

微細泡 (マイクロバブル) CO₂ 注入による非構造性帯水層隔離法の提案

早大 小出 仁、みずほ情報総研 篠田淳二

1. CO₂ の地下安定封入

CO₂ 地中貯留は、地下深部の岩石の微細な間隙中に CO₂ を分散貯蔵するので、本来安全な技術である。既に実績もかなり在り、実用的でもある。しかし、地球温暖化防止のためには膨大な量の CO₂ を貯留するため、安全性の高度化と効率化—コスト削減の努力が重要である。

世界最初の大規模 CO₂ 地中貯留事業であるノルウェーのスレイブナー・プロジェクトでは、1996 年から年約 100 万トンの規模で北海海底下の帯水層に CO₂ を注入している。その国際共同モニタリング (SACS プロジェクト) が実施され、地下における CO₂ の重要な挙動が明らかにされた (SACS Best Practice Manual, 2003, CO₂STORE Best Practice Manual, 2007)。地下深部に CO₂ を急速に大量注入すると、注入口付近の帯水層中の地下水を排除して、岩石間隙中がほぼ CO₂ で満たされた領域 (CO₂ バブルと呼ぶ) が生じる。CO₂ バブル領域は、地下の温度・圧力条件により気体または超臨界流体状の CO₂ で岩石の間隙が満たされているため弾性波伝播速度が遅くなり、弾性波探査によって検出できる。気体または超臨界流体状の CO₂ は水より軽いため、CO₂ バブルは厚い砂層からなる帯水層中を上昇し、砂層中に挟まる薄い頁岩層に達すると一旦上昇を停めて頁岩層の下面に沿って広がるが、頁岩層に小さな隙間があると、それを抜けて上部の砂層に至り、砂層中を更に上の頁岩層に達するまで上昇する。隙間 (欠陥) の無い頁岩層に到達すると、その頁岩層が真のキャップロックになる。CO₂ バブルは、キャップロックの下を上方に向かって広がるため、CO₂ 流の方向の予測にキャップロック下面の「地形」が重要である。CO₂ 溶解水は溶解していない水より重くなるため、CO₂ が溶解すれば帯水層の下方に流れるので、地下に長年月留まると予測される。しかし、大きな CO₂ バブルが帯水層中に形成されると、CO₂ と水の接触が岩石の間隙中に制約されるので、地下の高圧下で CO₂ 溶解度が高いにも係わらず、大きな CO₂ バブルの溶解縮小には長年月を要する。

以上の知見から、以下の方策が CO₂ を地下に安定に封入するために有効である事が判る。

- (1) キャップロック (難浸透性の頁岩層・泥層・粘土層など) は薄くても有効であるが、隙間 (欠陥) が無いことが重要である。隙間 (欠陥) は、割れ目や不整合や砂脈や封塞の不完全な坑井で

あるが、その検出・探査技術の開発が必要である。また、検出した欠陥を補修する技術の開発も必要である。欠陥検出—補修技術については前に論じているので省略する (Koide, 2001) が、キャップロックが十分に厚ければ小さな欠陥は問題にならない。

- (2) 地下に大きな CO₂ バブルを形成しないような CO₂ 地下注入方法を用いれば、キャップロックに不完全な部分があっても安定に地下封入ができる。たとえば、CO₂ のみを圧入するのではなく、CO₂ 溶解水として圧入すれば、帯水層中で注入口よりさらに下方に流れるので、安定性が高い。しかし、この方法は多量の水を圧入する事になるので、効率が悪い。このため WAG 法と呼ばれる CO₂ と水を交互に圧入する方法が CO₂-EOR などで実用化されている。

著者らは、CO₂ 溶液注入や WAG 法より効率よく、大きな CO₂ バブル形成を防げる CO₂ 地下注入法として、新しく微細泡 (マイクロバブル) CO₂ 注入法を提案する。

2. 微細泡 (マイクロバブル) CO₂ 地下注入

径数十ミクロン程度以下のいわゆるマイクロバブルは、合体して大きなバブルを形成するより、むしろ縮小して急速に溶解消滅する傾向がある。マイクロバブルの性質

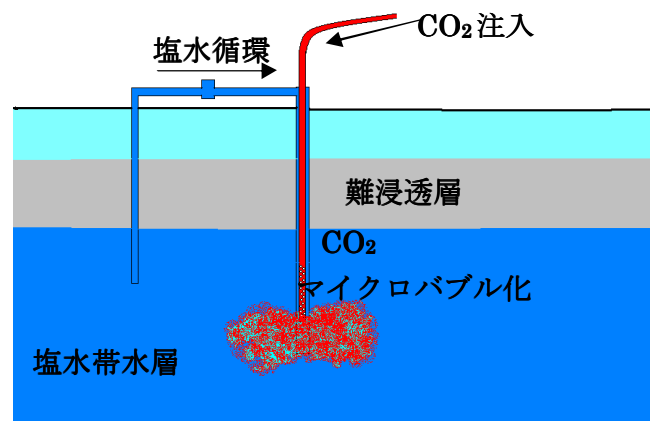


図 1. 微細泡 CO₂ 地下注入概念

はまだよく解明されていないが、縮小する際に内部は高圧になるので、表面積が大きいこともあって、溶解が速くなる。地下ではマイクロバブル内のCO₂注入法は超臨界状態になる可能性が高い。マイクロバブルは、大きなバブルに比べて浮力がごく小さいため、水中でほとんど上昇しない。このようなマイクロバブルの特性は、前項で述べたようにCO₂の地中隔離に理想的な性質である。

