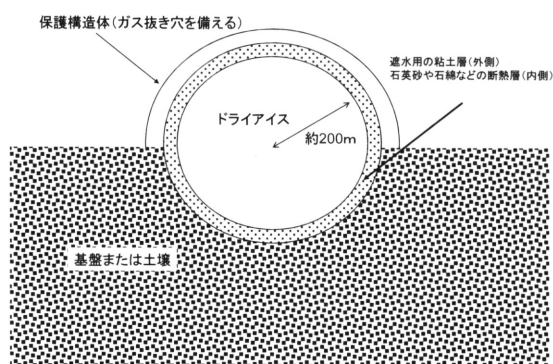


図1 Seifritzが提案した球体ドライアイス貯蔵庫
(5200万トンの容量)

一面ではこの方法が貯留の本質を突いているのは、以下の点である。

- 二酸化炭素貯留が大気からの完全な隔離を実現する必要はない。 — IPCCの特別報告書でも、二酸化炭素の地中貯留についてサイト(貯留地点)の保持率の議論を展開している。読者は、「サイトが適切に選定され、設計が行き届いた場合、100年で99%以上の保持率を達成するという判断は、かなりの程度(90~99%)で、確実である」という文言が特別報告書に現れていることを聞いたことがあるだろう。

- 高レベル放射性廃棄物と異なり、地球上の生命と親和性の高い物質である二酸化炭素であるから、人間の生活圏の近傍でも十分に管理可能であることを効果的に示すためには、よい頭の体操である。

真剣に、このアイデアを取り上げてみよう。筆者が、かつてSeyfritzの議論を紹介[4]したときは、彼の考え方が空想的であることを際立たせるつもりで、現代のピラミッドというキャプションをつけて、彼のポンチ絵を図1のように紹介した。その後、この隔離選択肢についてはリスク管理や工法の観点からの実用可能性評価研究が、国際エネルギー機関の温暖化ガスR&Dプログラム (IEA GHG R&D Program) で実施されたと聞いている。本稿では、その要点を紹介することはできないので、日本では馴染み深い建造物を引き合いに出そう。人々がイメージしやすい大規模構造物である東京ドームとの比較である。東京ドームは建築面積4万7000m²であり、ドームの内容積は124万m³。ドライアイスの密度1.56トン/m³を用いれば、東京ドーム規模のドライアイス貯蔵施設には、193万トンの二酸化炭素が貯蔵できる。図1のピラミッドを作るよりも、効率的で安全な構造物になりそうではないか。

以上の数値を用いて、CO₂削減に必要な面積をメガソーラー発電 (大規模太陽光発電所) ウインドファーム (大規模風力発電所) との比較として日本でのケースを、表1に示した。

表1. CO₂削減に必要な面積

	太陽光 がソーラー	風力 発電	CCS (石炭火力)	
			敷地内 貯蔵	帯水層 貯留
1基あたり設備容量 /kW	1万	1000	100万	100万
年間発電量 /kWh	1000万	175万	60億	60億
年間削減CO ₂ 量 ¹⁾ (トン)	6750	1180	600万	600万
敷地面積 ²⁾ /km ²	0.1	0.062	3.8	43
必要面積 (年間削減量100万 トンあたり)	14.8	52.5	0.61	7.2

注1) 太陽光・風力発電とも、火力平均二酸化炭素排出係数 (2000年度値) である 0.675 kg/kWhを用いて算出した。

注2) 太陽光の場合は最近発表されているメガソーラー計画を参照、風力発電の場合は資源エネルギー庁が用いているデータ。CCSについては25年分の二酸化炭素処分量である1.5億トンを地上貯蔵ないし地下貯留するために必要な地表の面積 (論拠は本文を参照)

CCSの場合、現時点で世界の主流の考え方になっているのは帯水層貯留である。先に、北海の大規模貯留の構想における数値「二酸化炭素年間削減量100万トンあたり、167km²」を示した。日本では、大規模発生源近傍での、なるべく地中帯水層を効果的に利用する必要があるだろう。典型的には、圧入坑井から同心円状に超臨界二酸化炭素が広がってゆくことが期待され、適当な仮定をおいて、わが国で、堆積盆1km²あたり350万トンほどの貯留容量を見積もっている例[5]がある。表1にもこの数字を用いた。

5. まとめ

本稿では、地中貯留に必要な面積という観点から、二酸化炭素削減技術としてのCCS地中貯留技術の特徴について解説した。

本文中で、二酸化炭素削減費用については触れなかった。表1での規模での発電設備について計算すれば、太陽光発電の導入によれば、二酸化炭素1トン削減するために3万円程度 (kWあたりの建設費50万円と仮定)、風力発電では1万円程度 (kWあたりの建設費30万円と仮定) となる。これに対して、石炭火力発電所の排ガス脱炭と帯水層貯留というCCSシステムでは、二酸化炭素1トン削減の費用として7000円～8000円という推算が提出されている。経済的にも、また容量的にも、二酸化炭素地中貯留が、スタンバイ状態にある技術選択肢として、有望であることが理解いただけたと思う。

6. 付論: 液化CO₂製造と比較したドライアイス製造の所要エネルギーの増分

二酸化炭素の回収プロセスとして、100%近い濃度の常圧で40℃ほどの気体が得られるとすると、ここを出発点にして液化炭酸の製造エネルギーを算出することはできない。この液化プロセスについては既存の検討例が、すでに整理[1]されている。それらによると二酸化炭素液化に要する動力は、二酸化炭素1トンあたり100～120kWh程度のものである。

ドライアイス製造では、CO₂のエンタルピー線図から、-33℃の液化炭酸からは、-79℃の常圧気体とドライアイスとが等量だけ断熱膨張で得られることがわかる。大容量の液化炭酸の貯槽圧力容器の固定設備は不要になる点、ドライアイス貯蔵のトータルコストは有利になる。

液化のためのコンプレッサーや冷凍機動力が動力原単位を構成しているのであるが、ドライアイス製造では上述のようにプロセスの半量は -79°C の気体から出発すると考えることができるから、動力原単位は、ドライアイスの場合、液化の2倍にはならない。概算ではあるが、 $185\sim 220\text{kWh}/\text{トンCO}_2$ と見積もられる。

参考文献

1. IPCC: *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage* Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate change [Metz, B, O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)], Cambridge University Press Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2005, 442 pp.
2. Erik Lindeberg, Jean-Francois Vuillaume, and Amir Ghaderi: Determination of the CO_2 storage capacity of the Utsira formation. presented at Technical Session 11, GHGT-9, 2008.
3. Seifritz, W.: The terrestrial storage of CO_2 as a means to mitigate the greenhouse effect, In C.D.J. Pottier and T.N. Veziroglu (eds.) *Hydrogen Energy Progress IX*, 59-68 (1992)
4. 大隅多加志 二酸化炭素は隔離できるか 科学63巻17-21 (1993)
5. 大隅多加志ほか 大規模排生源近傍における二酸化炭素地中貯留の可能性 電力中央研究所研究報告書N06035 (2007)