

二酸化炭素地中貯留に関する実験展示の開発

Development of a permanent exhibit visualizing the mechanism of carbon dioxide underground storage

西本昌司*

NISHIMOTO Shoji

1. はじめに

温室効果ガスである二酸化炭素排出量を、省エネだけで削減するのは限界があると言われる。自然エネルギーの開発もすぐにできることではない。そこで、当面、排出量削減の鍵とされているのが、二酸化炭素隔離貯留技術（CCS=Carbon Capture and Storage）^{1),2)}であり、発電所や天然ガス鉱山など大規模な排出源で発生するガスから二酸化炭素を分離・回収し、大気から長期間隔離する技術をさす。CCSの中でも注目されているのが、地中貯留である。IPCC特別報告書「Carbon Dioxide Capture and Storage」(2005)においても有用な技術であると評価され¹⁾、北海道洞爺湖サミットでも大規模なCCS実証プロジェクトを開始されることが支持された³⁾。

CCSについては新聞などで取り上げられるようになってきたが、なぜか一般にはあまり知られていないようである。今後、この技術開発を進めるためには、関連知識を持った人材が求められるとともに、一般市民の理解が必要であるにもかかわらず、二酸化炭素地中貯留を科学教育施設で取り上げている展示はほとんど見られない。

このような背景のもと、名古屋市科学館改築に伴う新展示設計において、地球温暖化問題に取り組むフロンティア研究として、二酸化炭素地中貯留を取りあげることとした。地下環境において二酸化炭素が閉じ込められるメカニズムを知っていただくことで、その現象自体に興味を持ってもらうだけでなく、関連する分野の普及にも活かすことができると考えた。そこで、地下での流体挙動を可視化することで、二酸化炭素貯留のメカニズムを見ることができるとして世界初の展示を開発した。本文では、展示企画から設計における取材などで得てきた知見とともに

に、新たに開発した二酸化炭素貯留実験装置の機構と展示手法について報告する。

2. 二酸化炭素地中貯留の方法

地下貯留は、地下環境における流体挙動を利用して、次のような方法が考えられている¹⁾。

(1) 帯水層貯留

分離・回収したCO₂をタンカーやパイプラインで輸送して、地下の帯水層（粒子間の空隙が大きい砂岩などからなり、水あるいは塩水で飽和している地層）へ圧入し貯留する。将来の貯留可能量が大きいと期待され、地中貯留のなかで最も有望視されている。

(2) 石油・ガス増進回収（CO₂-EOR）

分離・回収したCO₂を石油・ガス層へ圧入し、それによって石油・天然ガスの回収を促進するとともにCO₂を貯留する⁷⁾。回収された石油・天然ガスは発電所などで利用する。

(3) 枯渇油・ガス層貯留

分離・回収したCO₂を枯渇した石油・ガス層へ圧入し、それによってCO₂を貯留する。

(4) 炭層固定

分離・回収したCO₂を地中の炭層へ注入し、それによってメタンの回収を促進するとともにCO₂を吸着貯留する。回収されたメタンは発電所などで利用する。

これらの二酸化炭素地中貯留が実用化できれば、地球温暖化対策として有望な技術になると思われるが、地下における二酸化炭素の挙動には未だ不明の点が多く、地下深部において二酸化炭素がどのように地下に封じ込められるのか、岩石とどのような反応が起こるのか、地表への漏洩はないのかなど、実際のところは解明すべき課題も残っている。我が国

*名古屋市科学館学芸課

においても、2000年から2008年にかけて新潟県長岡市において、地球環境産業技術研究機構（RITE）などが主体となり、計1万トン以上のCO₂を地下約1,100mの帯水層に圧入する実験が行われており、複雑な地質条件の日本においても二酸化炭素地中貯留が可能なが示されている⁴⁾。また、日本においては、いわゆる大規模排出源の多くが新生代の帯水層を持つ堆積層上に立地していることから、不透水層の下に空隙率の高い帯水層が存在すれば可能である残留ガストラップ（後述）の活用が注目される。