注入井の坑口ないし注入井内部にマイクロバブル発生装置を設置し、水中にCO₂を噴出してCO₂マイクロバブル乳状水を作り、貯留層に注入する(図1)。水は、帯水層からくみ上げた塩水地下水を用いて、それを地下に再圧入するのが望ましい。塩水地下水に含まれているメタンを回収し、代わりにCO₂を混入する。マイクロバブルを発生させる深度が効率上重要であるが、今後の主要な研究課題の一つである。

微細泡(マイクロバブル)の岩石への浸透性については、測定データが少なく、結果にも大きな変動がある。微細泡の径の分布と岩石の間隙径の分布の相互関係が複雑なためであろう。注意深い実験を多数行う必要があるが、岩石の間隙径より微細泡の径が十分に小さければ、マイクロバブル水の浸透性は良いが、間隙径より大きい微細泡が混入すると浸透性が著しく低下すると考えられる。微細泡の径は貯留層になる砂岩等の間隙より小さく、キャップロックとして期待される頁岩層・粘土層等の間隙より大きいことが望ましい。

微細泡(マイクロバブル)CO₂注入法をすれば、海洋隔離のようなフリーウォーター中でも安定にCO₂隔離ができると考えられるが、多孔質の岩石中では、界面効果

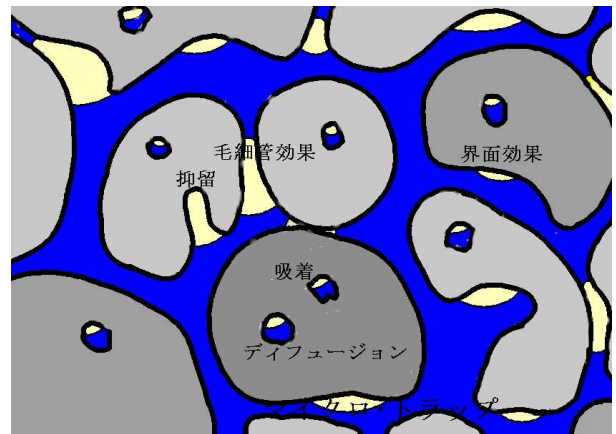


図2. マイクロ・トラップ

などによるマイクロ・トラップ・メカニズムが作用し、「残留ガス」が生じる。残留ガスとして岩石間隙中に留まっている間に、さらに溶解・イオン化・炭酸塩化などの固定メカニズムが進行し、長期安定化すると期待される。微細泡(マイクロバブル)CO₂注入法は、残留ガス化から溶解への固定プロセスを促進するほうほうであり、苦鉄質岩などへの地化学固定や微生物固定などの高度固定法を効率的に実現できる地下CO₂注入技術である。また、極微細なマイクロバブルの注入により、岩石の微細な間隙の奥にCO₂注入が可能であるので、CO₂-EOR(原油増進回収法)としても微細泡(マイクロバブル)CO₂注入法は有望である。特に、原油増進回収が技術的に難しい水押し型の油層に適している。

微細泡(マイクロバブル)CO₂地中隔離技術は安全性が高く、高度固定化を促進できる可能性を有している。

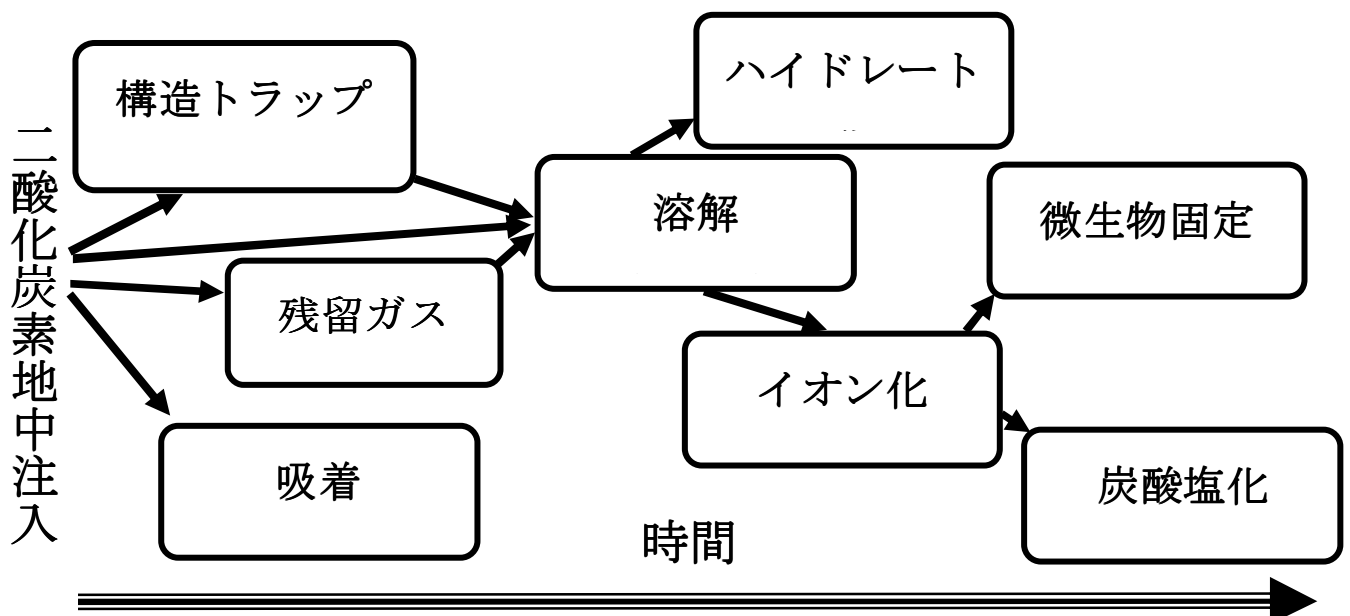


図3. CO₂地中固定の深化過程