3. 地下でガスがトラップされるメカニズム

地中で二酸化炭素がトラップされるメカニズムとして、物理（構造）トラップ（physical trapping）、残留ガストラップ（residual-gas trapping）、溶解トラップ（Solubility trapping）、鉱物トラップ（mineral trapping）の4つが考えられている⁵⁾。

物理トラップは、泥質岩層のような不透水層（キャップロック）の下部など、物理的に貯留される地質構造によって二酸化炭素が閉じ込められるメカニズムである。残留ガストラップは、多孔質な帯水層の地下水においてガスが粒子の間隙などの隙間に閉じこめられるメカニズムである（図1）。溶解トラップはガスが地下水に溶解することで、除去されるメカニズムである。鉱物トラップは岩石との反応により炭酸塩として固定されてしまうメカニズムである。効率的な鉱物トラップのため、高温の地下深部花崗岩体や蛇紋岩にCO₂溶解水を注入させることも検討されている^{6),7)}。

最終的には、長期にわたり安定的に貯留できるような鉱物トラップされるのが望ましいが、これには時間がかかりすぎるため、残留ガストラップと物理トラップを活用し、その後、地下水に徐々に溶解させて、最終的には鉱物として固定することが考えられる⁸⁾。

4. 実験装置のしくみ

本展示で見せようとするのは、主に、地下水で満たされた地層（帯水層）中の残留ガストラップである。帯水層にガスが侵入すると、そのガスは浮力によって地層構成粒子の間隙の縫うように上昇するが、その一部が粒子の間隙で動かなくなる。これが「残留ガス」である（図1）。

帯水層におけるガスの挙動は、毛管力、濡れ性、

空隙率、透水性、ガスの注入速度などが影響すると考えられる。そこで、ガスの挙動を観察できるようにするため、粒子サイズの異なるガラスビーズを水槽内に敷き詰めた帯水層のモデルをつくり、水で満たしてから、下部より空気を注入する装置を製作することとした。この基本的なアイデアは京都大学で考案されていたものである⁹⁾。

帯水層モデルに用いたガラスビーズの粒径は1mmと2mmで、前者が透水よりも後者が透水性が大きいということになる。これらのガラスビーズで緩やかな背斜構造を水槽内につくり、下部空気より注入すると、帯水層内に気泡ができて、浮力によってガラスビーズ（堆積物粒子）の間隙を縫うように上昇するのが観察できる。そして、ところどころで気泡が動かなくなり、残留ガスができるのを可視化できるというものである。ガラスビーズの粒径が粗粒（2mm）から細粒（1mm）に変わる部分では残留ガスが溜まりやすい様子が明確に見える。とくに、背斜構造においては、粒子の細かい（1mm）の層の下側に残留ガスが溜まっていくようすがはっきりとわかる。空気の注入を続けると、そこで、この実験装置を参考にさせていただき、繰り返し実験が可能な展示装置とするための検討を行った。

5. 実験装置の設計

5-1 装置系

製作した水槽は、展示効果を上げるために従来の実験装置よりも水槽のサイズを大きくし、高さ100cm×幅60cm程度とした。加工しやすながらも強度を確保するため厚さ10mmの亚克力を用いて内寸2cmのケースの中に入れるガラスビーズの直径は1mmと2mmとした。地層モデルの上部を負圧にすることで空気を注入させた。一旦トラップされたガスだけを簡単に抜くことはできないので、下か

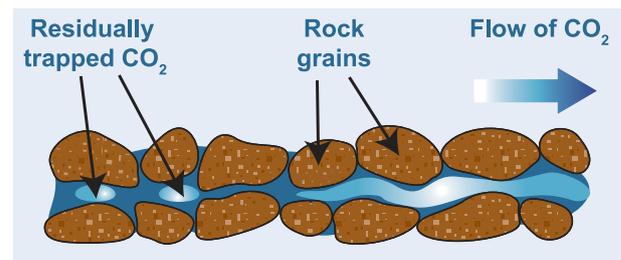


図1 残留ガストラップの模式図：二酸化炭素が帯水層中を移動するとき、堆積物粒子の間隙にガスが残留してしまう (c) CO2CRS

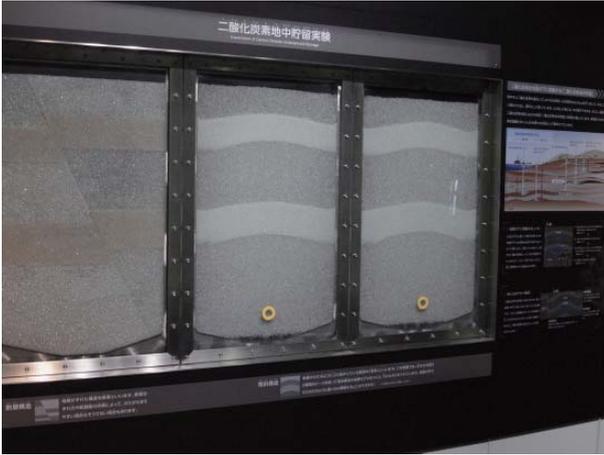


図2：展示室全景

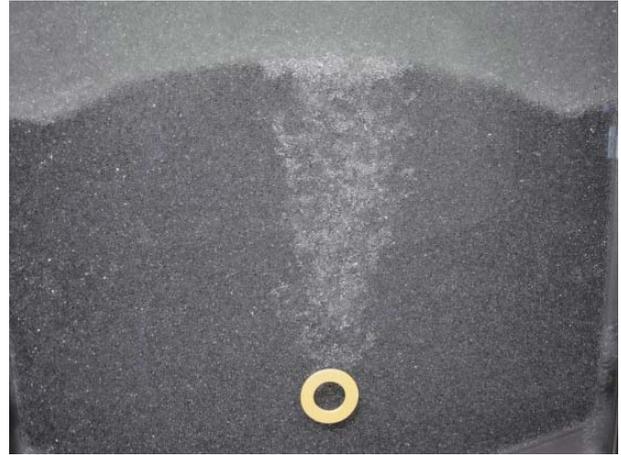


図3：実験で再現される残留ガストラップ

ら水を抜く必要がある。一定時間が経過すると、空気注入が停止し、ケース内部を大気圧に戻すことで排水を開始する機構とした。実験自体は実施可能で、残留ガスの観察は支障なくできたが、繰り返し実験を行うと、水を出し入れによって実験装置の亚克力が膨らんで湾曲し、次第にガラスビーズの地層モデルが崩れていくという現象が発生することがわかった。このため、亚克力の厚さを両面とも20mmに倍増させたが、改善されなかった。そこで次に、水槽後部壁のステンレスを用いて、ガスを圧入することで実験したところ、湾曲は軽減された。ケース内の気圧変化により亚克力板がわずかに動くとき、ガラスビーズが重量で下に沈んでいくためと考えられた。このため、ケース内を負圧にすることをやめ、ガスを圧入させることとしたところ、この現象を止めることができた。

さらに、長期展示に耐えうるかを確認するため、1ヶ月以上の連続運転を行い、長期的に運用可能であることを確かめた。

5-2 可視性

実験自体が可能であっても、展示としては良好な可視性が重要である。トラップされたガスを。そこで、水槽背面に黒いゴムシートを設置すること、模擬堆積物をガラスビーズ以外の有色の砂（クロマイトなど）を用いてみた。この結果、可視性を高めるために効果的であったのは、水槽背面に黒いゴムシートを設置すること、照明を前面から当てることであった。すなわち、背面からの光を遮断とガラスビーズの再帰反射を活用することが有効だと考えられる。これらの対策により、残留ガスの可視性が大

幅に改善された。

ガラスビーズの粒径を細かくすることでは、散乱光が増えて全体が白っぽく見えるようになり、気泡の可視性は改善されなかった。また、エア注入を間欠的に行うのではなく一定量注入する実験も実施したが、見かけ上、残留ガスのでき方に変化はなかった。

5-3 運転ルーチン

実験演示のための自動運転ルーチンを決めるにあたって、律速条件となるのは排水時間であった。水槽サイズを大きくすると、排水の間に実験を行えないため、2台の装置を交互に運転することとした。常時実験が見せられるようにするため、排水に要する時間と実験を見せる時間を同じにする必要があった。実験停止後にガラスビーズの隙間に残留する水をほとんど落としきるには9分以上かかる。そこで、粒径の細かい（1mm）層を2層つくったときに、ガス注入から上部層で残留ガスのブレイクが起こるまでに10分ほどかかるように空気注入量を調整した。

5-4 展示実験装置の仕様

これらの試行結果に基づき、最終的に設置した実験装置の仕様は下記のようにした。

- ・水槽内径：1000×600×10mm
- ・平均空隙率：約40%
- ・ガラスビーズ量：約8000g
- ・注入時間：10分
- ・注入容積：55.8ml

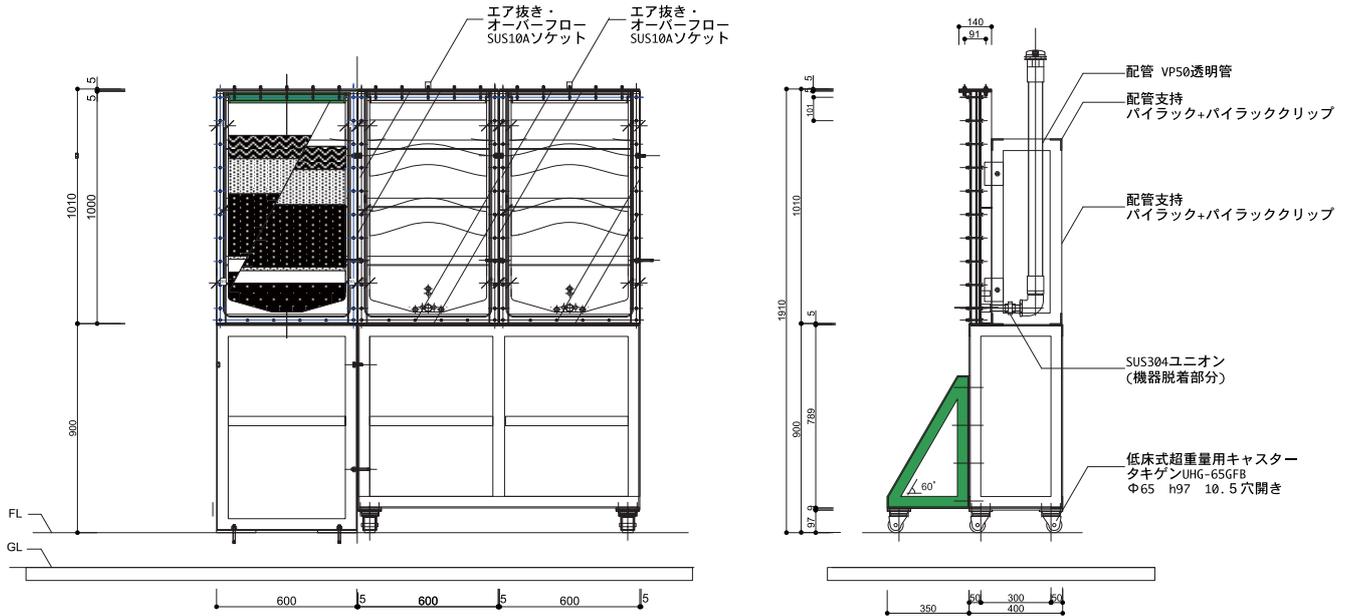


図4：二酸化炭素地中貯留実験展示設計図

8. おわりに

地下環境における流体の挙動を可視化したモデル実験装置として完成することができた。石油や天然ガスが何千万年以上も地下に存在してきたのも同様のメカニズムであるから、この展示はなにも二酸化炭素貯留に限ったものではない。ただ、今後ますます関心が高まるであろう二酸化炭素地中貯留と関連させることで、地質学と社会との関わりについての興味喚起にもつながると期待している。もちろん実際の地下環境では、帯水層の空隙率は本実験の10～1000分の1程度、地下深部において二酸化炭素は超臨界状態となると想定されているため、厳密な二酸化炭素地中貯留メカニズムを再現しているわけではないことも知っておく必要がある。高等教育においては、その点を考慮して解説する必要があるだろう。しかしながら、一般向けには地下環境に気体や液体が閉じこめられるしくみをイメージできる世界初の展示を開発できたと考えている。

地球温暖化対策というのは、大気中の温室効果ガス濃度を生態系や人類に悪影響を及ぼさない程度に安定化させることであり、温室効果ガスの排出量と吸収量を同じレベルにすることで自然界における炭素循環をバランスを図るものである。そのため、科学館において「二酸化炭素を減らそう」といった単純なメッセージを出すべきではないだろう。もともと地下にあった化石燃料を燃やして大気中に放出さ

れた二酸化炭素を地下環境に戻そうというのは、自然のしくみを利用していこうとする考えである。本展示が順調に稼働し、CCSをはじめとする地球環境問題に挑む地下環境利用研究¹¹⁾のひとつとして知っていただくきっかけになれば幸いである。

謝辞

本展示の開発にあたっては、京都大学工学研究科の山田泰広准教授の監修いただいた。(財)地球環境産業技術研究機構の大隅多加志博士には、二酸化炭素地中貯留に関する情報をご提供いただいた。装置設計にあたっては(株)乃村工藝社の福島努氏、益田亮吉氏、河合伴治氏らをはじめとする制作担当者の方々に、意匠設計にあたっては同社の小林敬之氏、柳原朋子氏をはじめとする方々に、装置製作においてはノムラテクノ株式会社の竹内一雅氏ら、株式会社デフの原田文雄氏ら、株式会社ユーノスプリングの新開秀樹氏ら多くの技術者の方々にご尽力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2005) In: Metz, B., Davidson O., de Coninck, H.C., Loos, M., Meyer, L.A. (Eds.), IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the IPCC, Cambridge University Press,

- Cambridge, pp 431.
- (2) Okagawa, A. (2008) Commentson Endogenous progress and possibility of policy intervention to technological research and development. 内閣府経済社会総合研究所「ポスト京都議定書」の政策課題に関する国際共同研究 研究報告会.
 - (3) G8 北海道洞爺湖サミットにおける提言. 経済産業省 ウェブサイト (<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90529b08j.pdf>)
 - (4) 久留島守広 (2008) CO₂ 回収・地中貯留 (CCS) 技術の現状と展望. NEDO 海外レポート No. 1020.
 - (5) 薛自求, 中尾信典 (2008) CO₂ 地中貯留～世界各国の技術動向と政策動向および日本の課題～. 地学雑誌, 117, pp.722-733.
 - (6) 地球環境産業技術研究機構 (RITE) (2008) 平成 19 年度プログラム方式二酸化炭素固定化・有効利用技術開発 (ジオリアクターによる排ガス中の CO₂ の地中直接固定化技術開発) 成果報告書.
 - (7) 上田晃 (2009) ジオリアクター: 地熱を利用した CO₂ 固定化研究. 岩石鉱物科学 38, 122-128.
 - (8) Juanes, R., E. J. Spiteri, F. M. Orr Jr., and M. J. Blunt (2006) , Impact of relative permeability hysteresis on geological CO₂ storage, Water Resour. Res., 42, W12418, doi:10.1029/2005WR004806.
 - (9) Takahashi, Koji, Yamada, Yasuhiro, Murata, Sumihiko, Baba, Kei, Matsuoka, Toshifumi, (2006) : An experimental study of residual gas in aquifer. Proceedings of the 8th SEGJ-Imaging and Interpretation-. pp. 448-451.
 - (10) Stevens, S.H., Kuuskra, V.A. and Gale, J. (2001) : Sequestration of CO₂ in depleted oil and gas fields: Global capacity, costs and barriers. Proceedings of the 5th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Cairns, CSIRO Publishing, 278-283.
 - (11) 西本昌司 (2010) 地下環境研究のフロンティア～地質学に関わる新展示企画アプローチ～. 名古屋市科学館紀要 Vol.36, 10-18.